

Avdelningen för Byggnadsfysik
Examensarbete TVBH—5113
Lund 2021

Självförsörjande flerbostadshus

Energilagring med hjälp av vätgas och
batterier

Mikael Broliden
Hanna Nilsson



LUNDS
UNIVERSITET

Självförsörjande flerbostadshus

Energilagring med hjälp av vätgas och batterier

Mikael Broliden
Hanna Nilsson

Examensarbete

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för Bygg- och miljöteknologi
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

© Mikael Broliden och Hanna Nilsson

ISRN LUTVDG/TVBH—21/5113—SE(129)

Institutionen för bygg- och miljöteknologi

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 LUND

Sammanfattning

I takt med att världen blir mer medveten om hur människans beteende påverkar jordens klimat, ställs också högre miljömål. Ett hållbart energisystem är en del av dessa miljömål och att övergå till enbart förnybara energikällor är ett verktyg för att uppnå dessa. Övergången till endast förnybara energikällor riskerar dock att medföra problem, bland annat så kallad effektbrist. Effektbrist är inget nytt, utan har förekommit tidigare. Effektbrist uppstår när elproduktionen inte täcker elbehovet vid en viss tidpunkt. Om all elproduktion är oplanerbar (till exempel sol- och vindkraft), kommer effektbrist vara ett faktum. För att undvika effektbrist måste det kompletteras med någon planerbar energikälla, som till exempel vattenkraft eller biobränsle. Alternativet är att lagra energi. Kapacitetsbrist är ett annat begrepp och detta uppstår när elnätet inte klarar av att leverera det som behovet kräver. Kapacitetsbrist uppstår framförallt när städer växer och fler energikrävande maskiner, till exempel elbilar, blir vanligare. Att göra bostäder självförsörjande på energi är en aktuell fråga som bidrar till ett mer hållbart energisystem.

Att bo off-grid innebär att bostaden är bortkopplad från en eller flera av samhällets infrastrukturer, där bortkopplad från elnätet är det vanligaste. Det finns tre parametrar som är viktiga att ta hänsyn till om en byggnad planeras att vara off-grid. Det är lågt värmebehov, låg elförbrukning och en elproduktion som täcker året runt. De två första parametrarna finns det mycket kunskap kring, dock är den sista parametern problematisk. För att klara av säsongsvariationer krävs någon typ av energilagring, där den egenproducerade överskottselen kan lagras till det att det finns behov för den. Rent teoretiskt krävs det egentligen ingenting för att bo off-grid, men om de moderna bekvämligheterna ska ingå krävs egenproducerad el och någon form av energilagring. Ekonomi och tillgång till lagringsutrymme är de parametrar som bestämmer hur energieffektiv byggnaden måste vara. Om solpaneler används är det mer fördelaktigt att placera byggnaden närmare ekvatorn, då solenergiproduktionen är mer jämn över året, vilket resulterar i att mindre lagringskapacitet krävs.

Det finns mycket kunskap kring att bygga energieffektiva byggnader och krav på energieffektivitet finns i bland annat BBR och FEBY 18. BBR innehåller grundkrav och riktlinjer, medan FEBY 18 fokuserar på krav mot energisnåla hus.

Till förnybara energikällor räknas bland annat sol, vind, vatten och biobränsle. De icke förnybara energikällorna är till exempel fossila bränslen. Det tas upp en hel del energilagringmetoder i det här examensarbetet, där vätgas- och batterilagring hamnar i fokus.

Projektet som studerats i det här examensarbetet ligger i Gårdstånga, norr om Lund i Skåne. Projektet består av 7 stycken flerbostadshus och beställare är Gustaf och Marianne Ramel (GMR). Kraftringen är anlita för att dimensionera en energilösning för byggnaderna. Målet med byggnaderna är att de ska ha en energiförbrukning på max 56 % av BBR:s energihushållningskrav. Solceller ska placeras i första hand på taken, om

mer utrymme krävs placeras dessa förslagsvis på bullervallen mot väg 104. Varje lägenhet ska ha tillgång till parkeringsplats med möjlighet för elbilsaddning. I examensarbetet har byggnaderna testats för att vara off-grid och 3 olika fall har skapats. Fall A är ett referensfall och är traditionellt kopplad till elnätet. Fall B är helt off-grid och producerar all el via solceller samt har ett energilager bestående av endast batterier. Fall C producerar också all el via solceller, men har istället ett energilager bestående av vätgas samt batterier som komplement. Eftersom flerbostadshuset i projektet inte är färdigprojekterade, ritades en byggnad upp i simuleringsprogrammet BIM Energy med hjälp av de riktvärden som tillhandahållits. I fall A testades byggnaden för BBR:s och FEBY 18:s energikrav för att se huruvida energieffektiv byggnaden var. Byggnaden klarade BBR:s alla krav och de flesta av FEBY 18. I fall B och C simulerades den producerade solenergin i programmet PVGIS. Resultatet för en byggnad, utan hänsyn till elbilar, visar att batterilagret kräver cirka 50 - 130 m² medan vätgaslösningen kräver ca 15 m². Kostnadmässigt beräknades batterilösningen vara mellan 4 och 12 gånger så dyr som vätgaslösningen.

En systemlösning bestående av solceller, vätgaslagring och batterier som komplementlagring är den mest lämpade lösningen för projektet i Gårdstånga. Dock är det inte tillräckligt motiverat att bo off-grid i Gårdstånga, eftersom elnätet är så pass driftsäkert samt att systemlösningen fortfarande är dyrare än att vara uppkopplad på elnätet ur ett livscykelperspektiv. Systemlösningen kan däremot vara mer aktuell för avlägsna platser där det redan förekommer långvarig elbrist. Framtiden för off-grid boende ser ljus ut och det sker stor utveckling inom vätgaslagring. Både EU och flera EU-länder har valt att satsa pengar på grön vätgas. I samband med utveckling kommer bättre teknik och vid massproduktion sänks också priserna, vilket gör det mer tillgängligt för privatpersoner som vill gå off-grid.

Titel: Självförsörjande flerbostadshus, energilagring med hjälp av vätgas och batterier

Författare: Mikael Broliden och Hanna Nilsson

Handledare: Petter Wallentén, institutionen för bygg- och miljöteknologi, byggnadsfysik

Examinator: Bengt Sundén, institutionen för energivetenskaper

Bakgrund: I samband med att världen försöker gå mot ett mer hållbart samhälle, ska det här examensarbetet studera möjligheterna att göra flerbostadshus helt självförsörjande på elektricitet samt värme. Flerbostadshuset som studeras tillhör ett projekt i Lund, Gårdstånga. Beställare av projektet är Gustaf och Marianne Ramel och Krafringen är anlitate för att dimensionera energisystemet.

Syfte: Syftet med examensarbetet är att utreda möjligheterna och även svårigheterna med att göra flerbostadshus helt självförsörjande på elektricitet samt värme.

Metod(er): En litteraturstudie har genomförts för att ta fram lämpliga energisystemlösningar för flerbostadshuset. Simuleringar har gjorts för både energibehov och energiproduktion. Intervjuer med sakkunniga har genomförts regelbundet under processen.

Slutsatser: Vätagaslagring med batterier som komplement är den mest lämpade systemlösningen för självförsörjande flerbostadshus i Lund. Dock är det i dagsläget mer lönsamt att vara uppkopplad på elnätet.

Nyckelord: Energieffektivitet, Off-grid, energilagring, vätgas, batterier, förnybar energi, långtidslagring, beräkning, simulering

Abstract

As the world becomes more aware of how human behavior affects the earth's climate, higher environmental goals are also set. A sustainable energy system is one part of these environmental goals, and switching to only renewable energy is a tool to reach such goals. However, a system with only renewable energy can be vulnerable at time periods of reduced production of electricity, with a subsequent risk for power shortage. Depending on the proportion of intermittent (eg. wind turbines and solar panels) versus plannable (eg hydropower and biofuels) energy production the risk of power shortage will vary. To overcome the risk of power shortage, solutions for storage of excess energy can be found. Lack of capacity is another issue, and this arises when the electricity grid is unable to deliver the quantity required at a given time. This problem usually occurs when cities are growing and the demand for electricity is growing faster than the grid is expanded. By making homes self-sufficient in energy supply a more sustainable energy system can be defined.

Living off-grid means that the home is disconnected from one or more of the community's infrastructures, where being disconnected from the electricity grid is the most common. There are three parameters that are important to consider if a building is planned to be off-grid. These include low heat demand, low energy consumption and an electricity production that covers the demand over the year. There is a lot of knowledge about the first two, but the third parameter is more problematic. In order to cope with seasonal variations with times of excess production, to times of limited or no production, some type of energy storage is required. Theoretically, nothing is really required to live off-grid, but if the modern amenities are to be included, self-produced electricity and energy storage are needed. Economy and access to storage space are two important parameters which decide how energy efficient the building needs to be. For example, if solar panels are used, less storage is needed the closer to the equator the building is, because the electricity production is more even over the year.

There is a lot of knowledge about building energy efficient buildings, and requirements can be found in BBR and FEBY 18. BBR contains basic requirements and guidelines, while FEBY 18 focus more on very energy efficient buildings. Renewable energy sources include solar, wind, hydropower and biofuels. The non-renewable energy sources are oil, coal and other fossil fuels. A lot of energy storage methods are covered in this master thesis, where hydrogen- and battery storage come into focus.

The project being studied is located in Gårdstånga, north of Lund. The project consists of seven apartment building, and the project clients are Gustaf and Marianne Ramel (GMR). Krafringen is hired to define an energy solution for the buildings. The buildings aim to have an energy consumption of maximum 56 % of BBR's energy requirement. The project is based on solar panels for energy production. Each apartment will have access to a parking space with the possibility of electric car charging.

In this master thesis, the buildings will be tested to be off-grid and three different cases have been tested. Case A is a reference case where the buildings are connected traditionally to the grid. case B is an off-grid solution in which all electricity is produced

from solar panels, and batteries are used for energy storage. Case C is also an off-grid solution and all electricity is produced from solar panels, but the storage will be in a combination of compressed hydrogen and batteries. Since the buildings are not fully designed by the architects yet, a reference building was designed in the simulation program BIM Energy. In case A, the building was tested for the energy requirements against BBR and SVEBY 18. The building met all BBR's requirements and all the FEBY 18 that could be tested at this time. In cases B and C the production of electricity was simulated in PVGIS. The results of the cases showed that in case B, for one building, the battery storage required an area of about 50 to 130 m², whereas the hydrogen storage for the same building only acquired an area of about 15 m². In terms of cost, the battery solution calculated to be between 4 and 12 times as expensive as the hydrogen solution.

A system consisting of solar panels and hydrogen storage together with batteries as complementary storage, is considered the most suitable solution for the project in Gårdstånga. However, it is not recommended to be off-grid in Gårdstånga, from both a cost and operational reliability perspective. However, to be off-grid is more relevant for more remote locations where the grid is not as reliable. The future of off-grid buildings with hydrogen storage appears promising and there is a rapid development in hydrogen storage. Both the EU and several EU countries have chosen to invest a lot of money in green hydrogen in the near future. While the technology improves and the components will be able to be mass produced, the cost will be reduced making it more accessible to go off-grid.

Förord

Vi som har skrivit det här examensarbetet heter Mikael Broliden och Hanna Nilsson. Examensarbetet är den avslutande delen inom civilingenjörsutbildningen i Väg- och vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet har skrivits i samarbete med Krafringen och arbetet skrevs under november till april år 2020/2021.

Först och främst vill vi tacka vår underbara handledare Annika Widmark Sjöstedt på Krafringen som har peppat och motiverat oss vecka efter vecka samt försökt se till att vi håller oss till en röd tråd genom hela arbetet. Vi vill även tacka Johnny Ragazzo som har hjälpt oss under framförallt projekteringsfasen i BIM Energy och som även kommit med nya synvinklar. Ett stort tack går även till Gustaf Ramel och GMR för hans entusiasm kring vårt arbete, utan honom hade vi inte haft ett verkligt projekt att studera! Vi vill också tacka Hans-Olof Nilsson och Martina Wettin på Nilsson Energy för inspiration, trevligt bemötande och mycket bra information kring vätgaslagring och dess potential.

Vi vill givetvis också rikta ett tack till vår handledare Petter Wallentén på Lunds Tekniska Högskola som hjälpt till med upplägg och besvarat våra frågor när det uppkommit några. Även ett stort tack till vår examinator Bengt Sundén som har hjälpt oss på vägen.

Sedan vill vi också tacka alla de personer som tagit sig tid att bli intervjuade och som svarat på frågor angående vårt arbete! Det har varit en väldigt lärorik period och vi har lärt oss otroligt mycket!

Lund, april 2021

Mikael Broliden

Hanna Nilsson

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	i
Abstract	v
Förord	vii
Innehållsförteckning.....	i
Nomenklatur.....	v
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund och frågeställning	2
1.2 Syfte och Mål	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Metod	4
2 Teori, byggnadens egenskaper	5
2.1 Off-grid hus.....	5
2.2 Miljöcertifieringar.....	6
2.2.1 Miljöbyggnad.....	6
2.2.2 FEBY 18, passivhus.....	7
2.3 Energianvändning i dagens bostäder.....	9
2.4 Värmeeffektbehov för en byggnad.....	10
2.4.1 Total specifik värmeförlusteffekt.....	10
2.4.2 Gratisvärmestillskott	11
2.5 Värmeenergibehov för en byggnad.....	12
2.5.1 Gränstemperatur	13
2.6 Energikrav för byggnader i Sverige	14
2.6.1 Primärenergital	14
2.6.2 Installerad effekt för uppvärmning	15
2.6.3 Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient	15
2.6.4 Luftläckage	16
2.7 Krav för inomhusmiljön.....	16
2.8 Fönster.....	17
2.9 Ventilationssystem	17
2.9.1 Självdrag (S)	18
2.9.2 Mekanisk frånluftsventilation (F)	18
2.9.3 Mekanisk till- och frånluftsventilation (FT)	18
2.9.4 Mekanisk frånluftsventilation med värmeåtervinning (FX)	18
2.9.5 Mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX)	18
2.9.6 Vädring.....	19
2.10 Uppvärmning av fastighet.....	19
2.10.1 Värmepump	19
2.10.2 Fjärrvärme	22
2.10.3 Direktverkande el	23
2.10.4 Restvärme från vätgas	23
3 Tekniska lösningar.....	25
3.1 Elproduktion och förnybara energikällor	25
3.1.1 Solenergi.....	26

3.1.2	Vindkraft.....	27
3.1.3	Biobränsle.....	28
3.1.4	Vattenkraft.....	29
3.2	Vad är elbrist, effektbrist och kapacitetsbrist.....	29
3.3	Lagring av termisk energi.....	30
3.3.1	Sensibel värmelagring.....	30
3.3.2	Latent värmelagring.....	30
3.3.3	Kemisk värmelagring.....	31
3.4	Lagring av energi.....	32
3.4.1	Superkondensatorer.....	32
3.4.2	Supraledare.....	33
3.4.3	Komprimerad luft.....	33
3.4.4	Svånghjul.....	34
3.4.5	Pumpkraftverk.....	34
3.4.6	Bergrum.....	34
3.4.7	SaltX.....	34
3.4.8	Batteri.....	35
3.4.9	Vätgas.....	35
3.5	Batterier.....	35
3.6	Vätgas.....	40
3.7	Elektrolys och elektrolysörer.....	44
3.7.1	Alkalisk elektrolysör.....	45
3.7.2	PEM – Proton Exchange Membrane.....	45
3.7.3	SOEC Solid Oxide Electrolysis Cell.....	45
3.8	Bränslecell.....	46
3.8.1	Proton Exchange Membrane - PEM.....	46
3.8.2	Solid Oxide Fuel Cell – SOFC.....	47
4	Elbilar.....	49
5	Befintliga och pågående off-grid projekt.....	51
5.1	Hans-Olof Nilssons villa, Göteborg.....	51
5.2	Zero Sun, Skellefteå.....	52
5.3	Sjöbohem.....	52
5.4	Vätterhem.....	53
5.5	Förskola Mariestad.....	53
5.6	Tankstationen i Mariestad.....	53
6	Presentation av projektet.....	55
6.1	Information kring flerbostadshuset.....	55
6.2	Introduktion av fallen.....	56
7	BIM Energy och PVGIS.....	59
7.1	Uppbyggnad av referenshus i BIM Energy.....	59
7.2	PVGIS.....	64
8	Resultat av BIM Energy och PVGIS.....	67
8.1	Resultat från BIM Energy.....	67
8.2	Resultat från PVGIS.....	68
9	Fallstudie.....	69
9.1	Fall A, kopplad till elnätet.....	69
9.1.1	Förutsättningar.....	69

9.1.2	Avgränsningar.....	69
9.1.3	Beräkningar.....	69
9.1.4	Analys och diskussion av fall A	73
9.2	Fall B, Off-grid lösning med endast batterilagring	75
9.2.1	Förutsättningar	75
9.2.2	Avgränsningar.....	76
9.2.3	Beräkningar.....	76
9.2.4	Analys och diskussion av fall B.....	80
9.3	Fall C, Off-grid lösning med batteri- och vätgaslagring	82
9.3.1	Förutsättningar.....	82
9.3.2	Avgränsningar.....	83
9.3.3	Beräkningar.....	83
9.3.4	Analys och diskussion av fall C.....	87
10	Diskussion	91
10.1	Jämförelse mellan alternativen.....	91
10.2	Buffert och dimensionering av lagringssystemet	92
10.3	Möjligheter med andra förutsättningar.....	93
10.4	Framtidsutsikter	95
10.5	Förslag till vidare studier	95
11	Slutsats.....	97
12	Litteraturlista.....	99

Nomenklatur

Nomenklatur för batterier:

- SOC: State of charge. Hur laddat ett batteri är [%]
- DoD: Depth of discharge. Hur urladdat ett batteri är [%]
- SOH: State of health. Kvarvarande kapacitet jämfört med om batteriet är nytt [%]
- 20-fots container: En standardcontainer med måtten 6 058 x 2 438 x 2 591 [mm].

Nomenklatur för byggnaden:

- U-värde: Värmegenomgångskoefficient. Mått på isoleringsförmåga. [$\text{W}/\text{m}^2, \text{K}$]
- A_{temp} : Uppmätt golvarea som är uppvärmd mer än $10\text{ }^\circ\text{C}$ [m^2]

Nomenklatur, enheter:

- Nm^3 : Normalkubikmeter. Dvs gasens volym vid atmosfärstryck.
- kVA: Kilovolt-ampere
- dBA: Decibel

Nomenklatur, blandad:

- Koldioxidekvivalenter: Ett mått på utsläpp av växthusgaser. Används för att beräkna den sammanlagda växthuseffekten för olika växtgasutsläpp. Beteckning är CO_2e .
- Elmix: Genomsnittlig koldioxidekvivalent för ett eller flera länders elproduktion. Till exempel svensk elmix eller nordisk elmix.

1 Inledning

Världen blir mer och mer medveten om hur människans levnadssätt påverkar klimatet på jorden. Tittar man på FN:s klimatmål kan man se bland annat mål som ”Hållbar energi för alla”, ”Hållbara städer och samhällen” och ”Bekämpa klimatförändringar” (UNDP, 2020). FN skriver bland annat ”Genom att ändra hur vi producerar och konsumerar energi kan vi säkerställa tillgången till el och energitjänster för alla utan att vi skadar vår planet”. I takt med att samhället utvecklas sätts allt större press på det befintliga elnätet. Elbilar är ett bra exempel på en energikrävande enhet som blir allt vanligare i det moderna samhället. Elbilar bidrar till minskade koldioxidutsläpp, men de belastar samtidigt elnätet. Enligt FN kommer elbehovet globalt att öka med 37 % till år 2040. Kapacitets- och effektbrist är två stycken problem som det allt oftare talas om i Sverige (Ellevio, 2019). Människor i dagens samhälle är beroende av el och det moderna samhället kräver att elförsörjningen ska fungera utan problem. För att kunna övergå till enbart förnybar energi krävs det att lösningarna samspekar med varandra.

Idag finns det en mängd olika sätt att producera både el och värme. Kärnkraft, fossila bränslen och förnybara bränslen som sol-, vind- och vattenkraft är bara några exempel på detta. Trots att det finns bra teknologi och kunskap kring förnybara energikällor står fortfarande de icke-förnybara energikällorna för en stor del för världens elproduktion (Ekonomifakta, 2020). Den stora frågan som uppstår är givetvis varför? För att förstå svaret på frågan är det viktigt att förstå vad el är. Elektricitet är en momentan vara, det vill säga något som måste förbrukas i samma stund som den produceras. En blåsig och solig sommardag kan det produceras mer el än vad som behövs för att täcka energibehovet. Men när solen inte lyser eller när vinden inte blåser krävs en annan form av energikälla och under vintermånaderna är det därför svårt att tillgodose behovet av energi med enbart förnybara och icke-planerbara energikällor. För att kunna övergå till enbart förnybara energikällor måste energin lagras. Trots svårigheterna med att lagra energi, finns det flera olika lagringsmetoder idag. Batterier är bara ett exempel på kemisk energilagring som används dagligen i form av mobiltelefoner och datorer.

Att göra bostadshus självförsörjande på förnybar el och värme är en bra lösning för både miljön och det befintliga elnätet. Det här examensarbetet ska titta närmare på möjligheterna att lagra el och värme för några planerade flerbostadshus i Gårdstånga.

1.1 Bakgrund och frågeställning

Efterfrågan på lägenheter förväntas öka i Brunnshög tack vare Science Village; forskningsanläggningarna ESS och MAX IV (Planbeskrivning). Gårdstånga ligger endast 7 km från Brunnshög och skulle därför vara ett lämpligt område för framtida forskare att bo i.

I Gårdstånga, Lund, ska det byggas 7 stycken flerbostadshus och beställaren av projektet är företaget GMR fastigheter AB, som ägs av Gustaf och Marianne Ramel. Byggnaderna ska vara 400 m² vardera, fördelat på två våningar. Krafteringen är anlita för att komma fram till en värmelösning för byggnaderna och GMR vill att projektet ska sikta på de högt ställda miljömål som finns. Modern miljöteknik och energilösningar som solceller är en viktig del av projektet och tanken är att flerbostadshusen ska smälta in med den omgivande bebyggelsen.

Idag finns det högt ställda miljömål från bland annat FN och Sverige har också som mål att vara klimatneutral till år 2050 (Naturvårdsverket, 2013). Hållbara energisystem är en del av dessa mål och i samband med att allt mer icke planerbara energikällor används, som sol- och vindkraft, är energilagring en väldigt aktuell fråga.

Examensarbetet ska utreda möjligheterna kring att göra flerbostadshusen i Gårdstånga helt självförsörjande på energi. För att klara av säsongvariationer, krävs det någon form av lagring över tid för den egenproducerade energin. Två stycken olika fall kommer att skapas, där de två mest lämpade lagringsmetoderna kommer att jämföras med varandra. Även ett referensfall, där byggnaden är kopplad till elnätet, kommer att skapas. Följande frågor kommer att tas upp och besvaras i examensarbetet.

- Vilka olika energilagringsmetoder för energi finns det idag och vilka lämpar sig för lagring till bostäder?
- Vad krävs det för att göra ett hus självförsörjande på energi?
- Vilka för- och nackdelar finns det med de skapade fallen?
- Är det möjligt att göra husen i Gårdstånga helt självförsörjande på el samt värme och vad är i så fall den bästa lösningen?
- Varför är det överhuvudtaget aktuellt att titta på sådana här lösningar?
- Hur ser framtida möjligheter ut för att bo i självförsörjande hus?

1.2 Syfte och Mål

Syftet med det här examensarbetet är att utreda möjligheten att bygga flerbostadshus som är bortkopplade från elnätet, och därmed vara helt självförsörjande på el och värme över hela året. Olika lagringsmetoder kommer att presenteras, men endast ett fåtal

kommer utredas närmare. Ett referenshus kommer att tas fram i programmet BIM Energy. Traditionell uppkoppling till elnätet för referenshuset kommer sedan att jämföras med två olika systemlösningar för självförsörjning av el samt värme.

Målet med examensarbetet är att uppmärksamma problematiken och möjligheterna att vara helt självförsörjande gällande el och värme på ett miljövänligt samt hållbart sätt.

1.3 Avgränsningar

- Beräkning för elproduktion och elkonsumention beräknas för ett normalår. Oförutsedda klimatvariationer och brukarbeteende tas inte hänsyn till.
- Brukarbeteende, personvärme och andra schablonmässiga antaganden som påverkar el- och energiförbrukning är endast uppskattningar. Variation tas ej hänsyn till.
- Samtliga systemlösningar förutsätter att det är rättsligt möjligt samt att tillstånd och krav uppfylls.
- Vätgasen antas endast användas för produktion av el samt värme till byggnaden. Andra användningsområde, som till exempel fordonsbränsle eller försäljning av syrgas, nämns översiktligt med tas ej hänsyn till i analys och diskussion.
- Byggnadens planlösning i projektet är endast ett exempel, och kommer heller inte att utredas närmare.
- Rördragning utan VVC antas klara kraven från BBR. Exakt dimensionering av värmesystemet tas inte upp.
- Endast övergripande ekonomisk kalkyl undersöks. Investeringskostnaden för byggnaderna tas inte upp.
- Framtida potentiell elförbrukning för olika komponenter tas inte hänsyn till
- Val av material samt dess egenskaper diskuteras ej. Färdig konstruktion väljs i BIM Energy och matchas för riktlinjer mot passivhus.
- Endast de krav och riktlinjer från BBR, FEBY18 och Sveby som är relevanta för aktuell byggnad har tagits upp. Inga andra miljöcertifieringar beräknas.
- Inneklimatet för byggnaderna antas uppnå de krav och riktlinjer som finns.

1.4 Metod

Examensarbetets första del består av en teoridel kring byggnadens egenskaper. Teorin tar även upp vilka krav det finns för energihushållningen hur dessa kan beräknas. Efter teorin kommer litteraturstudien, där fokus ligger på energilagring. Vidare presenteras det projekt som ska studeras och de olika fallen som ska analyseras bestäms. Därefter görs en fallstudie, bestående av tre olika fall. Slutligen görs en analys och slutsats dras.

Fakta som används i teorin och litteraturstudien är till största delen hämtad från Internetkällor, men även intervjuer med sakkunniga, läroböcker, föreläsningar, artiklar och tidigare examensarbeten. Krafteringen har bidragit med kunskap, eftersom examensarbetet skrivs i samarbete med dem. Regelbundna möten med Krafteringen har hållits. Energikrav, rekommendationer och börvärde för byggnader är för det mesta taget från BBR och Sveby. Teorin och litteraturstudien ger ett stabilt underlag för att ta fram tre stycken olika fall för Gårdstångaprojektet, där ett med traditionell uppkoppling till elnätet och två bortkopplade från elnätet, ska testas och diskuteras.

Program som använts till beräkningarna är PVGIS, BIM Energy och Excel. PVGIS är ett program som är utvecklat av European Commission Joint Research Centre, JRC, och med hjälp av detta program kan producerad sol-el beräknas. Energiberäkningarna för byggnaderna är utförda i BIM Energy. Eftersom flerbostadshusen i Gårdstånga inte är färdigprojekterade, ansågs detta program enklast att använda eftersom det redan finns färdiga modeller i programmet. BIM Energy är utvecklat av Strusoft. Excel har använts för att underlätta beräkningarna av energibehovet. BIM Energy har även möjlighet att konvertera sitt resultat till en Excelfil, vilket underlättar beräkningsdelen.

En del beräkningar är utförda för hand, och formlerna som använts är tagna från BBR, kursmaterial från Installationsteknik FK och FEBY 18.

2 Teori, byggnadens egenskaper

2.1 Off-grid hus

Elnät, vatten- och avloppssystem samt fjärrvärme tillhör några av samhällets vanligaste infrastrukturer. Detta möjliggör en bekväm levnadsstandard och de flesta människor i Sverige är idag beroende av att dessa system fungerar. När människor lever bortkopplade från en eller flera av dessa infrastruktursystem kallas det för att de lever off-grid. Elnätet är det vanligaste systemet att vara bortkopplad från och ofta är det detta man tänker på när man talar om off-grid (Naturskyddsföreningen, 2020). I det här examensarbetet kommer definitionen av off-grid innebära bortkopplad från elnätet.

Förr i tiden levde alla människor off-grid och de saknade många av de bekvämligheter som vi har idag. Idag lever cirka 1,7 miljarder människor ofrivilligt bortkopplade från samhällets infrastrukturer (Naturskyddsföreningen, 2020) och cirka 1 miljard människor saknar elektricitet (Energy Building, 2020). De människor som inte har tillgång till elektricitet lever i en så kallad energifattigdom och Naturskyddsföreningen skriver att de flesta av dem bor på landsbygden. Värst är det i Afrika där mer än hälften av människorna lever utan el. Ingen människa ska behöva leva i energifattigdom och Naturskyddsföreningen anser att lösningen är ett hundra procent förnybart energisystem som kan tillgodose människans energibehov. Trots att människor lever i energifattigdom finns det de människor som frivilligt kopplar bort sig från de bekvämliga systemen och börjar leva off-grid. I USA lever till exempel cirka 200 000 familjer frivilligt off-grid (Naturskyddsföreningen, 2020). Men varför väljer egentligen människor att leva off-grid?

De människor som frivilligt väljer att leva off-grid idag saknar inte den moderna komforten. Ett motiv att bo off-grid kan vara att de inte vill vara beroende av el utifrån, utan producerar allt själva och därmed bli oberoende av elmarknaden. Vissa människor väljer att bo på platser där det inte finns något befintligt elnät eller där driftstörningar är vanligt och därmed tvingas att bo off-grid för att kunna ha en fungerande vardag. En annan anledning till att vilja bo off-grid är på grund av miljön och klimatförändringar (Naturskyddsföreningen, 2020).

Det finns tre parametrar som är viktiga att beakta när man ska bygga off-grid. De tre parametrarna är lågt värmebehov, låg energiförbrukning och en elproduktion som täcker behovet året runt (Energy Building, 2020). Idag finns det stor kunskap kring att bygga byggnader med lågt värmebehov och låg energiförbrukning. Sådana byggnader kallas i dagligt tal oftast för passivhus, eller lågenergihus. Mer om passivhus går att läsa under rubriken ”FEBY 18, passivhus”. Det finns många olika miljöcertifieringar som en fastighetsägare kan använda som mall för att byggnaden ska bli så energieffektiv som möjligt, bland annat FEBY 18 och Miljöbyggnad.

Det svåra med att bygga off-grid är den sista parametern, nämligen att ha en elproduktion som täcker behovet året runt. Off-grid hus har oftast solenergi som bas, men kan kompletteras med ett vindkraftverk (Energy Building, 2020). Därför kan

vintermånaderna bli problem, speciellt i norra delarna av Sverige där soltimmarna är få. Då krävs det någon form av energilagring. Idag kan man exempelvis lagra energi i batterier eller ha värmepannor.

2.2 Miljöcertifieringar

Det finns en hel del olika miljöcertifieringssystem runt om i världen och bara miljöklassningssystemen uppgår till över 500 stycken (Wahlström, 2019).

Att miljöcertifiera en byggnad gör det enklare för fastighetsägaren att visa sitt miljöengagemang. Det blir också en kvalitetssäkring och skapar ordning under projekteringen. Miljöcertifierade byggnader får även en konkurrensfördel eftersom de oftast lockar fler hyresgäster och köpare. Förutom att en miljöcertifiering höjer värdet på fastigheten, blir också driftkostnaderna lägre. Det finns alltså en hel del olika anledningar till varför en fastighetsägare vill miljöcertifiera sin byggnad.

Exempel på miljö- och energiklassningssystem som används i Sverige kan ses i Tabell 1. Miljöklassningssystemen tar hänsyn till ett större perspektiv, medan energiklassningssystemen endast fokuserar på energiförbrukning.

Tabell 1. Miljö- och energiklassningssystem som används i Sverige

Miljöklassningssystem
LEED (internationell)
BREEAM (internationell)
Miljöbyggnad
Svanen
Energiklassningssystem
Green Building (internationell)
FEBY 18
Passivhaus (internationell)
Energideklaration

2.2.1 Miljöbyggnad

Miljöbyggnad har 16 stycken olika bedömningspunkter och de är utspridda på kategorierna energiåtgång, inomhusmiljö och byggnadsmaterial (Sweden Green Building Council, 2020). I Tabell 2 kan de 16 olika bedömningspunkterna ses. Idag finns det över 1 500 byggnader i Sverige som är certifierade som miljöbyggnad. Indikatorerna under energiåtgång är liknande de bedömningspunkter som går att finna i FEBY18. Den stora skillnaden är att Miljöbyggnad har fler kategorier och bedömningspunkter än vad FEBY18 har.

Tabell 2. Bedömningspunkter i Miljöbyggnad

Energiåtgång
Värmeeffektbehov
Solvärmelast
Energianvändning
Andel förnybar energi
Innomhusmiljö

Ljud
Radon
Ventilation
Fuktsäkerhet
Inneklimat, vinter
Inneklimat, sommar
Dagsljus
Legionella
Byggnadsmaterial
Loggbok med byggvaror
Utfasning av farliga ämnen
Stommens och grundens klimatpåverkan
Sanering av farliga ämnen

2.2.2 FEBY 18, passivhus

Kraven för detta avsnitt är taget från FEBY 18 (2018) om inget annat anges.

Ordet passivhus myntades av Dr Wolfgang Feist och han byggde det första passivhuset i Tyskland. Han definierade olika energikrav på vad en byggnad ska klara för att få kallas för passivhus. Dessa krav har idag förbättrats och Sverige har anpassat kraven för att det ska passa förutsättningarna som finns i landet. Kraven finns i FEBY18 och ersätter det internationella energiklassningssystemet Passivhaus (Adalberth, 2021)

Nollenergihus samt plusenergihus är två ytterligare begrepp som används för att förklara byggnadens energiprestanda. Dessa typer av byggnader liknar passivhus (Vattenfall, 2020). Den stora skillnaden är att de producerar sin egen energi med hjälp av till exempel solceller. Nollenergihus producerar lika mycket energi som de förbrukar på årsbasis, medan plusenergihus producerar mer energi än vad de gör av med. Dock är byggnaderna fortfarande kopplade till elnätet eftersom de saknar energilagring och därför behöver köpa in under vintermånaderna. Enligt Adalberth är bra isolering, god lufttäthet och hög värmeåtervinning i ventilationen det viktigaste att tänka på när man ska bygga ett passivhus. Placering, materialval, optimering och kvalitetssäkringar är alla faktorer som spelar roll och passivhus är basen för till exempel nollenergihus. (Energy Building, 2020). Strömsnåla vitvaror och belysning minskar energiförbrukningen. Ett passivhus bör ha fönster med ett u-värde som inte överstiger 0,9 (Passivhuscentrum, 2020). En standardyttervägg har idag i snitt 240 mm isolering (Byggahus, 2020) medan ett passivhus kan ha uppemot 500 mm isolering.

I följande stycken beskrivs kraven i FEBY 18. Vissa av kraven har tre olika nivåer; brons, silver och guld och dessa krav står sammanställda i Tabell 4 och Tabell 5. Alla krav som tas upp i det här arbetet är dock avgränsade så att endast de punkter som berör flerbostadshus i storleken 400 m² finns med.

Värmeförlusttal

Kraven för värmeförlusttalet kan ses i Tabell 4. Enligt FEBY 18 är värmeförlusteffekten en av de viktigaste parametrarna för huruvida en byggnad är energieffektiv eller inte. Ju mindre värmeförlusttalet är, desto mindre belastat är energisystemet. VFT, värmeförlusttalet, tar hänsyn till värmeförlusterna via transmission, ventilation och infiltration.

VFT beräknas enligt följande ekvationer:

$$VFT_{DVUT} = \frac{H_T \cdot (21 - DVUT)}{A_{temp}} \quad [W/m^2, A_{temp}] \quad (1)$$

Där DVUT är dimensionerande vinterutetemperatur och för Lund är DVUT -11,4 °C (Boverket och SMHI, 2017). H_T är byggnadens värmeluftskoefficient.

H_T beräknas enligt ekvation 2.

$$H_T = U_m \cdot A_{om} + \rho \cdot c \cdot q_{läck} + \rho \cdot c \cdot d \cdot q_{vent}(1 - v) \quad [W/K] \quad (2)$$

U_m : Klimatskalets genomsnittliga u-värde [$W/m^2, K$]

A_{om} : Klimatskalets omslutande, invändiga area [m^2]

$q_{läck}$: Luftläckage [m^3/s]

c : Luftens värmekapacitet [$kJ/kg, K$]

ρ : Luftens densitet [kg/m^3]

v : Ventilationssystemets verkningsgrad

d : Relativ driftstid

$q_{läck}$ beräknas enligt ekvation 3.

$$q_{läck} = \frac{q_{50} \cdot A_{oms} \cdot e}{1 + \frac{f}{e \cdot \left(\frac{q_{sup} - q_{ex}}{q_{50} - A_{oms}} \right)^2}} \quad [m^3/s] \quad (3)$$

$q_{sup} - q_{ex}$: Luftöverskott mellan tilluft, q_{sup} , och frånluft, q_{ex} [m^3/s]

q_{50} : Specifikt läckflöde vid 50 Pa tryckskillnad inne och ute [$m^3/s, m^2$ omsl.area]

e och f : Vindskyddskoefficienter enligt Tabell 3.

Tabell 3. Vindskyddskoefficienter e och f

Vindskyddskoefficienter e och f	Flera sidor exponerade	En sida exponerad
e		
Ingen avskärmning: Öppet landskap eller höga byggnader i staden.	0,1	0,03
Måttlig avskärmning: Förortsmiljö, landskap med träd eller andra byggnader.	0,07	0,02
Kraftig avskärmning: Byggnad i skog eller med genomsnittshöjd i city.	0,04	0,01
f		
	15	20

Tabell 4. Krav på värmeförlusttal

Byggnader < 600 m^2	VFT [$W/m^2 A_{temp}$]
FEBY Guld	$14 + (600 - A_{temp})/110$
FEBY Silver	$19 + (600 - A_{temp})/110$
FEBY Brons	$22 + (600 - A_{temp})/110$

Specifik energiuppvärmning för eluppvärmda byggnader

Kraven för levererad el till eluppvärmd byggnad för varmvatten, uppvärmning och fastighetsenergi kan ses i Tabell 5.

Tabell 5. Krav på specifik energiuppvärmning för eluppvärmda byggnader

Gäller alla typer av byggnader.	Specifik energiuppvärmning för eluppvärmda byggnader [kWh/m ²]
FEBY guld	26
FEBY silver	32
FEBY brons	38

Luftläckage

Luftläckage från en byggnad får inte vara högre än 0,3 l/s, m² när tryckdifferensen är 50 Pa.

Solvärmelast

Solvärmelast beräknas för det mest utsatta rummet. Om ett rum har fönster i mer än ett väderstreck, används både formel 4 och 5 och sedan väljs det högsta värdet. Kravet för ett bostadshus är att solvärmelasten måste vara mindre än 29.

$$SVL = 800 \cdot g \cdot \frac{A_{glas}}{A_{golv}} \quad (4)$$

$$SVL = \frac{560 \cdot g \cdot A_{glas,s/v/ö} + 560 \cdot g \cdot A_{glas,s/v/ö}}{A_{golv}} \quad (5)$$

A_i: Area för glas eller golv [m²]

g: Solfaktor

Ljudnivå

Ventilationen ska klara ljudklass B i såväl sovrum som vardagsrum. Ljudklass B är 26 dBA och detta mäts i ett kontrollprogram.

Energieffektiva installationer

Energieffektiva installationer, minskad miljöpåverkan och kvalitetssäkring ska premieras och olika val ger olika poäng. För bostadshus mindre än 600 m² gäller en poängnivå på minst 5. Poängkraven går att hitta i FEBY 18.

2.3 Energianvändning i dagens bostäder

Om man tittar på Sveriges totala energianvändning går ungefär 26 % av all energi till bostäder och service (Ekonomifakta, 2020). Det är relativt enkelt att se hur mycket energi som går till vilken sektor, men det är desto svårare att ta fram en fördelning för hur ett enskilt hushåll distribuerar sin energi. Det är viktigt att komma ihåg att elförbrukningen är direkt kopplad till hur människorna i boendet lever och därför är det otroligt svårt att sätta en generell fördelning. Till exempel ger en höjd grad inomhus cirka 5 % högre

energiförbrukning, vilket innebär att två familjer som bor i identiska lägenheter kan ha helt olika fördelningar bara på grund av hur de väljer att ha sin inomhustemperatur (Energirådgivaren, 2011). Antalet människor och dess levnadsvanor spelar också stor roll. En familj på 4 personer förbrukar antagligen mer varmvatten än en familj på 2 personer och elektroniska apparater såsom antal datorer och mobiltelefoner ökar hushållselen. Elbilar ökar också i antal och fler väljer att köpa en elbil, läs mer under rubriken ”elbilar”. En familj med elbil behöver givetvis tillgång till mer el än en familj som kör en vanlig bil. Enligt BEN2 (Boverket, 2017) beräknas hushållsel vara 30 kWh/m², A_{temp} och år.

2.4 Värmeeffektbehov för en byggnad

För att kunna bedöma hur god energihushållning en byggnad har, kan värmeeffektbehovet tas fram. Värmeeffektbehovet ger en uppfattning om storleken byggnadens energiförluster. En tät och energieffektiv byggnad har ett lågt värmeeffektbehov. Vid beräkningar av värmeeffektbehovet för en byggnad ska transmissions-, ventilations- och läckageförluster samt gratisvärme tas med i beräkningarna. Värmeeffektbehovet beräknas enligt formeln nedan. Beräkningsgången för värmeeffektbehovet är tagen från (Jensen, 2001)

$$P = Q_{tot}(T_{inne} - T_{ute}) - P_{gratis} \quad [W] \quad (6)$$

Q_{tot}: Total specifik värmeförlusteffekt [W/K]

T_{inne}: Inomhustemperaturen [°C]

T_{ute}: Utomhustemperaturen [°C]

P_{gratis}: Gratisvärmertilskott [W]

2.4.1 Total specifik värmeförlusteffekt

Den totala specifika värmeförlusteffekten beräknas med hjälp av formeln nedan:

$$Q_{tot} = Q_t + Q_v \quad [W/K] \quad (7)$$

Där Q_t står för transmissionsförluster och Q_v står för ventilationsförluster.

Transmissionsförluster och köldbryggor

Transmissionsförluster är den värme som läcker ut genom en byggnads klimatskal, det vill säga fönster, dörrar, väggar, golv och tak (Bostad Västerås, 2020). Köldbryggor är en del av transmissionsförlusterna och uppkommer till exempel vid bristfällig isolering eller anslutningar (GDS, 2019)

Q_t är byggnadens transmissionsförluster och beräknas enligt följande:

$$Q_t = Q_{köldbryggor} + \sum U_j \cdot A \quad [W/K] \quad (8)$$

Q_{köldbryggor}: Förlustfaktor för köldbryggor [W/K]

U_j: U-värde för yta j [W/K, m²]

A: Area för yta j [m²]

Ventilationsförluster

Ventilationsförluster är den värme som följer med ut genom byggnadens ventilationssystem (Bostad Västerås, 2020).

Q_v är ventilations- och läckageförlusterna och beräknas enligt följande:

$$Q_v = \rho \cdot c \cdot q_{vent}(1 - v) \cdot d + \rho \cdot c \cdot q_{läckage} [W/K] \quad (9)$$

ρ : Luftens densitet, normalt 1,2 kg/m³

c : Luftens värmekapacitet, normalt 1 000 J/kg, K

q_{vent} : Uteluftsflöde m³/s

v : Verkningsgrad för ventilationens värmeåtervinning

d : Relativ drifttid för ventilationsaggregat vid ständig drift är $d = 1$

$q_{läckage}$: Läckageluftflöde, m³/s

2.4.2 Gratisvärmeskott

Värme avges till byggnaden från bland annat solinstrålning, belysning och människorna som vistas i den. Tack vare gratisvärmeskottet behöver till exempel inte en byggnad värmas upp på sommaren.

$$P_{gratis} = \frac{E_{gratis}}{8760} [W] \quad (10)$$

E_{gratis} är gratisvärmeenergin. Det här värdet är ofta inte känt, utan ungefärliga värden brukar användas. Gratisvärmeenergin för lägenheter gäller följande (Jensen, 2001):

Personer: 500 – 3 000 kWh/år

Hushållsel: 1 000 – 3 000 kWh/år

Solinstrålning: 1 000 – 3 000 kWh/år

Risk för övertemperatur

Gratisvärme i form av solinstrålning bidrar till att bostäder knappt behöver någon uppvärmning under vår och sommar. Under riktigt varma och soliga dagar finns det dock risk för övertemperatur (Energi- och Miljötekniska Föreningen, 2011). Passivhus och lågenergihus riskerar att drabbas av just detta. Dessa typer av hus är välisolerade och värmen har svårt att ta sig ur. Förutom solinstrålning, avges värme från bland annat personer och elektronik som också bidrar till gratisvärme. Socialstyrelsen rekommenderar att inomhustemperaturen inte bör överskrida 26 °C under sommarmånaderna.

Ett sätt att minska risken för övertemperatur är att inte placera allt för stor fönsterarea på söderfasaden eller på taket, eftersom den mesta värmen tar sig in via fönsterna. Aktiv fönstervädring och utvändigt solavskärmning är också effektiva metoder för att bekämpa

övertemperatur. Forskare på KTH förespråkar även bättre möjlighet till naturlig ventilation som lösning på problemet. Ökad ventilation, kylmaskin kopplad till FTX-system och kondenskyla kan också fungera. En studie i Linköping visade dock att passiv kylning ofta räcker, och därför bör dessa lösningar prioriteras. (Energi- och Miljötekniska Föreningen, 2011)

Tabell 6 är ett utdrag från BBR:s brukarindata för nya flerbostadshus, där solavskärmningsfaktorn kan ses i BEN2. Om solavskärmningsfaktorn är till exempel 0,5 innebär det att 50 % av all instrålning kan skärmas bort.

Tabell 6. Solavskärmningsfaktor för nya flerbostadshus

Parameter	Delparameter	Delparameter	Värde
Solavskärmning	Beteendestyrd avskärmning (avskärmningsfaktor)	Till exempel markiser, persienner och gardiner.	0,71

2.5 Värmeenergibehov för en byggnad

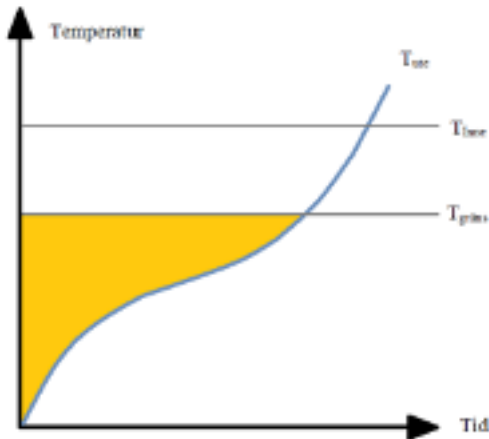
Värmeenergibehovet, E_{uppv} , kan beräknas enligt ekvation 11 nedan. Integralen i ekvationen kallas för gradtimmar och kan åskådliggöras i ett så kallat varaktighetsdiagram, se Figur 1. I ett varaktighetsdiagram kan innetemperaturen, utetemperaturens variation och gränstemperaturen ses. Det gula området i diagrammet motsvara antal gradtimmar för aktiv uppvärmning av bostaden. Om gränstemperaturen är lägre än utetemperaturen krävs kylning för att komma ner till önskad innetemperatur.

$$E = Q_{\text{tot}} \cdot \int_{\text{Året}} (T_g - T_{\text{ute}}) dt \quad [Wh] \quad (11)$$

Q_{tot} : Total specifik värmeförlusteffekt [$W/^\circ C$]

T_g : Gränstemperatur [$^\circ C$]

T_{ute} : Utetemperatur [$^\circ C$]



Figur 1. Varaktighetsdiagram

Det finns tabeller för gradtimmar där färdiga värden kan tas fram. Ekvationen kan då förenklas till följande:

$$E = Q_{tot} \cdot G_t \quad [Wh] \quad (12)$$

Q_{tot} : Total specifik värmeförlusteffekt [W/K]

G_t : Gradtimmar

2.5.1 Gränstemperatur

Gränstemperaturen, T_g är den temperatur där aktiv uppvärmning behövs. Gränstemperaturen beräknas enligt nedan:

$$T_g = T_{inne} - \frac{P_{gratis}}{Q_{tot}} \quad [^{\circ}C] \quad (13)$$

T_{inne} : Innetemperatur [$^{\circ}C$]

P_{gratis} : Gratisvärmeenergi [W]

Q_{tot} : Total specifik värmeförlusteffekt [W/ $^{\circ}C$]

Med hjälp av gränstemperaturen kan sedan det aktuella värmeeffektbehovet skrivas om till följande:

$$P = Q_{tot} \cdot (T_g - T_u) \quad [W] \quad (14)$$

Q_{tot} : Total specifik värmeförlusteffekt [W/ $^{\circ}C$]

T_g : Gränstemperatur [$^{\circ}C$]

T_u : Utetemperatur [$^{\circ}C$]

2.6 Energikrav för byggnader i Sverige

Från sida 135 i BBR 2011:6 börjar avsnittet om energihushållning. Denna källa används i hela avsnittet, om inget annat anges (BBR, 2020)

BBR har föreskrifter och allmänna råd som reglerar energihushållningen för byggnader i Sverige. Det finns krav på högsta tillåtna primärenergitalet, installerad effekt för uppvärmning, genomsnittlig värmegenomgångskoefficient och genomsnittligt luftläckage. Dessa krav är olika för olika typer av byggnader och justeras bland annat genom storlek, användning och geografisk plats. Enligt Tabell 7 kan kraven för ett flerbostadshus ses. Endast de tillägg som berör flerbostadshusen i Gårdstånga har tagits med. För att få till exempel investeringsstöd måste byggnaden, utöver att vara hyres- eller studentlägenheter, ha en energianvändning som motsvarar högst 88% av BBR:s energikrav (Boverket, 2020). Ytterligare investeringsstöd finns om byggnaden klarar en energianvändning på max 56 % av BBR:s krav. Själva bonusen gör att stödbeloppet får höjas med 75 %.

Tabell 7. BBR:s krav på energihushållning för flerbostadshus

Energiprestanda uttryckt som primärenergital (EP_{pet}) [kWh/m ² A_{temp} och år]	75 ⁽¹⁾
Installerad eleffekt för uppvärmning [kW]	4,5 + 1,7 * ($F_{geo} - 1$)
Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient (U_m) [W/m ² ,K]	0,4
Klimatskärmens genomsnittliga luftläckage vid 50 Pa tryckskillnad [l/s, m ²]	Byggnadens klimatskärm ska vara så tät att kraven på byggnadens primärenergital och installerad eleffekt för uppvärmning uppfylls.

(1). Tillägg om A_{temp} överstiger 130 m². Om F_{geo} är mindre än 1, sätts den till 1.

$$Tillägg = (0,025 + 0,02 \cdot (f_{geo} - 1)) \cdot (A_{temp} - 130) \text{ [kWh/m}^2, A_{temp} \text{ och år]} \quad (15)$$

2.6.1 Primärenergital

En byggnads energiprestanda baseras på energianvändningen, som innefattar uppvärmning (E_{uppv}), komfortkyla (E_{kyl}), tappvarmvatten (E_{tvv}) och byggnadens fastighetsenergi (E_f). Detta uttrycks som ett primärenergital och beräknas enligt följande formel:

$$EP_{pet} = \frac{\sum_{i=1}^6 \left(\frac{E_{uppv,i} + E_{kyl,i} + E_{tvv,i} + E_{f,i}}{F_{geo}} \right) \cdot VF_i}{A_{temp}} \text{ [kWh/m}^2, A_{temp} \text{ och år]} \quad (16)$$

Byggnadens energianvändning E_{BEA} , eller köpt energi som man också säger, avser den energin som vid normal användning förbrukas under ett normalår och beräknas enligt ekvation 17 nedan:

$$E_{BEA} = E_{uppv} + E_{kyl} + E_{tvv} + E_f \quad \text{[kWh/år]} \quad (17)$$

Vid beräkning av primärenergitalet korrigeras termen för uppvärmning med en geografisk justeringsfaktor F_{geo} . Ett hus uppe i Norrland kräver till exempel mer värme än ett hus nere i Skåne. F_{geo} för Skåne är 0,9. VF är en viktningsfaktor för respektive energibärare och kan ses i Tabell 8.

Tabell 8. Viktningsfaktorer

Energibärare	Viktningsfaktorer (VF _i)
EI (VF _{ei})	1,8
Fjärrvärme (VF _{fv})	0,7
Fjärrkyla (VF _{fk})	0,6
Fasta, flytande och gasformiga biobränslen (VF _{bio})	0,6
Fossil olja (VF _{olja})	1,8
Fossil gas (VF _{gas})	1,8

Uppvärmning, E_{uppv}

E_{uppv} är den energin som krävs för att värma upp en fasighet och anges i enheten [kWh/år].

Komfortkyla, E_{kyl}

Komfortkyla är den energi som byggnaden använder för att sänka inomhustemperaturen och anges med enheten [kWh/år]

Tappvarmvatten, E_{tvv}

Energien till tappvarmvattnet [kWh/år]

Fastighetsenergi, E_r

När en energikrävande apparat som relaterar till byggnadens behov befinner sig inom, under eller anbringad på utsidan av byggnaden räknas det som fastighetsenergi. Fast belysning i allmänna utrymmen, övervakningsutrustning och externt lokalt placerade apparater som försörjer byggnaden är också exempel som ingår i fastighetsenergin. Belysning i trädgården eller kupévärmare för fordon är exempel på saker som INTE ingår i fastighetsenergin.

Fastighetsenergin anges i [kWh/år].

2.6.2 Installerad effekt för uppvärmning

För att kunna upprätthålla ett önskat inomhusklimat, en tappvarmvattenproduktion samt ventilation krävs en viss eleffekt. Den installerade eleffekten för uppvärmning syftar till den eleffekt när byggnadens maximala effektbehov föreligger. Med hjälp av DVUT och en tappvarmvattenproduktion motsvarade minst 0,5 kW/lägenhet, om inget annat anges, kan det maximala effektbehovet för byggnaden beräknas.

2.6.3 Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient

Den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten tar inte bara hänsyn till olika byggnadsdelar, utan även eventuella köldbryggor och beräknas enligt formeln nedan.

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \sum_{k=1}^m I_k \cdot \psi_k + \sum_{j=1}^p X_j}{A_{om}} \quad [W/m^2, K] \quad (18)$$

U_i : Värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel i [$W/m^2, K$]

A_i : Area för byggnadsdelens yta mot uppvärmd inneluft [m^2]

Ψ_k : Värmegenomgångskoefficienten för linjär köldbrygga k [$W/m, K$]

I_k : Längden mot uppvärmd inneluft av den linjära köldbryggan [m]

X_j : Värmegenomgångskoefficienten för punktformig köldbrygga j [W/K]

A_{om} : Omslutningsarea mot uppvärmd inneluft [m^2]

2.6.4 Luftläckage

För flerbostadshus gäller att ”Byggnadens klimatskärm ska vara så tät att kraven på byggnadens primärenergital och installerad eleffekt för uppvärmning uppfylls”.

2.7 Krav för inomhusmiljön

Boverket har ett minikrav på bostäder att de ska ha ett ventilationsflöde på minst 0,35 l/(s,m²) golvarea. Tilluften ska tillföras i sov-/vardagsrum och föras till de mest förorenade rummen så som badrum och kök. Detta för att bl.a. fukt och matos inte ska spridas över hela bostaden utan transporteras med ventilationen så kort väg ut som möjligt. Minimikraven för till- respektive frånluft kan ses i Tabell 9. Endast de krav som kommer påverka Gårdstänga-projektet är medtagna. (BBR, 1998)

Tabell 9. Minimikrav för till- och frånluft i bostäder enligt BBR

Utrymme, Bostäder	Minsta tilluftsflödet
Rum eller del av rum för sömn och vila.	4 l/s per sovplats
	Minsta frånluftsflödet
Kök	10 l/s, forcering med minst 75 % uppfångningsförmåga för luftföroreningar
Bad eller duschrum med öppningsbart fönster	10 l/s. Om golv-arean är större än 5 m ² tillkommer 1 l/s för varje kvadratmeter därutöver. Om tvättmaskin och torktumlare ska installeras bör ökade krav på luftväxlingen ske.

Den riktade operativa temperaturen ska vara minst 18 °C i en bostad och arbetsrum. Vidare följer att den riktade operativa temperaturen ska vara minst 20 °C i hygienrum och vårdlokaler. Enligt folkhälsomyndigheten (2014) motsvarar kravet på den riktade operativa temperaturen ungefär 20 °C i inomhusluften (mätt med väggtermometer). Den riktade operativa temperaturen får inte heller skilja sig mer än 5 °C mellan olika punkter i rummet. Vid beräkning av energianvändning används dock 21 °C som börvärde för minsta rumstemperatur, enligt BBR BEN2. Enligt Socialstyrelsen bör inomhustemperaturen inte överstiga 26 °C under sommarmånaderna. Detta är inte ett krav, utan en rekommendation (Energi- och Miljötekniska Föreningen, 2011). Yttertemperaturer på golv får som lägst vara 16 °C och i hygienrum 18 °C (Boverket, 2018).

Krav på lufthastigheten i ett rum är att den ej får vara högre än 0,15 m/s under uppvärmningssäsongen, och inte högre än 0,25 under övrig tid. (Boverket, 2018). Temperaturkrav och lufthastighet ska uppfyllas vid en dimensionerande vinterutetemperatur (DVUT).

Boverket (2020) har dagsljuskrav. När BBR skriver dagsljus, syftar de till solljus som reflekteras i atmosfären och inte det direkta solljuset. Detta innebär alltså att dagsljuset, enligt BBR:s definition, är lika i alla riktningar. Dagsljuskravet innebär att människor ska ha god tillgång till direkt dagsljus i de rum som används mer än tillfälligt. De allmänna råden från BBR säger att fönsterglasarean ska vara minst 10 % av golvarean, vilket innebär att dagsljusfaktorn hamnar på cirka 1 %. Dagsljusfaktorn motsvarar den belysningsstyrka som når en punkt i rummet när himlen är oavskärmd och mulen.

2.8 Fönster

Olika fönster har olika egenskaper och det finns vissa värden som kan vara bra att känna till. Den mängd dagsljus som kommer in genom ett fönster kallas för dagsljustransmittans (SP fönster, 2020). Dagsljustransmittansen anges i % som ett LT-värde. Om LT-värdet ligger runt 60 %, anses det bra och i bostäder strävar man efter ett så högt LT-värde som möjligt. Den totala mängd solvärme som kommer in genom fönstret anges som ett g-värde. Ett högt g-värde innebär att byggnaden får mycket gratisvärme, medan ett lågt g-värde innebär motsatsen. Beroende på hur byggnaden är designad och placerad kan det vara fördelaktigt att välja ett högt- respektive lågt g-värde.

För en vanlig året-runt-bostad rekommenderas 3-glas fönster, medan 2-glas fönster räcker om det är ett sommarhus, garage eller förråd (SP fönster, 2020). För att öka isoleringsförmågan kan fönsterspalterna fyllas med argon eller krypton då dessa har sämre värmeledningsförmåga än luft. När man bygger energisnåla byggnader är det bra att ha en liten fönsterarea, eftersom fönster generellt isolerar sämre än en yttervägg. Samtidigt krävs det en viss fönsterarea för att täcka de dagsljuskrav som finns. Vid val av fönster är det därför viktigt att ta hänsyn till flera aspekter.

2.9 Ventilationssystem

I ett vanligt hus förekommer bland annat fukt, matos och emissioner från möbler samt byggnadsmaterial. En fungerande ventilation hjälper till att ventilerar ut detta samt förhindra mögel och rötskador. För att ett ventilationssystem ska fungera optimalt ska det vara undertryck inne i huset, vilket förhindrar att fukt rör sig med hjälp av luften ut genom till exempel väggarna. Tilluft är den luft som tillkommer till byggnaden och tilluftsventilerna placeras oftast i tex sovrum där man vill ha frisk luft. Frånluftsventilerna placeras oftast i kök och våtrum eftersom matos och fukt snabbt ska ventileras ut. Det finns flera olika typer av ventilationssystem och dessa redogörs nedan. (Ventilation.se, 2020)

2.9.1 Självdrag (S)

Självdrag är ett ventilationssystem som saknar fläktar och var väldigt vanligt förr. Principen med självdrag bygger på termisk drivkraft och vinden. När luften blir varm stiger den upp och förs ut via tex murstocken. Detta skapar ett undertryck, vilket gör att ny luft utifrån letar sig in genom otätheter i klimatskalet eller ventil. På sommaren fungerar självdrag mindre bra, eftersom uteluften redan är varm. Då blir de termiska drivkrafterna inte lika stora och man kan behöva vädra för att få en tillräcklig luftomsättning. Eftersom självdrag bygger på otätheter är detta inte en lämplig metod för varken ett off-grid hus eller en vanlig byggnad. Metoden används knappt idag eftersom den har svårt att uppfylla BBR:s ventilationskrav (Energy Building, 2020).

2.9.2 Mekanisk frånluftsventilation (F)

Frånluftsventilation innebär att luften sugs ut av en frånluftsfläkt. Frånluftsfläkten sitter oftast placerad på taket och suger ut luften från de rum som är mest förorenade så som badrum och kök. Tilluften kommer via ventiler i fönster samt väggar. Frånluftsventilation används knappt idag, trots att metoden uppfyller BBR:s ventilationskrav utan några svårigheter. Problemet med frånluftsventilationen är att det är ett energikrävande system då fläktarna kräver mycket elektricitet. Detta gör att systemet har svårt att klara de energikrav som finns idag (Energy Building, 2020).

2.9.3 Mekanisk till- och frånluftsventilation (FT)

FT-ventilation har mekaniska till- och frånluftsventiler, vilket innebär att luften både tas in och ut med hjälp av fläktar. Luftflödet blir relativt kontrollerat. Nackdelen är att fläktarna går på el (Polarpumpen, 2020).

2.9.4 Mekanisk frånluftsventilation med värmeåtervinning (FX)

Fx-ventilation frånluftsventilation med värmeåtervinning. En frånluftpump återvinner värmen i luften som sedan kan värma upp till exempel tappvarmvatten och vatten till radiatorer. En stor fördel med FX jämfört med vanlig frånluftsventilation är givetvis värmeåtervinningen. Nackdelen är att fläktarna och frånluftsvarmepumpen drar el, speciellt under vintertid. Luftflödet är mer och bättre kontrollerat än självdrag, men det finns fortfarande svårigheter att få rätt flöde och risk för drag är förekommande (Polarpumpen, 2020).

2.9.5 Mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeåtervinning (FTX)

FTX-ventilation har mekaniska till- och frånluftsventiler, vilket gör att det går att kontrollera hur mycket luft som tillkommer och lämnar byggnaden. För moderna, välisolerade och energieffektiva hus är FTX en förutsättning för att ventilation såväl som energibesparingar ska fungera på ett så bra sätt som möjligt. FTX har värmeåtervinning med hjälp av en värmeväxlare eller ett FTX-aggregat och frånluftsvärmen hjälper till att värma upp tilluften. Precis som FX är FTX-ventilationens stora fördel värmeåtervinningen. FTX har också ett kontrollerat luftflöde och det är helt frikopplat

från utomhusvädret. Nackdelarna är att fläktarna kräver el och systemet kräver en del underhåll (Polarpumpen, 2020).

2.9.6 Vädring

Vädring är en beteenderelaterad parameter som påverkar energibehovet. Människans vädringsvanor varierar och är svår att förutsäga. Till exempel kan byggnadens exponering av vind och typ av ventilationssystem påverka hur mycket någon väljer att vädra. Vid självdrag kan det till och med vara nödvändigt att vädra på sommaren för att få in tillräckligt med frisk luft. SVEBY (2009) redovisar förslag till vädringspåslag. Det finns tre olika sätt att ta hänsyn till vädringspåslaget vid beräkningar:

- Schablonpåslag på framräknad energiprestanda (specifika energianvändningen).
- Ökade otätheter dvs ett förhöjt tryckprovningresultat.
- Ökning av det fläktstyrda luftflödet.

Beroende på vilket program som används för att beräkna energiprestandan kan de olika alternativen vara mer eller mindre lämpliga att använda. SVEBY rekommenderar det förstnämnda alternativet, eftersom den utförs efter beräkningsresultatet och därför är oberoende av det valda programmets inbyggda schabloner. Det rekommenderade vädringspåslaget är då 4 kWh/m², år.

2.10 Uppvärmning av fastighet

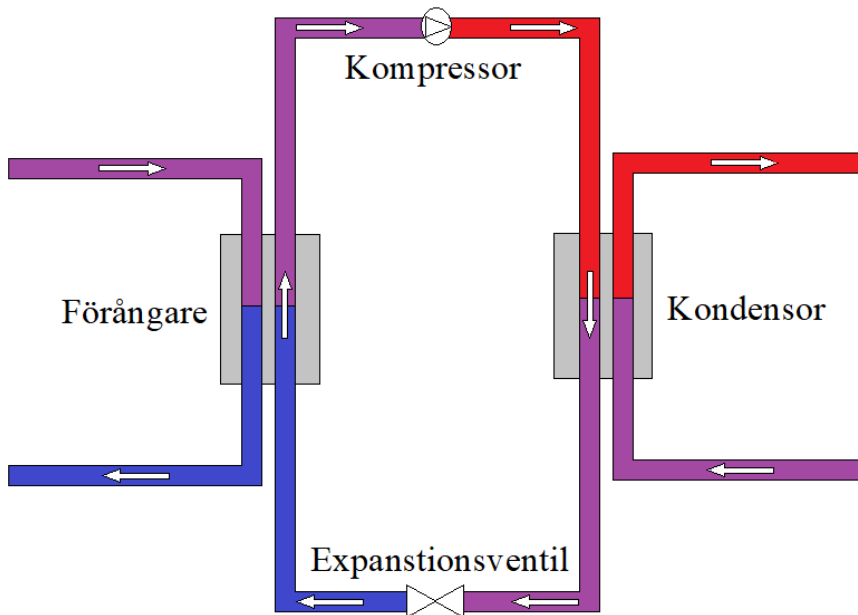
Det finns flera olika sätt att värma upp en fastighet, där fjärrvärme är vanligast i större fastigheter i städer, medan värmepumpar ersätter pellets och oljepannor och direktverkande el i fastigheter utanför städerna. Nedan sammanställs de vanligaste uppvärmningsmetoderna i Sverige.

2.10.1 Värmepump

Det finns olika typer av värmepumpar, men gemensamt för alla är att de hämtar värme från olika källor. Det finns värmepumpar som hämtar värme från berggrund, mark, sjövattnen eller luft. Hur en värmepump fungerar rent tekniskt beskrivs i punktform nedan (Polarpumpen, 2016) och principen kan ses i Figur 2.

- En värmepump innehåller ett köldmedium, vars uppgift är att transportera värme. Köldmediet har både låg temperatur och lågt tryck när den passerar värmepumpens förångare. Energikällan, tex jordvärmens, värmer upp köldmediet som då övergår till gasform.
- För att höja kokpunkten och öka temperaturen används en kompressor. Kompressorn ökar trycket och ser till att köldmediet cirkulerar.
- När temperaturen nu är högre, leds köldmediet in i en kondensator. Där tvingas köldmediet att återgå till flytande form och därmed avges värme. Därifrån kan värmepumpen distribuera ut värmen till husets olika delar.

- I det sista steget passerar köldmediet en expansionsventil, där trycket minskar och kokpunkten sänks. Köldmediet kan återigen passera förångaren och därmed är kretsloppet komplett.



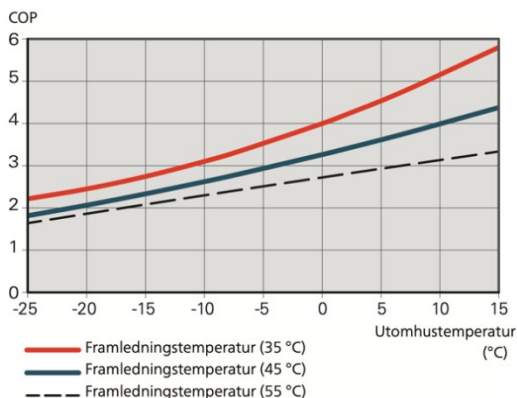
Figur 2. Värmepumpsystem

Direkta fördelar med att använda en värmepump är bland annat tillgången på billig energi. Värmepumpen släpper inte heller ut några avgaser och kan i det avseendet anses som ett klimatsmart val. Däremot kan en privatperson inte laga pumpen utan hjälp om den skulle gå sönder och installationskostnaderna är höga. Dessutom kräver en värmepump el för att fungera.

Coefficient of performance (COP)

En värmepump är väldigt energieffektiv när det gäller att producera energi så billigt som möjligt. Tack vare kompressorn och de andra komponenterna kan en värmepump tillföra värmesystemet 5 gånger så mycket energi än vad den själv förbrukar. Detta innebär att om värmepumpen förbrukar 1 kWh el så kan den tillföra 5 kWh värme och därmed är COP lika med 5. COP-värdet varierar kraftigt beroende på temperaturen hos källan energin tas ifrån samt vilken temperatur som ska skickas ut ur värmepumpen. COP-värdet varierar därmed beroende på temperaturskillnaden mellan ingående och utgående. Ju mindre temperaturskillnad desto högre COP. Figur 3 nedan visar hur COP-värdet för en NIBE F2120-8 luft/vatten-värmepump varierar beroende på framlednings- samt utomhustemperatur. För att få ett mer jämförbart värde hur verkningsgraden ser ut över året används beteckningen SCOP. SCOP är mer rättvist vid jämförelse mot andra system då COP för en specifik värmepump kan variera mellan 1,5 och 6 beroende på förutsättningarna (Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020).

F2120-8 COP



Figur 3. COP i förhållande till utetemperatur (Nibe, 2021).

När solen lyser lagras energi djupt ner i marken, så kallad bergvärme. Bergvärmens lagras djupt ner i berggrunden och för att kunna nyttja energin krävs ett cirka 100 - 200 m djupt borrhål. Ett rör med cirkulerande vätska sänks ner i borrhålet där den värms upp av den lagrade solvärmens. Därefter utvinns värmen med hjälp av en bergvärmepump, som sedan distribuerar ut värmen i huset. COP-värdet för bergvärme varierar inte speciellt mycket över året då temperaturen i berget håller sig omkring årsmedeltemperaturen över hela året. Bergvärme är generellt sätt den dyraste av de olika värmepumparna vid själva investeringen då djupa borrhål ska borras, men driftkostnaderna är ofta lägre än de andra värmepumparna samt att ett borrhål beräknas hålla i minst 50 år (NIBE, 2020).

Jord- och sjövärme fungerar på samma sätt som bergvärme, där kollektorslangen grävs ner under marken på ca 1 meter djupt alternativt på sjöbotten. Detta är oftast en billigare lösning men då temperaturen varierar under året ändras även COP under året.

Luft/vatten

En luft/vattenvärmepump hämtar energi från uteluften via en utomhusmodul bestående av en fläkt. Det uppvärmda vattnet förs sedan via slangar från fläkten in till inomhusmodulen. För luft/vattenvärmepumpar varierar COP-värdet väldigt mycket under året, och då COP-värdet är högre desto mindre vattnet behöver värmas upp passar denna typ av värmepump bättre i varmare klimat som till exempel Skåne jämfört med norra Sverige då Skåne inte har speciellt kalla vintrar.

Luft/vatten är generellt sätt en billigare investering än bergvärme då inga större ingrepp behöver göras förutom att några slangar ska kopplas mellan en inomhus och en utomhusmodul. (Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020)

Luft/luft

En luft/luftvärmepump består på samma sätt som en luft/vattenvärmepump av en inomhusdel och en utomhusdel. Här består dock båda delarna av varsin fläkt där energi från utomhusluften tas upp via utefläkten och tillförs sedan rummet via inomhusfläkten. Luft/luft-värmepumpar används oftast som komplement alternativt för att leverera kyla

Till skillnad från alla andra värmepumpssystem så sprids värmen med hjälp av luft och inte vatten. I de andra värmepumpssystemen distribueras värmen med ett vattenburet system ut till radiatorer, men med en luft/luftvärmepump sprids värmen med hjälp av en fläkt. En luft/luftvärmepump är billigare än luft/vatten. Under de varmare årstiderna kan luft/luftvärmepumpen också leverera kyla. En luft/luftvärmepump fungerar dock endast som ett komplement till annan uppvärmning och den kan inte producera varmvatten. Den är även mindre effektiv vid låga temperaturer. Värmepumpens COP varierar mycket över året då utomhusluftens temperatur varierar. (Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020)

Frånluftsvärmepump

En frånluftsvärmepump tar tillvara på värmen i frånluften innan den ventileras ut. Därmed tas den befintliga värmen tillvara på för att värma upp tappvarmvattnet och radiatorkretsen. Tillskottet av värme sker dock via direktverkande el vilket medför att denna lösning endast passar till energisnåla småhus med lågt värmebehov. (Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020)

2.10.2 Fjärrvärme

Historiskt sett byggdes fjärrvärmenätet i syfte att förbättra luftkvaliteten inne i tätbygden. Tidigare hade alla bostäder en egen förbränningspanna. Men genom en gemensam förbränningscentral utanför staden, kunde luftkvaliteten förbättras.

Vatten värms upp på fjärrvärmeverken och forslas sedan ut till bostäderna under högt tryck via välisolerade rör i marken. Temperaturen på vattnet ligger mellan 70 och 120 °C och för att värma upp vattnet till rätt temperatur krävs bränsle. Bränslet kan vara rester vid skogsavverkning, överskottsvärme från olika industrier och avfall. Oftast kombineras olika bränslekällor. De bostäder som har fjärrvärme har en fjärrvärmecentral, och det är hit vattnet transporteras efter att det färdats genom rören. I fjärrvärmecentralen finns en värmeväxlare. Denna utnyttjar det varma vattnet för uppvärmning av radiatorer och tappvarmvatten. En fjärrvärmecentral kräver i princip inget underhåll. När värmen är utnyttjad skickas det nu kylda vattnet tillbaka till fjärrvärmeverken för att på nytt bli uppvärmt (Konsumenterna Energimarknadsbyrå, 2020)

Fjärrvärme är ett etablerat uppvärmningssystem i Sverige och bland flerbostadshusen är hela 90 % fjärrvärmeanvändare. Det finns cirka 200 fjärrvärmeföretag i Sverige, där de flesta är kommunala bolag och de äger fjärrvärmenäten som ligger utplacerade runt om i landet. Fördelarna med att använda fjärrvärme är bland annat att de restavfall från skogsindustrin som annars skulle gått till spillo, faktiskt används och utnyttjas. Fjärrvärme belastar inte elnätet vilket värmepumpar gör. Detta innebär att leveranssäkerheten är väldigt hög, oavsett årstid. Att vara ansluten till fjärrvärmenätet kräver inte en egen produktionsanläggning, utan det räcker med den förhållandevis lilla fjärrvärmecentralen. Dessutom är fjärrvärmecentralen tyst och driftsäker. En av de negativa aspekterna med fjärrvärme är att det inte finns på alla platser i Sverige (Solör Bioenergi, 2020)

2.10.3 Direktverkande el

Vid direktverkande el kommer elen direkt in i radiatoren för att producera värme. Denna typ av el är generellt dyrare i drift än vattenburen värme på grund av att värmepumparna har bättre verkningsgrad. Dock är det billigare installationskostnad då dessa endast behöver ett eluttag och antingen står på hjul eller skruvas fast på väggen. Direktverkande el kan även användas som komfortgolvvärme i badrum. Denna typ av uppvärmning används oftast som komplement när "huvuduppvärmningssystemet" inte räcker till, alternativt i mindre ytor eller utbyggnader där beställaren inte vill investera i att bygga ut det vattenbaserade uppvärmningssystemet. Många sommarstugor har fortfarande direktverkande el till den lilla uppvärmning som krävs samt för att värma tappvarmvattnet.

2.10.4 Restvärme från vätgas

När el omvandlas till vätgas med hjälp av elektrolys uppstår utöver vätgas och syrgas, även en del termisk värme. Denna värme kan tas om hand för att värma upp byggnaden alternativt varmvatten. Sedan när el produceras med hjälp av bränsleceller uppstår även här en del termisk värme som kan tas om hand för att värma upp huset. Mer info under rubriken "vätgas".

3 Tekniska lösningar

3.1 Elproduktion och förnybara energikällor

El är något som många i Sverige tar för givet. Det är viktigt att komma ihåg att elen som förbrukas när en lampa tänds måste produceras momentant. Det är samtidigt viktigt att produktion och konsumtion är ungefär lika stor (Svenska Kraftnät, 2019).

Beroende på hur elen produceras kan den klassas inom olika kategorier beroende på miljöpåverkan. De vanligaste kategorierna är om elen klassas som förnybar eller icke förnybar samt fossilfri eller inte. Till förnybar el tillhör den el som inte förbrukar resurser vid själva elproduktionen så som sol, vind, vatten samt biobränslen. (Vattenfall, 2019). För fossilfri elproduktion tillkommer förutom den förnybara elen även den el som kommer från fossilfria källor. Till fossilfria källor är det främst kärnkraft som tillkommer. El från dessa förnyelsebara källor brukar även kallas för grön el, och huruvida kärnkraft tillhör denna gröna el, råder det delade meningar om. Generellt släpper Sveriges elproduktion ut väldigt lite koldioxid i förhållande till andra länder. Enligt Energimyndigheten beräknas svensk elmix släppa ut ca 47 g CO₂e/kWh (Energimyndigheten, 2014). Den nordisk elmixen ligger på 125 g CO₂e/kWh (Naturvårdsverket, 2021).

För att minska klimatutsläppen i elproduktionen satsas just nu väldigt mycket på framförallt vind- och solenergi, vilka är oplanerbara energikällor. Med kärnkraft, värmekraft samt vattenkraft kan man planera hur mycket el som ska produceras vid en viss tidpunkt, vilket gör att dessa ingår i den planerade elproduktionen. För att elproduktionen ska matcha konsumtionen under dygnets alla timmar året runt så krävs en viss mängd planerbar produktion, i Sverige är det framförallt vattenkraften i Norrland som står för denna effektbalans, genom att minska produktionen när vindkraftverken och solcellerna producerar mycket el, och sedan öka produktionen när det inte blåser.

Spotpriset, som är en del av elpriset, bestäms timme för timme där priset främst beror på förväntad skillnad mellan produktion och konsumtion. Är det risk för elunderskott (högre konsumtion än produktion) så ökar priserna, medan om det är risk för överskott så sjunker priserna. Under 2020 hade Sverige en sådan produktion att elpriset var negativt totalt 10 timmar fördelat på tre tillfällen (10 februari, 2 november samt 27 december). Detta på grund av att det var blåsigt i hela landet vilket skapade en högre elproduktion än vad som efterfrågades. Då elpriset var negativt fick alltså elproducenterna betala för att skicka ut el i elnätet. Den 12 februari var spotpriset i södra Sverige uppe i 2,5 kr/kWh. Detta visar att elpriset kan variera väldigt mycket vilket skapar en osäkerhet för elkonsumenterna. (Nord Pool, 2021)

Genom att lagra elen när spotpriset är lågt kan till exempel vindkraftsägaren lagra sin egenproducerade el och sedan sälja elen när efterfrågan ökar. När efterfrågan ökar, ökar även spotpriset och därmed kan ägaren optimera sin avkastning. Mer om lagring i batterier och vätgas finns under dessa rubriker.

Elprisets uppbyggnad

Elpriset består främst av två delar, en för anslutningen till elnätet och en för elhandeln. Den så kallade elnätsdelen är för att få tillgång till elnätet och består oftast av en fast del som främst är beroende på storleken på huvudsäkring, medan den rörliga delen består av dels en överföringsavgift och energiskatt. Den rörliga delen är en förbestämd summa (öre/kWh) och uppdateras oftast på årsbasis. Elnätsabonnemanget är inget som kan förhandlas utan den ska betalas till det företag som äger det lokala elnätet. 25 % moms tillkommer på både fasta och rörliga delen (Energimarknadsbyrån, 2020).

Elhandelsdelen är den delen av elpriset som kan förhandlas och konsumenten väljer själv vilket företag som elen ska köpas från. Den delen består också oftast av en fast del i form av månadsavgift samt en rörlig del bestående av bland annat spotpriset, elcertifikatsavgift och eventuella påslag. Den rörliga delen kan utformas på flera olika sätt beroende på vilken risk gällande pris som kunden vill ta. Dels kan ett "fast pris" bestämmas i förväg vilket betyder att kunden betalar ett förbestämt pris per enhet el. "Rörligt pris" kan antingen sättas på dygns- eller timbasis och där beror priset på spotpriset som sätts på Nord Pool (Nord Pool, 2021), där priset sätts varje timme beroende på förhållandet mellan utbud och efterfrågan. 25% moms tillkommer på både fasta och rörliga delen.

Totalt sett betalar hushållskunder som bor i lägenheter som har en årlig elförbrukning på 1 000 – 5 000 kWh/år mellan 2 - 2,5 kr/kWh i snitt för sin el (SCB, 2020). Då en stor del av kostnaden är fast del oavsett förbrukning ligger marginalkostnaden per kWh generellt sett lägre än detta. Anslutningsavgiften till elnätet kan ses i Tabell 10 (Kraftringen, 2021).

Tabell 10. Anslutningsavgift till elnätet

Säkring [A]	Zon 1 [0-200 m]	Zon 2 [200-600 m]	Zon 3 [600-1200 m]
35 - 65	39 000 kr	39 000 kr + 253 kr/m	Offert
80 -125	57 500 kr	Offert	

3.1.1 Solenergi

De självklara fördelarna med solenergi är att det är en förnybar energikälla, den kommer aldrig att ta slut. Att producera värme och el med hjälp av solen ger inte heller några utsläpp till miljön vid drift. Privatpersoner kan producera sol-el med hjälp av solceller, vilket gör att de får en bättre kontroll över elpriset och är mindre beroende av elprisets svängningar. En solig dag kan leda till överskottsel, vilket innebär att personen i fråga kan sälja den energin som inte används. Solpaneler är i princip underhållsfria. Växelriktaren är den komponent som behöver underhållas med jämna mellanrum. (Vattenfall, 2020)

Solcellens ovansida blir negativt laddad när solen lyser. Undersidan av solcellen blir då positivt laddad och en likström bildas. Växelriktaren i solcellen omvandlar likströmmen till växelström, vilket gör att elen går att bruka. En solpanel består av 60 stycken solcellsmoduler. En genomsnittsanläggning på cirka 25 solcellspaneler, vilket motsvarar 43 m², kan producera 6 200 kWh på ett år (Fortum, 2020). Toppeffekt är något som ofta

nämns i samband med solceller och benämns kWp. Toppeffekt är den effekt som en solpanel genererar under ”standard test conditions”, STC (Hemsol, 2020). En solpanel genererar för det mesta lägre än vad toppeffekten anger, eftersom verkligheten oftast inte stämmer överens med de standardiserade förhållandena.

Det finns integrerade och fristående solceller. De fristående solcellerna är den traditionella lösningen och även den mest beprövade. Den här lösningen är också den billigaste. Med fristående menas det att solpanelerna sitter monterade ovanpå takpannorna. Ett soltak, eller integrerade solceller som det också kallas, innebär att solcellerna är integrerade i takpannorna. Många menar att den här lösningen är estetiskt snyggare än den traditionella lösningen med fristående solceller. Integrerade solceller är i jämförelse med de fristående solcellerna en relativt ny lösning med den senaste tekniken och därmed inte lika beprövad. Dessutom är den här lösningen betydligt dyrare (Hemsol, 2020).

Det finns också olika solcellsvarianter. Den absolut vanligaste är kristallina kiselceller och dessa utgör cirka 95 % av alla solceller i hela världen (Solkompaniet, 2020). De kristallina kiselcellerna delas i sin tur upp i polykristallina respektive monokristallina, där de monokristallina förväntas att bli dominerade på grund av bättre teknik. Ett annat alternativ på solceller är tunnfilmceller, där den egentliga fördelen är att de kan fästas på både hårda och böjliga material. De är dyrare per installerad kilowatt, men billigare per kvadratmeter än de kristallina kiselcellerna. Verkningsgraden är också sämre, men de påverkas inte lika mycket av höga temperaturer och skuggning.

Solen ger inte bara möjlighet att producera el, utan även värme. Detta görs med hjälp av en solfångare. Inuti solfångaren finns ett medium, oftast luft eller vatten. Mediet värms upp och pumpas in i huset där värmen avges. Slutligen pumpas mediet tillbaka ut till solfångaren igen. Värmen som utvinns från solfångarna kan användas för att värma upp vatten som går till tappvarmvatten eller till element. (Naturskyddsföreningen, 2020). Det finns också hybridsolceller som kan kombinera solceller och solfångare. Till skillnad från en vanlig solcell, så har en hybridsolcell en vätskekyld baksida. Vid en kylning ökar man effekten och får därmed ut mer ström. Den värmen som leds bort används för bland annat att värma upp tappvarmvattnet. Vid ökad temperatur tappar solcellerna effekt, och därför fungerar metoden med kylning bra. (Free Energy, 2020)

Koldioxidekvivalenterna för solceller anses vara mellan 28 och 35 g CO₂e/kWh. Utsläppen sker främst vid tillverkning och transport, men ur ett livscykelperspektiv kan de totala utsläppen fördelas jämt över den förväntade producerade elen. (Naturskyddsföreningen, 2020)

3.1.2 Vindkraft

Ett vindkraftverk har tre blad, som tillsammans bildar en rotor. Rotorn sitter på en axel, som i sin tur är kopplad till en generator. Vindkraftverken är direkt kopplade till elnätet och kan leverera ut ström så länge den fortfarande snurrar. Hur mycket el ett vindkraftverk producerar per år beror inte bara på storleken, utan även var den är placerad. Dagens vindkraftverk kan börja producera el från det att vinden blåser 4 m/s

upp till 25 m/s. Vid högre vindhastigheter än 25 m/s stannar kraftverket och stänger av sig själv av säkerhetsskäl. Den optimala vindhastigheten då vindkraftverket kan producera som mest energi är omkring 13 m/s. (Vattenfall, 2019). För att ta fram förväntad årsproduktion beräknas vindkraftverkens kapacitetsfaktor. Det vill säga hur många timmar ekvivalent fullasttid som vindkraftverket snurrar över ett år. I Sverige har de flesta moderna vindkraftverk en kapacitetsfaktor på ca 35 %, vilket motsvarar att vindkraftverket producerar lika mycket el som att det skulle producera sin totala kapacitet under 35 % av årets timmar. I verkligheten levererar sällan ett vindkraftverk hela sin kapacitet. Många moderna vindkraftverk producerar el upp till 8 000 timmar per år vilket motsvarar en drifttid på ca 90 %, men då utan att producera maximalt. (Västra Götalandsregionen, 2017)

Det finns tre punkter som ska tas i beaktande när ett vindkraftverk ska byggas. Det första är att välja en plats där det blåser jämnt över året. Det andra är att välja en plats som inte stör människan, eftersom vindkraftverk bullrar en hel del. Den sista punkten är att se över så att inga hotade arter påverkas. Man ska till exempel inte placera ett vindkraftverk där flyttfåglar brukar passera, då finns det risk att de kolliderar med kraftverket. För att få bygga ett vindkraftverk överhuvudtaget krävs ett miljötillstånd. Detta är omfattande och det är långt ifrån alla projekt som utreds som faktiskt blir av. Försvaret har även sagt nej till vindkraftverk längst stora delar av kusten, eftersom de 200 meter höga pelarna kan vara i vägen för ett militärt flyg.

Gårdskraftverk

Vindkraftsverk med en höjd på 20-50 meter eller där rotordiametern överstiger tre meter, kallas för gårdsverk (Energimyndigheten, 2020). Vidare får rotorarean maximalt vara 200 m². För att få sätta upp ett gårdsverk krävs bygglov och detta handläggs av kommunens byggnadsnämnd. Ett gårdsverk får placeras på ett avstånd lika med dess egen höjd från fastighetsgränsen samt ha fritt vindläge i framförallt väst-sydvästlig riktning. Ett gårdsverk används för eget bruk. Ett gårdsverk är inte anmälningspliktigt enligt miljöbalken, däremot krävs en anmälan om tanken är att uppföra mer än ett gårdsverk. (WindEn, 2020)

3.1.3 Biobränsle

Biobränsle är energi som hämtas från växtriket och det är fotosyntesen som gör det möjligt för växterna att kemiskt lagra solenergin. När växterna förbränns, så kan energin utnyttjas. Restprodukter från skogsindustrin är ett exempel på en av de saker som tas tillvara på när man gör biobränsle. Även matavfall och andra organiska avfall används för detta. Biobränsle räknas som en koldioxidneutral energikälla, eftersom naturen binder koldioxid och därför kompenserar för de koldioxidutsläpp som sker vid förbränningen. (WWF, 2020)

Fossila bränslen utnyttjar, precis som biobränsle, kemiskt bunden solenergi. Men till skillnad från biobränsle, tar det miljontals år för fossila bränslen att nybildas. Därför räknas fossila bränslen som en icke-förnybar energikälla, medan biobränsle räknas som förnybar.

Biobränsle förekommer både i fast, flytande och gasform. Trä och andra avfall räknas till fast biobränsle. Bland annat bioetanol tillhör flytande biobränsle och biogas är, som namnet säger, biobränsle i gasform. Biogas uppkommer när organismer bryter ner organiskt avfall. Samtidigt som organismerna bryter ner biobränslet, bildas gas som sedan kan användas som bränsle till exempelvis fordon. (Solör Bioenergi, 2020)

3.1.4 Vattenkraft

Vattenkraft innebär kortfattat att vatten forsar genom en turbin och på så sätt genereras el. I Sverige producerar vattenkraften mellan 50 - 75 TWh per år. Till skillnad från sol och vind, är vattenkraft mer reglerbar och kan därför fungera som en reservkraft (Naturskyddsföreningen, 2020). Anledningen är att det oftast byggs dammar, dels för att öka fallhöjden (därmed öka den potentiella energin) och dels för att kunna lagra vatten. Dammarna skapar vattenmagasin som sedan kan utnyttjas när det råder effektbrist (Jämtkraft, 2020). Vattenkraft har dock en negativ effekt på de akvatiska ekosystemen i Sverige och endast 2 % av vattenkraftverken har miljöanpassat sitt arbete (Naturskyddsföreningen, 2020). Detta innebär att hänsyn behöver tas för att inte skada det lokala ekosystemet. Under själva elproduktionen sker inga utsläpp av miljöskadliga ämnen då vatten endast forsar genom en turbin.

3.2 Vad är elbrist, effektbrist och kapacitetsbrist

När det kommer till el och elförsörjning så finns där en hel del begrepp som är viktiga att kunna och som är enkla att blanda ihop.

På media kan man ibland se rubriker som "Elbrist i södra Sverige är en väckarklocka" (Uniper, 2020). Dessa rubriker är missvisande, eftersom det inte alls råder någon elbrist i Sverige. Sol, vind och vatten är oändliga energikällor och faktum är att Sverige år 2019 nettoexporterade hela 25,8 TWh el till andra länder (Energiföretagen, 2020). Det som medierna menar när de skriver att "Sverige har elbrist" är så kallad effektbrist. Effektbrist uppstår när efterfrågan på el vid en viss tidpunkt är större än vad utbudet är. Dvs att det inte tillverkas tillräckligt mycket el när den väl behövs. Sannolikheten att effektbrist ska inträffa är ganska låg och det krävs att en del saker sammanträffar. Effektbrist kan till exempel ske när det är extremt kallt ute och vindstilla i större delar av Sverige. Ett annat exempel kan vara om grannländerna inte har tillräckligt med produktionsöverskott, vilket kan leda till att importen av el blir lidande och därmed skapar effektbrist i Sverige. Under vintern 2018 låg Sverige precis på gränsen för vad systemet kunde klara av att leverera. (Ellevio, 2019)

Kapacitetsbrist innebär att de befintliga kraftledningarna inte kan leverera så mycket el som behovet kräver. Risken för kapacitetsbrist ökar när städer växer och samhället utvecklas. Elbilar är bara ett exempel på en sådan produkt som blir allt vanligare, och som gör att elnätet blir mer belastat än tidigare. Kapacitetsbristen i Sverige ligger framförallt i stamnätet, men det kan även förekomma i region- och lokalnät.

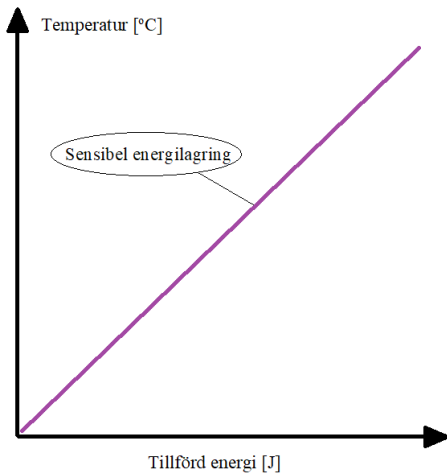
3.3 Lagring av termisk energi

Termisk energi, eller värmeenergi som man också säger, är den energi som finns lagrad i de ordnade rörelserna hos en atom eller molekyl i ett objekt (Jernkontoret, 2020). Värmeenergi kan transporteras genom ledning, konvektion och strålning. Ledning sker i alla aggregationstillstånd och innebär att ett medium överför värme till närliggande partiklar som inte har lika hög temperatur och därmed utjämna temperaturskillnaderna. Konvektion sker när en gas eller vätska strömmar medan strålning är den energi som överförs utan hjälp från något medium.

Att lagra värmeenergi under lång tid är svårt, men inte omöjligt. Lagring av värmeenergi delas vanligtvis in i tre stycken huvudgrupper, nämligen sensibel värmelagring, latent värmelagring och kemisk värmelagring (Jernkontoret, 2020). I följande avsnitt ska varje huvudgrupp beskrivas mer ingående samt ge exempel på olika lagringsmetoder.

3.3.1 Sensibel värmelagring

Sensibel lagring innebär att ett medium ändrar temperatur utan att ändra aggregationstillstånd och mediet väljs beroende på lagringstemperatur. Mediet bör ha hög värmekapacitivitet för att kunna minimera lagringsvolymen. För det mesta används vatten, men om temperaturerna överstiger 540 °C används blandningar av smält salt och om temperaturen närmar sig 1 000 °C kan eldfasta stenar användas som ett alternativ (Jernkontoret, 2020). Sensibel värmelagring är vanligast idag och oftast används icke-trycksatta ackumulatortankar med varmvatten. Exempel på sensibel värmelagring är solvärt vatten, borrhållager och vattenfyllda bergrum. Förhållandet mellan tillförd energi och temperatur för sensibel lagring kan åskådliggöras i diagrammet nedan, se Figur 4.

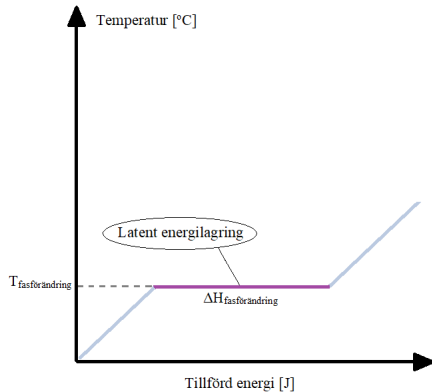


Figur 4. Förhållandet mellan tillförd energi och temperatur för sensibel energilagring

3.3.2 Latent värmelagring

Latent lagring innebär att mediet ändrar aggregationstillstånd, både under laddning och under urladdning (Energiforsk, 2019). Till skillnad från sensibel lagring, så ändrar

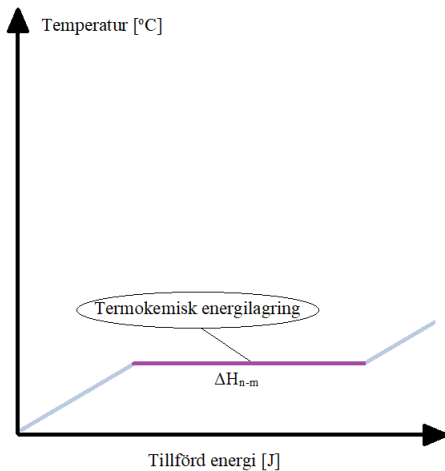
mediet i latent lagring knappt temperatur. Energin som används kommer från fasomvandlingarna. Latent energilagring är under utveckling och de medier som används till största delen är organiska paraffiner, salter och salhydrater. Värmelagring av den här typen kan lagra 5 - 14 gånger mer energi per volymenhet än sensibel värmelagring och därför lämpar det sig främst vid hög energidensitet eller litet lagringsutrymme (Jernkontoret, 2020). Det går också bra att kyla med latent värmelagring, till exempel att spara is under vintern för att kyla under sommaren. I Figur 5 nedan kan förhållandet mellan temperatur och tillförd energi att ses för latent lagring.



Figur 5. Förhållandet mellan tillförd energi och temperatur för latent energilagring

3.3.3 Kemisk värmelagring

Kemisk lagring innebär att energin upptas genom kemiska reaktioner. Under laddningssteget används termisk energi för att separera ämnen via en endotermisk reaktion. Så länge man avser att lagra energin, hålls ämnena separerade. När de sedan sammanförs sker en exoterm reaktion vilket innebär att termisk energi frigörs (Energiforsk, 2019). I nuläget finns det inga metoder som gör den här typen av värmelagring kostnadseffektiv (Jernkontoret, 2020). Förhållandet mellan tillförd energi och temperatur kan ses i Figur 6. Ett exempel på kemisk värmelagring är att lagra energi i salt. Företag som bland annat SaltX Technology arbetar med att utveckla den här metoden. Mer information kring värmelagring med hjälp av salt finns under rubriken SaltX.



Figur 6. Förhållandet mellan tillförd energi och temperatur för termokemisk energilagring

3.4 Lagring av energi

Då andelen icke planerbar elproduktion ökar i form av sol- och vindkraft ökar också lagringsbehovet för att kunna nyttja den el som produceras. I Sverige är idag de vanligaste lagringsteknikerna pumpvattenkraft, batterier, tryckluft och svänghjulslagring, där vissa passar bättre som lagring under kort tid och andra över längre tid (IVA, 2015). Tabell 11 är en sammanfattning över vanliga lagringsmetoder och under kommande rubriker beskrivs dessa samt några mer ovanliga lagringsmetoder mer ingående.

Tabell 11. Sammanfattning av vanliga lagringsmetoder

Energilagringsslag	Kapacitet [MW]	Användningstid	Verkningsgrad [%]	Start-upp tid
Superkondensatorer	0,01 - 1	ms - s	95	ms
Supraledare	0,001 - 10	s	90	ms
Tryckluftsteknik	Beroende på lagringsstorlek	1 - 24 h	42 - 54 (vanlig) 70 (avancerad adiabatisk)	min
Svänghjul	0,002 - 20	s - min	95	s - min
Pumpkraftverk	< 5000	1 - 24 h	65 - 85	s - min
Litiumbaserade batterier	0,001 - 0,1	min - h	85 - 100	-
Vätgas, H ₂ (el-vätgas)	kW - GW	s - månader	62 - 82	s - min

3.4.1 Superkondensatorer

En superkondensator består väldigt enkelt av två elektriskt ledande plattor med ett isolerande skikt i mellan. Det isolerande lagret kallas för dielektrikum. När en ström tillsätts över ledarna polariseras dielektrikumet i skiktet och på så sätt kan energin lagras där. Hur mycket som kan lagras beror helt på spänningen, kondensatorns area och avståndet mellan plattorna. Till skillnad från ett batteri kan en superkondensator laddas och urladdas tusentals gånger utan att prestandan försämras. Superkondensatorer har en

lagringseffekt på cirka 85 - 98 % och har dessutom snabba laddnings- och urladdningstider (Jernkontoret, 2020).

3.4.2 Supraleutare

En supraleutare lagrar elektrisk energi i ett magnetfält. Själva supraleutaren är ett material som vid en viss kritisk temperatur har oändlig elektrisk ledningsförmåga, det vill säga att en ström kan flyta i materialet utan något motstånd alls. Resistans gör till exempel att lite energi försvinner i form av värme. Den kritiska temperaturen är oftast väldigt låg. Magnetfältet kan inte heller tränga in i supraleutaren och detta kallas för Meissnereffekten. Avsaknaden av elektriskt motstånd och Meissnereffekten är krav för att något ska få kallas för supraleutare. De material som oftast används som supraleutare är rena metaller, såsom bly eller tenn. För att höja den kritiska temperaturen, som annars blir väldigt låg, används oftast legeringar. Dessa är dock svåra att forma i nuläget, eftersom de är spröda och inte tål höga magnetfält samt stor strömtäthet. Det vanligaste kylmedlet för supraleutare är flytande kväve. Dagens kylanläggningar är inte optimala, och det är först när dessa blir mindre, billigare och mer effektiva som supraleutare kan slå igenom på riktigt.

Idag används Supraleutare framförallt inom sjukvården, vid till exempel resonansavbildning (MRI). Tekniken används också till känsliga sensorer, partikelacceleratorer och för att förbättra radiokommunikation.

Magnetdrivna tåg blir möjligt med hjälp av supraleutare och tack vare Meissnereffekten kan tåget sväva ovanför rälsen och på sätt göra en resa mer bekväm. Verkliga exempel på detta går att hitta i bland annat Japan, där ett forskningsprojekt skapade ett tåg med en tåghastighet som uppgick till 350 km/h.

Framtidens stora projekt är att hitta supraleutare som fungerar vid rumstemperatur, där kylning inte behöver vara en så stor del. Forskare försöker även att hitta supraleudande material som kan formas till en tråd. Tunna, supraleudande trådar skulle kunna skapa mindre och energisnålare elmotorer (Bertilsson, 1999).

3.4.3 Komprimerad luft

Luft samlas i en reservoar med hjälp av en kompressor som drivs av den energi som ska lagras. Den komprimerade luften får sedan, när den behövs, driva en turbin som i sin tur genererar el. Luften kan lagras i till exempel en tryckbehållare eller bergrum (Jernkontoret, 2020).

Ett problem med den här typen av lagringssystem är att en hel del energi går åt till värme vid själva komprimeringen. Idag finns det bara ett fåtal anläggningar som klarar av att lagra energi i form av tryckluft och tekniken är fortfarande allt för avancerad för att kunna nyttja i stor skala (Ny Teknik, 2019).

3.4.4 Svänghjul

Metoden att lagra kinetisk energi med hjälp av svänghjul är en avancerad teknik (Göteborgs Energi, 2020). Ett hjul sätts i rörelse av överskottsenergi från till exempel solen. Tack vare en generator som drivs av hjulet kan el produceras. Eftersom hjulet är mekaniskt, är systemet känsligt för påverkan. För att minska friktionen bör hjulet vara magnetiskt upphängt i vakuum. Verkningsgraden för svänghjul kan ligga uppemot 90 % och mängden energi som bevaras beror på konstruktionens massa och form samt hastigheten (Jernkontoret, 2020). Att lagra energi med hjälp av svänghjul lämpar sig främst åt korttidslagring. Ibland får man inte använda batterier på grund av säkerhetsskäl, och då kan svänghjul vara ett alternativ.

3.4.5 Pumpkraftverk

Tekniken bakom ett pumpkraftverk är väldigt enkel. Vatten pumpas upp från en lägre reservoar till en högre. När vattnet sedan släpps ner via en vattenturbin kan lägesenergin omvandlas till elektrisk energi. Verkningsgraden för ett pumpkraftverk ligger idag någonstans mellan 70 - 80 % (Jernkontoret, 2020). Pumpkraftverk är en väletablerad teknik som lämpar sig åt storskalig lagring och det finns ännu inte implementerat i småskaliga lösningar (IVA, 2015). Traditionella vatten- och pumpkraftsanläggningar påverkar djur- och växtliv samt landskapet ur ett negativt perspektiv och det finns ett begränsat antal platser kvar i Europa som är lämpliga för just detta lagringssystem. Det finns tre olika typer av pumpkraftverk (Rensfeldt, 2017). Det första är integrerade pumpkraftverk, vilket innebär att kraftverket är integrerat i det naturliga systemet. Till exempel att det undre och övre magasinet tillhör samma vattendrag. Det andra systemet är anslutna pumpkraftverk. Anslutna pumpkraftverk är i någon ände anslutna till ett naturligt vattensystem. Slutligen finns fristående pumpkraftverk. Ett fristående pumpkraftverk är inte alls anslutet till något naturligt system. Exempel kan vara underjordiska pumpkraftverk.

3.4.6 Bergrum

Att lagra värme med hjälp av bergrum är relativt nytt. Praktiskt innebär detta att bergrummet agerar som en ackumulatortank, eller en jättestor termos.

I Hudiksvall finns en sådan här värmelagringslösning. Nära kraftvärmeverket ligger två bergrum, 25 meter höga och hela 200 meter långa. Ett av bergmagasinen är till för hetvatten, medan den andra är till för kallvatten. Det kalla magasinet fylls på med 45 gradigt varmt vatten, som sedan pumpas vidare till det varma magasinet via en värmeväxlare som då höjer vattentemperaturen till 95 °C. I det varma magasinet förvaras sedan det varma vattnet tills det finns behov av det. När det är dags att användas pumpas vattnet återigen tillbaka till det kalla magasinet, och värmeväxlaren tar tillvara på energin (Värmevärden, 2020).

3.4.7 SaltX

Det finns flera olika sätt att försöka lagra energi och det svenska företaget SaltX Technology har utvecklat ett sätt att lagra energi med hjälp av vanligt salt (Vattenfall,

2020). Hela tekniken baseras på en enkel, kemisk reaktion. När torrt salt (kalciumoxid) blandas med vatten omvandlas saltet till kalciumhydroxid. Vattnet startar alltså en kemisk process, och denna process producerar värme. Om vatten istället ersätts med vattenånga, blir processen mer effektiv och producerar mer värme. Med hjälp av vatten kan temperaturen komma upp till ungefär 120 °C, medan vattenånga kan höja temperaturen till hela 500 °C. Den varma ångan kan sedan transporteras ut i fjärrvärmenätet eller ledas genom en turbin för att på så sätt producera el. Med hjälp av överskottsel kan det nu fuktiga saltet åter torkas och processen kan upprepas.

Att lagra energi i salt har länge varit känt. Ett av de stora problemen med att lagra energi i salt är att partiklarna klumpar ihop sig i samband med i- eller urladdning. Detta gör att systemet får en sämre utväxling. Genom att tillföra till exempel en kalkblandning till saltet kan man dock få en effektivare lagringsmetod. I skrivande stund satsas det på storskalig lagring, bland annat till industrier.

År 2017 började SaltX ett pilotprojekt i Berlin tillsammans med vattenfall (SaltX, 2019). Projektet innebär en storskalig lagring av energi med SaltX egna nano-coatat salt (NCS). Invigningen av anläggningen skedde i april år 2019 och resultatet efter första rundan var tillfredsställande.

3.4.8 Batteri

Batterier kan lagra elektrisk energi i elektrokemisk form. Batterier är en väletablerad lagringsmetod och används i allt från ficklampor till fordon och reservkraft till byggnader. Mer info om batterier finns i 3.5 Batterier.

3.4.9 Vätgas

Energi kan lagras i form av vätgas. Vätgasens energidensitet är relativt hög, medan volymdensiteten är väldigt låg. Detta medför att gasen antingen behöver kylas ner eller komprimeras i högt tryck för att uppnå hög energilagring till relativt litet utrymme. Vätgas klassas som en högexplosiv gas och hanteras i dagsläget främst som råvara inom industrin. Mer info under 3.6 Vätgas.

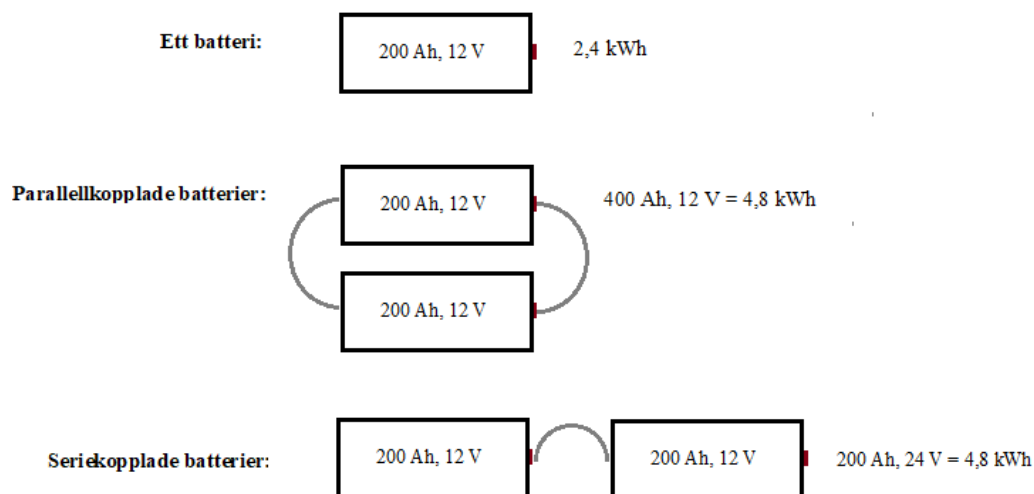
3.5 Batterier

Batteri lagrar elektrisk energi i elektrokemisk form. Ett batteri har två poler, där den ena sidan är negativt laddad på grund av ett elektronöverskott och kallas katod. Den positiva sidan kallas anod. De två polerna är separerade av en elektrolyt och elektrolyten kan variera beroende på vilket typ av batteri det är. När batteriet kopplas in till en apparat, sluts kretsen och elektronerna kan flöda fritt från katoden till anoden och ström bildas. När obalansen är utjämnad är batteriet förbrukat och det måste antingen återvinnas eller laddas upp. Det finns alltså två stycken olika typer av batterier och de delas upp som primära och sekundära batterier. De primära batterierna är de så kallade engångsbatterierna, de som inte är laddningsbara, medan de sekundära går att ladda upp. De vanligaste primära batterierna är Brunsten, Alkaliska, Nickel oxyhydroxid,

Silveroxid, Kvicksilveroxid, Zink-luft och Litium. Bland de sekundära batterierna är Nickel kadmium (NiCd), Nickel Metallhydrid (NiMH), Blyoxid, Litiumjon (Li-ion) och Litium polymer (Li-pe) vanligast. Under senare år har olika typer av litiumbaserade batterier tagit mer och mer marknadsandelar och är numera det som används i de flesta fallen, detta tack vare hög cellspänning och bättre energidensitet än de andra (Sundén, 2019)

Det här examensarbetet kommer inte att gå in mer ingående på engångsbatterier, eftersom de inte är lämpliga för att lagra energi till ett helt hus. I resterande del av examensarbetet benämns sekundära batterier endast som batterier.

Beroende på vilka metaller som används i batteriet så blir spänningen olika. Spänningen blir ett mått på hur väl de kemiska reaktionerna uppstår, till exempel ligger den nominella spänningen hos Li-ion-batterier på ca 3,7 V jämfört med NiMH-batterier som ligger på 1,2 V. För att få fram önskad spänning kan man välja att parallellkoppla eller seriekoppla ett visst antal celler. Genom att parallellkoppla förblir spänningen densamma medan vid seriekopplingen ökar spänningen. Se Figur 7.



Figur 7. Hur spänning och ström summeras vid serie- respektive parallellkoppling

Memory effect

Memory effect, eller minneseffekten är ett problem som kan uppstå hos vissa batterityper när batteriet inte får laddas ur och laddas upp ordentligt, utan "småladdas" hela tiden. Med minneseffekt menas att om batteriet börjar laddas vid SOC 50% så börjar batteriet så småningom tro att det är urladdat när den närmar sig 50%. Detta beror på att en kemisk process bildar stora kristaller på elektroderna vilket minskar möjligheten till kemisk reaktion och därmed överföring av elektricitet. För att bli av med kristallerna behöver batteriet laddas ur ordentligt och sedan laddas upp ordentligt flera gånger. NiCd-batterier har en rätt tydlig minneseffekt, även NiMH-batterier påvisar detta, Li-ion-batterier har visat tendens till minneseffekt men inte i speciellt stor grad. Det är bland annat på grund av minneseffekten man brukar rekommendera att batteriet ska laddas ur

ordentligt innan man laddar upp den. För att undvika minneseffekt rekommenderas NiCd-batterier att laddas ur ordentligt en gång varje månad och NiMH-batterier var tredje månad (Sundén, 2019)

C-rate

C-rate är ett mått på hur snabbt batteriet laddas ur, där 1 C motsvarar att batteriet laddas ur på en timme. Ju högre C-värde desto snabbare laddas batteriet ut, dvs 2 C motsvarar 30 min och 0,5 C motsvarar 2 timmar. Tabell 12 visar C-rate i förhållande till ström och tid. Detta används ofta för att beskriva hur högt effektuttag ett batteri klarar av innan det riskerar att skadas (Sundén, 2019).

Tabell 12. C-rate

C-rate	Ström (Ampere)	Tid
5C	40	12 min
2C	16	30 min
1C	8	1 h
0,5C (eller C/2)	4	2 h
0,2C (eller C/5)	1,6	5 h
0,1C (eller C/10)	0,8	10 h
0,05C (eller C/20)	0,4	20 h

Batteriers funktion i olika temperaturer

Vid låga temperaturer rör sig elektronerna långsammare, och batteriet tappar därmed spänning vilket leder till tillfälligt försämrade kapacitet (If, 2021). Däremot minskar självurladdningen vid svalare temperaturer. Vid varmare temperatur ökar däremot självurladdningen och om väldigt höga temperaturer uppstår riskeras termisk rusning vilket kan orsaka brand och skada (Sundén, 2019).

Batteriets livslängd

Livslängden på ett sekundärt batteri brukar anges i cykler, det vill säga hur många gånger det kan laddas upp innan det anses förbrukat. Definitionen av att ett batteri anses förbrukat brukar vara när kapaciteten är under 60 – 80 % jämfört med när batteriet var nytt (If, 2021). Trots den bestämda livslängden, är en del batterier inte helt underhållsfria, t.ex kan ett blybatteri behöva en vattenpåfyllnad efter en tids användning för att fortsätta fungera. Hur många cykler ett batteri klarar av är olika. Ett batteri i en mobiltelefon bör klara mellan 500 och 700 cykler, medan ett elbilsbatteri ska klara uppemot 5 000 cykler. Det som påverkar antalet cykler är bland annat vilka mineraler som används, uppladdningsdjup, laddnings- och urladdningsprofil och temperatur. Urladdningsdjupet innebär enkelt sagt att ett batteri aldrig ska laddas ur helt eftersom det sliter väldigt mycket på batteriet, och för det mesta begränsas djupet till 80 %. Höga strömmar påverkar livslängden negativt. Vid förhöjd temperatur sker reaktionerna i batteriet snabbare och dess kapacitet ökar, men om maxtemperaturen överskrids skadas istället cellen och livslängden minskar. Låga temperaturer däremot gör att reaktionerna i batteriet går långsammare, vilket innebär kapaciteten istället minskar. Ett litiumbaserat batteri bör till exempel inte laddas under minusgrader eftersom cellen kan förstöras av det.

Beroende på batteriets ändamål har olika typer av batterier sina respektive fördelar, till exempel behöver fordonsbatterier klara höga och varierande effektuttag (C-rate) då fordonet ofta accelererar/retarderar och sällan håller jämnt effekt, medan batterier till ett hushåll har ofta en jämnare baslast med mindre effektvariationer. Detta gör att för bilbatterier är prioriteringen att klara effektvariationen och flera småladdningar framför maximal livslängd. Medan för bostäder som har en jämnare baslast och små effektvariationer är prioriteringen antal laddcykler och därmed livslängden samt säkerhet.

Miljöaspekter

Enligt svenska miljöinstitutet (Svenska miljöinstitutet, 2020) släpps det ut mellan 61 – 146 kg koldioxidekvivalenter per producerad kWh Li-ion-batterier. Den breda variationen beror mycket på hur ren elen som används är samt vilket produktions sätt som används.

Beroende på batteriets egenskaper kan olika material användas, men till de vanligaste litiumjon-batterierna används bland annat ädelmetallerna litium och kobolt. Enligt SGU utvinns nästan två tredjedelar av all världens kobolt i Kongo där mycket av denna gruvbrytning sker för hand och det har framkommit brott mot mänskliga rättigheter och barnarbete vid många av gruvorna. Då Kina äger de flesta gruvorna i Kongo, och det är även dit malmen skickas, så är det svårt att spåra ursprunget och om framställningen skett på rättvisa villkor för arbetarna (SGU, 2018)

Ett förbrukat litiumbaserat batteri går både att återvinna såväl som återbruka. Enligt energimyndigheten (2019) finns det omkring 50 återvinningscentraler för litiumbaserade batterier runt om i världen, där de flesta hittas i Kina. Återvinningen i Sverige har inte kommit igång, trots att det finns ett antal moderna processer i Europa. Ny Teknik (2019) menar att detta beror på att det inte finns tillräckligt med litiumbaserade batterier att återvinna än. Runt år 2025 - 2030 kommer det finnas fler batterier från bilar som inte längre kan användas.

Användning av batterier

En fördel med batterier är den snabba svarstiden. När el behövs kan ett batterilagringssystem svara på mindre än 0,1 sekunder och ge full effekt inom 0,2 sekunder vilket är väldigt snabbt och även ett krav för elförsörjning i större skala då elen måste produceras momentant som den förbrukas (Power Circle, 2020)

På grund av att det i dagsläget är svårt att återvinna förbrukade batterier pågår mycket forskning kring hur framförallt använda elbilsbatterier ska hanteras. I många projekt testas dessa batterier inom stationär lagring, till exempel som reservkraft till elnätet eller till enskilda fastigheter.

Verkningsgrad

Enligt Teslas hemsida (2021) har deras batterilagringssystem Tesla Powerpack en verkningsgrad på ca 90 % och enligt Jernkontorets energihandbok (2020) ligger litiumbaserade batterier på en verkningsgrad omkring 90 %.

Självladdning

Enligt Bengt Sundén (2019) sker det en konstant självladdning. Detta innebär att ett batteri tappar sin laddning över tid trots att det inte används. Temperatur, eventuellt smuts och SOC är några aspekter som påverkar självladdningen. NiMH-batterier är kända för att ha en hög självladdning med upp till 30 % per månad. Litiumbaserade batterier kan ha en självladdning på upp till 5 % per månad.

Kostnad

Enligt en rapport från Powercircle (2020) beräknas batterilagring i elnätsapplikationer kosta mellan 200 och 600 \$ per kWh. En exakt kostnadsuppskattning är svår att få fram då det är många faktorer att ta hänsyn till. Dels ökar kostnaderna om systemet ska klara av höga effektuttag i form av större kablar och eventuellt extra kylbehov av batterierna. Dessutom påverkas priset av vem som beställer (återkommande kund osv) samt hur stort batteripaketet ska vara.

Vattenfall – Boliden Bergsöe containerlösning

Ett projekt i Sverige är på anläggningen Boliden Bergsöe där Boliden tillsammans med Vattenfall och Landskrona Energi tagit fram en 20-fots container innehållandes 24 nya elbilsbatterier från BMW i3. Denna lösning ger en kapacitet på 1 008 kWh med DoD på 89 % och en märkeffekt på cirka 500 kW. Containern inkluderar utöver batterierna även kraftstyrning och klimatanläggning för att hålla batterierna vid optimal temperatur vilket är ca 20 °C. Då Bolidens smältverk använder stora mängder el och högt effektuttag kan den här lösningen hjälpa till att avlasta elnätet i form av att batterierna laddas när det är lågt kapacitetsutnyttjande i elnätet och elpriset är billigare, för att sedan använda elen från batterierna när elnätet är högt belastat. Containern med innehåll väger ca 15 ton.

Tesla Powerpack

Teslas batterilagringssystem Powerpack består av flera moduler som är skalbara beroende på hur stort lagringsbehovet är. Enligt Teslas hemsida krävs en Powerpack-omvandlare som har måtten 1 044 x 1 394 x 2 191 mm och väger 1 120 kg. En omvandlare är till för att omvandla växelström till likström. Dessutom krävs ett antal Powerpack-enheter där respektive modul har måtten 1 317 x 968 x 2 187 mm med vikt på 2 199 kg samt en kapacitet på 232 kWh. Systemets effektivitet för el – lagring – el ligger på omkring 90 % (Tesla, 2021).

Teslas referens Forshuvud

Enligt Fortum och Tidningen Energi har Fortums vattenkraftverk vid Forshuvud installerat ett batterilagringssystem för att stödja kraftverket vid snabba effekregleringar, då batteriet reagerar på några millisekunder vid effektvariationer så att vattenkraftverket kan ändra sin effekt på ett mer skonsamt sätt. Batterilagret kostade cirka 30 miljoner kronor och är på 6,2 MWh samt består av 39 moduler av Tesla Powerpack. Detta ger en kapacitet på ca 160 kWh per modul, vilket är endast 69 % av det Tesla uppger på sin hemsida. Uppgifter är endast tagna från media, vilket gör att uppgifterna inte är bekräftade från Tesla (Tidningen Energi, 2020; Fortum, 2020).

Northvolt

Northvolt håller på att ta fram ett batteripaket ”Voltpack” som än så länge bara visats upp som prototyper vid vissa evenemang. Deras moduler har en storlek på 2 000 x 1 600 x 1 200 mm med en vikt på under 3 000 kg samt en kapacitet på 245 kWh/modul. Dessa moduler kan sedan seriekopplas. Kostnaden för Northvolts Voltpack har inte gått att få fram (Northvolt, 2021).

3.6 Vätgas

Vätgas består av två stycken väteatomer, H₂, och väteatomen är både det lättaste och vanligaste grundämnet på jorden. Vätgas är en osynlig och luktfri gas. Vid normalt tryck och normal rumstemperatur förekommer väte i gasform. Väte har hög energidensitet per massenhet, men låg volymdensitet. Den låga volymdensiteten gör vätgas svår att transportera samt även relativt svår att lagra. Det hittills enklaste sättet att lagra vätgas på är under tryck, och då komprimeras gasen till 200 – 700 bar. Det går även att lagra vätgasen i flytande form, och då behöver temperaturen komma ner till -253 °C. I Tabell 13 sammanfattas vätgasens egenskaper (Nationalencyklopedin, 2021).

Tabell 13. Vätgasens egenskaper

Egenskaper	Vätgas, H ₂
Atomnummer	1
Molmassa	1 g/mol
Densitet, gas	0,09 kg/m ³
Densitet, flytande	70,8 kg/m ³
Densitet, fast	76 kg/m ³
Smältpunkt	-259 °C
Kokpunkt	-253 °C
Nyckelegenskaper	Råvara vid kemisk produktion, bränsle till bränsleceller eller raketmotorer, avlägsnar syre vid glastillverkning.

Vätgas är en vanlig industrigas och runt om i världen används drygt 120 miljoner ton vätgas per år, där majoriteten används till framställning av ammoniak, metanol samt och raffinering av olja. För att ersätta all den vätgas som används idag till fossilfri vätgas, krävs ca 4 000 TWh förnybar el. Under senaste åren har många industrier börjat inse att vätgas kan ersätta kol för att få ner sina koldioxidutsläpp. Bland annat finns ett projekt i Sverige som kallas HYBRIT där Vattenfall, LKAB och SSAB vill ersätta koks med vätgas i masugnarna för att tillverka fossilfritt stål. Restprodukten blir då rent vatten istället koldioxid (Fossilfritt Sverige, 2021)

Beroende på hur vätgas framställs kategoriseras den in i grön, blå och grå. Grön vätgas framställs via förnyelsebara energikällor så som elektrolys där man splittrar vatten i dess beståndsdelar väte och syre med hjälp av elektricitet, alternativt reformering av biobränslen. Blå vätgas klassas den vätgas som via reformering av fossila bränslen, till exempel naturgas eller olja. Men där kolet tas om hand via CCS (Carbon Capture & Storage) istället för att släppas ut i atmosfären som koldioxid. Grå vätgas är som blå från fossila källor, men utan CCS. Ca 95 % av den vätgas som framställs idag är grå på grund av att det är mycket billigare än grön via elektrolys (Fossilfritt Sverige, 2021). I EUs

vätgasstrategi som presenterades sommaren 2020 är målet att andelen grön vätgas ska öka, samt att det förs diskussioner om att industrier måste kvotera in och ha en viss andel grön vätgas i sin produktion. (European Commission, 2020). I och med att EU vill via strategin satsa 430 miljarder Euro och ha en elektrolyskapacitet på 40 GW fram till 2030 så beräknas kostnaden för grön vätgas att sjunka och på sikt konkurrera ut den grå vätgasen. För att sätta detta i perspektiv så har EU ca 1 GW samlad elektrolyskapacitet år 2019 och förväntas ha 6 GW år 2024. Detta medför att elektrolyskapaciteten förväntas öka med 4 000 % på drygt 10 år (Fossilfritt Sverige, 2021).

Än så länge används majoriteten av vätgas inom industrin, men på senare år har vätgas börjat nämnas och användas utanför industriområdena, till exempel som fordonsbränsle. Detta medför att nya regler och riktlinjer behöver tas fram då ett brandfarligt ämne börjar hanteras i bostadsområden och av personer som inte har kompetens inom detta område. Än så länge finns det inga nationella riktlinjer i Sverige gällande hantering av vätgas utanför industriområde, utan det är upp till respektive kommuns räddningstjänst att bedöma och godkänna med hjälp av riskanalysen (Nilsson Energy, 2021). Detta medför att samma projekt kan få godkänt i en kommun, men inte godkänt i grannkommunen. Enligt Nilsson Energy handlar det främst om att den allmänna kunskapsnivån gällande vätgas behöver förbättras. Fossilfritt Sverige presenterade i januari 2021 en vätgasstrategi och färdplan för hur regeringen kan och bör arbeta för att öka förutsättningar för ett utbyggt och enhetligt vätgassystem i samhället. I februari 2021 publicerade Skatteverket hur vätgas som förbrukas i fordon ska beskattas (Skatteverket, 2021). Där står det att vätgas via bränslecell beskattas på samma sätt som biogas, det vill säga att energi- och koldioxidskatt inte ska betalas. Denna tolkning bör kunna tillsammans med (Skatteverket, 2014) anta att även vätgas som används för uppvärmning till hus bör vara fria från energi- och koldioxidskatt. Frågan gällande koldioxidskatt är ändå uteslutet då vätgasproduktion och konsumtion via elektrolys och bränslecell inte släpper ut några klimatfarliga ämnen.

Säkerhet

När det kommer till hantering av vätgas finns det många säkerhetsaspekter att ta hänsyn till. Då väteatomen består av en proton och en elektron så är det den minsta och lättaste atomen i periodiska systemet, vilket medför att den är lättflyktig om behållaren inte är tillräckligt tät. Vätgas är en sekundär energikälla vilket innebär att den inte förekommer naturligt, utan måste framställas från andra ämnen till exempel vatten eller kolväten. Detta medför att om vätgasen ”släpps ut” så kommer väteatomerna att skingras från varandra och beblanda sig med luften, och vid vissa förhållanden mot andra molekyler kan vätgasen vara väldigt lättantändlig och explosiv. Till exempel kan knallgas bildas vid kontakt med syrgas i luften. (Nationalencyklopedin, 2021), vilket hände vid en vätgastankstation i Sandvika strax utanför Oslo i juni 2019. Där var det en ventil till vätgaslagret som började läcka och knallgas bildades. När en gnista sedan uppstod av okänd anledning så exploderade knallgasen vilket orsakade en stor tryckvåg som resulterade i att krockkudden på många bilar på motorvägen utanför löstes ut. Till skillnad från bensin och biogas, brinner inte vätgas. Däremot började en del intelligande komponenter att brinna. (Nel Hydrogen, 2019)

Vätgas har hittills endast hanterats som en industrigas under ett flertal decennier, men det är först på senare år som den har börjat hanteras utanför industriområden. På grund av detta finns det än så länge inga nationella riktlinjer eller lagar för hur vätgas ska hanteras utanför industriområden. Enligt Nilsson Energy kan dock lagar och regler för naturgas appliceras som riktlinjer för hantering av vätgas som fordonsbränsle eller energilagring till hushåll. Hantering av vätgas är tillståndspliktig från 2 liter beroende på förutsättningar och om den totala lagringen överstiger 5 ton tillämpas mycket hårdare krav enligt Sevesolagen.

Lagring av vätgas

För att kunna nyttja vätgas som lagringsmedium krävs det en del komponenter för att systemet ska fungera. Dessa komponenter är följande:

- El
- Vatten
- Elektrolysör
- Kompressor
- Bränslecell
- Förvaring

El från till exempel solceller tillförs till elektrolysören. Elektrolysören spjälkar vatten till dess beståndsdelar, nämligen vätgas (H_2) och syrgas (O_2). Vid processen bildas även en del värme. Utgående gaser har ett tryck på cirka 30 – 70 bar beroende på vilken typ av elektrolysör som används. Vid behov kan en kompressor komprimera gaserna ytterligare för platsbesparing vid förvaring. När vätgasen sedan ska nyttjas tillförs den separat tillsammans med syrgas till en bränslecell. Från 1 kg vätgas producerar bränslecellen cirka 13 kWh värme, 13 kWh el samt vatten (Nilsson Energy, 2021). I Tabell 14 sammanfattas processerna som sker. Mer information kring elektrolysör och bränslecell kan ses under rubrikerna ”Elektrolys och elektrolysörer”, 3.7, och ”Bränslecell”, 3.8.

Tabell 14. Sammanfattning av de processer som sker i elektrolysör samt bränslecell

Går in i elektrolysören	Kommer ut från elektrolysören	Går in i bränslecellen	Kommer ut från bränslecellen
55 - 60 kWh	12 kWh i form av värme (60 °C)		13 kWh i form av värme (65 - 80 °C)
11 liter vatten	1 kg vätgas	1 kg vätgas	13 kWh i form av elektrisk energi
	8 kg syre	8 kg syre	11 liter vatten

När det kommer till lagring av själva gasen så finns det många olika sätt, dels kan man lagra vätgasen i tankar, men även i andra material så som ammoniak, metan eller även i metaller (Sundén, 2019). Vid dimensionering av lagring av trycksatt vätgas beror önskat lagringstryck inte bara på hur mycket tryckbehållaren klarar av. Val av lagringstryck beror på flera aspekter, dels hur mycket yta som ska tas i anspråk, då ett lägre tryck kräver större volym än vätgas lagrat i högre tryck. Även val av material och livslängd kan variera beroende på val av tryck. Egentligen vill man inte ha högre tryck än nödvändigt då det kräver mer energi att komprimera.

Hans-Olof Nilsson har en villa som är självförsörjande på el och värme där överskottsel från solpanelerna lagras i batterier och vätgas. Hans vätgaslager har först fått godkänt från räddningstjänsten och sedan krävs en besiktning av lagringen vartannat åt. Mer info om Hans-Olof Nilssons villa och hans systemlösning finns under ”5.1 Hans-Olof Nilssons villa, Göteborg”

Klassificering av tankar

Beroende på tryckkapacitet delas vätgastankar in i fyra kategorier enligt (Energiforsk, 2018):

- Typ I: Metallisk tank, upp till 200 bar.
- Typ II: Tjock metallisk tank insvept med fiberkomposit.
- Typ III: Metallisk tank lindad med tjocka lager av kolfiber, upp till 350 bar.
- Typ IV: Polymertank helt lindad med kolfiber, upp till 700 bar. Typ IV har en polyethylene, eller HDPE inre cylinder som lindras med glasfiber eller kolfiber.
- Typ V: ”specialtankar” som har specialanpassade former.

De olika typ-kategorierna har olika målgrupper och därmed olika egenskaper. Typ IV är främst till personbilar där tillgänglig volym är kraftigt begränsad, och därmed krävs högt tryck för att få plats med så mycket energi som möjligt. De lastbilar och bussar som finns på marknaden idag har generellt 300 – 350 bar. Om väldigt höga volymer efterfrågas kan vätgasen kylas ner till $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ vilket är kokpunkten. Detta är visserligen väldigt energikrävande att kyla ner så pass mycket men det kan vara aktuellt som till exempel fartygsbränsle eller lastbilar för en räckvidd på över 1 000 km per tankning (Daimler, 2020) Typ IV-tankarna med 700 bar har som krav att de ska klara max 5 000 cykler och 20 år. Vid de andra typtankarna med lägre tryck gäller samma regler som för naturgas, det vill säga om den är anpassad för 20 år ska den klara 20 000 cykler.

Vätgas går att lagra över långa tidsperioder och har även en hög energitäthet. Vilken verkningsgrad vätgas har beror helt på hur beräkningarna är utförda, och ibland kan det uppstå förvirring kring vilken verkningsgrad man ska utgå ifrån. När el blir vätgas erhålls en verkningsgrad på cirka 75 %. Om det varma vattnet även tas tillvara på, till exempel genom att skicka ut det till ett fjärrvärmenät, kan verkningsgraden mätas upp till hela 95 %. När det kommer till verkligheten är det dock mer intressant att veta hur stor verkningsgraden blir när vätgas återigen blir el. Om den totala verkningsgraden för el-vätgas-el beräknas, blir verkningsgraden cirka 25 %, vilket är avsevärt mycket lägre än 75 % när man bara beräknar el till vätgas. Om man däremot tar tillvara på värmen skriver Nilsson Energy att verkningsgraden kan bli upp till 75 %. I verkliga projekt som Tankstationen i Mariestad, Hans Olof Nilssons villa och Sjöbohem har de tagit avstamp i Nilsson Energys siffror. Därför kommer detta examensarbete också att utgå ifrån deras mätvärden i senare beräkningar.

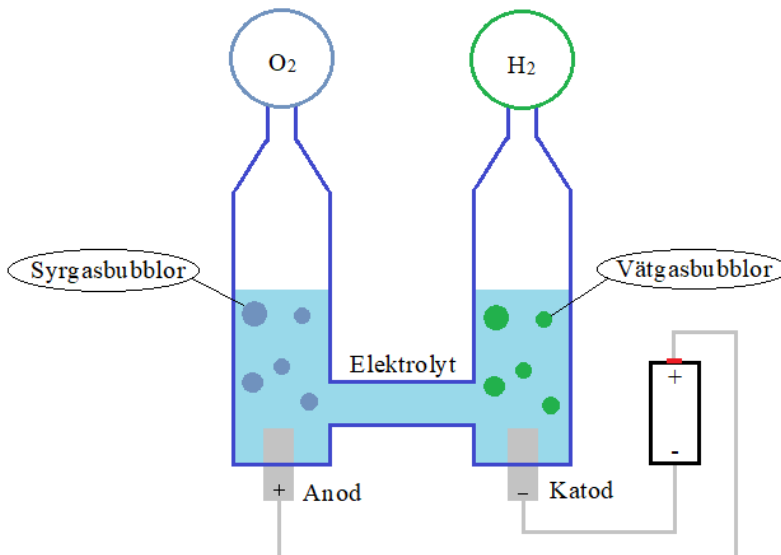
Utöver att lagra vätgas i tankar kan gasen lagras i form av andra ämnen, några exempel är ammoniak (NH_3) och biogas eller andra kolväten.

Vätgasens potential i framtiden

Fossilfritt Sverige presenterade i januari 2021 en vätgasstrategi (Fossilfritt Sverige, 2021) som de lämnade över till regeringen om hur de vill öka förutsättningarna för en effektiv övergång till ett fossilfritt samhälle. I denna strategi presenteras många konkreta mål och uppgifter som regeringen behöver utreda och ta ställning till för att skapa tydliga spelregler, till exempel hur vätgas ska beskattas, regelverk gällande energilagring, distribution och även hur tillståndsfrågor ska hanteras.

3.7 Elektrolys och elektrolysörer

Elektrolys är den process som omvandlar elektrisk energi till kemisk energi, det vill säga motsatsen till vad som sker i en bränslecell. När elektricitet leds genom vatten delas vattenmolekylerna och det bildas syrgas och vätgas. Reaktionen är inte spontan, eftersom tillförd energi i form av elektricitet krävs. Vid reaktionen sker en så kallad redox-reaktion (Sundén, 2019). En redox-reaktion innebär att en reduktion och oxidation sker samtidigt. Elektrolys sker i en så kallad elektrolysör och en elektrolyscell består av två elektroder samt en elektrolyt. De två elektroderna är kopplade till en källa som producerar elektrisk energi. Vid den negativa katoden bildas vätgas och vid den positiva anoden bildas syrgas. En översiktlig bild på hur en elektrolysör är uppbyggd kan ses i Figur 8. Vätgasen kan sedan lagras i tankar som energilagring och syrgasen kan antingen släppas ut i atmosfären eller lagras i tankar för att sedan användas inom till exempel sjukvården. Det finns olika typer av elektrolysörer beroende på vilken typ av elektrolyt som används, driftstemperatur, tryck mm. Nedan beskrivs alkalisk samt PEM-elektrolysörer som är de vanligaste på marknaden idag. Dock är det den alkaliska elektrolysören som dominerar i dagsläget. Även SOEC beskrivs, även om den i dagsläget endast är i utvecklingsstadiet.



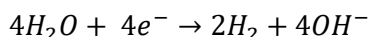
Figur 8. Elektrolysörens uppbyggnad

I dagsläget är elektrolysörer förhållandevis dyra jämfört med andra framställningsmetoder av vätgas. Enligt Fossilfritt Sveriges vätgasstrategi förväntas försäljning av elektrolysörer öka och priset halveras fram till 2030 i och med de skalfördelar och effektiviseringar som uppstår. Detta i samband med att priset på förnybar el sjunker kommer leda till att framställning av vätgas via elektrolys kommer vara prismässigt konkurrenskraftig mot den fossila vätgasframställningen.

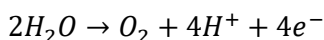
3.7.1 Alkalisk elektrolysör

En alkalisk elektrolysör är den idag billigaste och vanligaste typen av elektrolysör på marknaden, den använder en alkalisk vattenlösning ofta bestående av kalium- eller natriumhydroxid blandat med avjoniserat vatten. De kemiska reaktioner som sker kan utspela sig på olika sätt och beror helt på vilken elektrolyt som valts. Om NaSO₄ har valts, sker reaktionen följande:

Halva kemiska reaktionen sker i katoden:



Den andra halvan sker i anoden:



Arbetstemperaturen är vanligtvis mellan 60 – 80 °C och utgående tryck för vätgasen är omkring 30 bar och har i dagsläget en total verkningsgrad på omkring 75 % utan hänsyn till den termiska värmen som kan tas om hand för att till exempel värma upp byggnader eller skicka ut i fjärrvärmenät. En av nackdelarna med den alkaliska elektrolysören är att elektroderna bryts ner av elektrolyten (Sundén, 2019).

3.7.2 PEM – Proton Exchange Membrane

PEM står för proton exchange membrane och är en typ av elektrolysör, där elektrolyten är i fast form och består av polymermembran (Sundén, 2019). PEM-elektrolysören arbetar i ett något högre tryck än alkaliska och är i dagsläget något dyrare än alkaliska, Men priset på dessa elektrolysörer är påväg ner och förväntas inom några år bli billigare än de alkaliska elektrolysörerna (Nel Hydrogen, 2021).

En annan fördel med PEM är att det teoretiskt ska gå att köra elektrolysören omvänt, det vill säga använda vätgas och syre för att producera el. Detta innebär att man kan använda samma elektrolysör i båda riktningarna istället för att ha en separat bränslecell. Enligt Nilsson Energy finns detta system dock enbart i forskning- och utvecklingsstadiet.

3.7.3 SOEC Solid Oxide Electrolysis Cell

SOEC är en högtempererad elektrolysör som arbetar i högre temperatur (500 – 850 °C) och därmed kan nå högre verkningsgrad då vattnet lättare spjälkas vid högre temperatur.

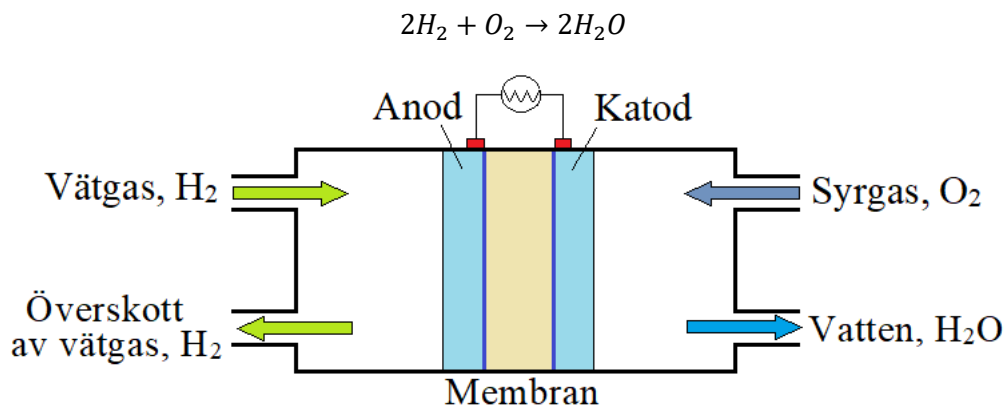
Elektrolyten består av ett keramiskt material. Det finns än så länge inga SOEC ute på marknaden utan dessa är endast i utvecklingsstadiet.

3.8 Bränslecell

Bränslecellens uppgift är att omvandla vätgasens kemiska energi till el och reaktionen som sker lämnar vatten och värme efter sig (Vätgas Sverige, 2020). En likhet mellan bränslecellen och batterier är att elektricitet genereras av en elektrokemisk reaktion. Skillnaden är att batterier lagrar energin inuti sig, medan energin i en bränslecell levereras av vätgasen. Det finns huvudsakligen två typer av bränsleceller på marknaden idag, PEM och SOFC som kommer beskrivas nedan. Den största skillnaden är att PEM är lågtempererad och därmed arbetar i en temperatur mellan ca 60 – 80 °C medan SOFC arbetar mellan 600 – 900 °C. Bränsleceller är relativt tysta och har inga rörliga delar, vilket innebär att det krävs externa komponenter för att reglera tillförsel av bland annat vätgas, syrgas och kylarvätska. (PowerCell, 2021).

3.8.1 Proton Exchange Membrane - PEM

PEM-bränslecellen har, precis som ett batteri, en anod sida och en katod sida. Dessa separeras med ett membran och detta gör att endast protoner kan passera igenom. Eftersom elektronerna inte kan passera membranet, leds dessa till en extern krets där de producerar elektricitet. På katodsidan kan elektronerna och protonerna åter igen förenas samtidigt som de ansluter till syre från luften. Det sista steget i reaktionen är att vatten och värme bildas. En cell kan producera ungefär 0,7 volt, men om avsikten är att ha en högre spänning kan flera bränsleceller kombineras (Sundén, 2019). Figur 9 visar hur en bränslecell är uppbyggd och den kemiska reaktionen som utspelar sig i en bränslecell kan ses nedan:



Figur 9. Bränslecellens uppbyggnad

Priset på bränsleceller är idag väldigt högt eftersom de inte massproduceras i någon större skala. Priset förväntas däremot sjunka betydligt på samma sätt som bland annat batterier har gjort under senaste decenniet. En annan fördel med bränsleceller är att de kan sammankopplas för att få en högre effekt om så önskas, detta innebär att producenten kan massproducera samma bränslecell oavsett ändamål. Till en personbil räcker det med

en bränslecell medan i ett fartyg kan ett tiotal bränsleceller sammankopplas för att få önskad effekt (PowerCell, 2021)

PEM-bränsleceller arbetar generellt sett vid en temperatur mellan 60 – 80 °C där restvärmen består av ca 60-gradigt varmvatten vilket är optimalt att nyttja till uppvärmning av byggnader. Verkningsgraden för en bränslecell ligger oftast runt 40 - 60 % (Sundén, 2019). Däremot ökar verkningsgraden om den spillvärme som uppkommer tas tillvara på. Enligt Nilsson Energy kan verkningsgraden ligga omkring 80 % om restvärmen utnyttjas.

3.8.2 Solid Oxide Fuel Cell – SOFC

En SOFC-bränslecell är en så kallad keramisk bränslecell som jobbar vid temperaturer uppemot 600 – 900 °C och har en verkningsgrad på ca 60 %. Tack vare de höga temperaturerna behövs inte någon katalysator, samt att andra bränslen kan användas som ammoniak, biogas eller andra kolväten. Även ytterligare gasturbin kan installeras för att utvinna ännu mer elektricitet från restvärmen. Nackdelen med den här typen av bränsleceller är att de har en begränsad livstid samt en hög produktionskostnad. Till exempel kan keramer bytas ut mot stål, vilket bidrar till en betydligt mer rimlig produktionskostnad. Tyvärr löser det inte det andra problemet, eftersom stål korroderar vid höga temperaturer och därmed minskar livslängden. Genom den höga driftstemperaturen lämpar sig denna typ av bränsleceller till applikationer med längre körcykler, det vill säga där systemet kan vara igång under längre tider samt inte temperaturkänsliga applikationer (Sundén, 2019).

4 Elbilar

Elbilar blir allt mer populärt och med den ökade efterfrågan ökar även behovet för att ladda dessa. De senaste åren har antalet elbilar nästintill fördubblats för varje år (Power Circle, 2021), och vid årsskiftet 2020/2021 fanns det drygt 180 000 registrerade laddbara personbilar i Sverige, där 69 % är laddhybrider och 31 % rena elbilar (Power Circle, 2021). Enligt vattenfall förbrukar en elbil i genomsnitt 2 400 kWh/år (Vattenfall, 2020). Om trenden med elbilar håller i sig, vilken den förväntas göra, kommer elnätet att behöva leverera ut mer el än tidigare.

Enligt Boverket gäller nya krav på laddinfrastruktur till elbilar vid nyproduktion eller större ombyggnad av bostadshus och andra fastigheter (Boverket, 2021). För bostäder gäller vidare att vid nybyggen eller större renoveringar, där antalet parkeringsplatser är fler än 10, ska ledningsinfrastruktur dras fram till varje parkeringsplats som tillhör bostaden, det vill säga att samtliga parkeringsplatser ska vara förberedda för att kunna installera en laddstolpe. För övriga nybyggnationer som inte är bostadshus men har fler än 10 parkeringsplatser ska ledningsinfrastruktur förberedas för minst 20 % av parkeringsplatserna, och minst en färdig laddningspunkt.

5 Befintliga och pågående off-grid projekt

5.1 Hans-Olof Nilssons villa, Göteborg

Hans-Olof Nilssons villa i Göteborg är ett bra exempel på ett off-grid boende med alla moderna bekvämligheter. Villan är sedan 2015 helt bortkopplad från elnätet.

Villan består av två våningar och en källare som totalt är 504 m². Väggarna har ett U-värde på 0,195 W/m²,K, medan fönsterna har ett U-värde på 0,8 W/m²,K. För att klara av energiförbrukningen har Hans-Olof placerat byggnadsintegrerade solceller på taket, som även utgör takbeklädningen. Även delar av fasadväggarna mot väst och syd har fått integrerade solceller och de är också en del av fasadbeklädningen. Solpanelerna på sydfasaden kommer till nytta främst under vintern när solen står lågt på himlen. Solcellerna på västfasaden fångar eftermiddagssolen under sommarsäsongen. Dessutom kommer de aldrig vara täckta av snö eller frost, vilket solpanelerna på taket kan vara under vintermånaderna. Solpanelerna på taket har en installerad effekt på 20 kW_p medan solpanelerna på fasaden har totalt 3 kW_p. Förutom solpaneler finns det även solfångare på taket. Solfångarna har en total area på 20 m² och hjälper till att förse huset med varmvatten. Förbrukningen på huset uppgår till 13 500 kWh el per år, varav 4 500 kWh går till bergvärmepumpen och ca 3 500 kWh till elbilen. Sommarens överskottsenergi är på 14 000 - 15 000 kWh/år som lagras i form av vätgas, ca två tredjedelar omvandlas tillbaka till el och värme vid behov under vintern. Resterande överskott är tänkt att användas för att tanka en framtida vätgasbil via en egen tankstation.

Problemet med säsongslagring har Hans-Olof löst med hjälp av batterier och vätgas. Batterierna kan lagra 144 kWh och har en kapacitet på 5 dagar. Idag är det blybatterier, men Hans-Olof planerar att byta ut dessa mot Li-baserade batterier. Elektrolysören går igång när batterierna är på 85 %, och slutar när batteriet är nere på 30 %. Elektrolysören har kapaciteten att producera 0,09 kg vätgas i timmen och det utgående trycket är 50 bar. Vattnet inuti elektrolysören är vanligt dricksvatten. Dricksvattnet är dock avjoniserat via ett filter och filtret har hitintills blivit bytt 1 gång på 5 år. Vätgasen som bildas lagras i en extern byggnad med en vätgastank på 11 m³. Vätgasen lagras i ståltankar med ett tryck på cirka 300 bar och varje vätgastub rymmer cirka 1,15 kg vätgas. PEM-bränslecellen startar när batterierna är nere på 30 % och slås av när batterierna kommit upp till 60 %. Dessa siffror anpassas beroende på om solen lyser eller inte för att undvika att bränslecellen startar i samband med att elektrolysören stängs av.

Hela ombyggnaden kostade 2,5 miljoner kronor och driftkostnaderna är nära 0 kr. Om samma ombyggnad hade gjorts idag hade priset landat på cirka 1,5 miljon kronor. Nedan är en kort sammanfattning av vad energisystemet innehåller:

- Batterilagring: 1500 Ah eller 144 kWh vilket motsvarar ca 5 dygns drift.
- Vätgaslagring: 235 kg fördelat på 203 stycken 55-literstankar, 300 bar.
- Ackumulatortank för värme & varmvatten: 800 L.
- Ackumulatortank till uppvärmning garageuppfart: 3 000 L (35 °C). Markvärme för att slippa skotta snö.

- Ackumulatortank reserv för vatten till bl.a. elektrolysör: 500 L.
- Elektrolysör produktionskapacitet: 1 Nm³/h (5,5 kWh, ca 0,09 kg/h).
- Bränslecell: 5 kW el och 5 - 7 kW termisk värme

Om en läcka i vätgastankarna skulle uppstå startas direkt forcerad ventilation för att ventileras ut vätgasen, och därmed undvika eventuella skador. Vätgaslagret måste besiktas vartannat år och varje besök kostar cirka 2 500 kr. Trots att Hans-Olof Nilssons villa är off-grid finns, utöver en diselgenerator på 15 KVA, en anslutning till det lokala elnätet som reserv. Denna har dock inte behövt nyttjas (Nilsson Energy, 2021)

5.2 Zero Sun, Skellefteå

Vid Campingen i Skellefteå har en enplansvilla på 140 m², samt ett garage på 33 m² och ett ”teknologirum” på 8 m² har byggts som är bortkopplad från elnätet. Syftet med projektet är att visa att det går att bygga självförsörjande hus gällande el & värme även uppe i norra Sverige, där solen i princip aldrig går ner på sommaren och aldrig går upp på vintern.

Huset är ett forskningsprojekt utfört av bland annat SkellefteåKraft där syftet med projektet är att visa ”Kan man bygga det här, så kan man bygga det var som helst”.

På projektets hemsida kan man följa energiförbrukningen i realtid samt hur mycket energi som producerats samt förbrukats under de senaste 30 dagarna. Även aktuell status på batteri och vätgastankar går att se.

På taket finns 122 m² solceller vilket ger en topp effekt på 27 kWp. Vätgaslagringen som fungerar som ett lager över tid har en kapacitet på ca 2 000 Nm³ vilket motsvarar 180 kg (ZeroSun, 2021)

5.3 Sjöbohem

Sjöbohem hyresfastigheter meddelade hösten 2020 att de ska installera 800 solpaneler på sina tak samt installera ett vindkraftverk för att sälja en del till elnätet. De tänker lagra en del i vätgas för att kunna göra ett av sina hyreshus off-grid till att börja med (Sjöbohem, 2020).

- Solpanelerna kommer ha en topp effekt på 269 kWp
- Lagringskapacitet el: 3 000 kWh
- Lagringskapacitet värme: 3 000 kWh
- Lagringskapacitet vätgas: ca 40 - 240 kg
- Total elproduktion: 233 MWh varav 64 MWh för eget bruk.

Nilsson Energy, som är systemleverantör i projektet, säger att lagringskapaciteten börjar på 40 kg. Dock är det möjligt att öka lagringskapaciteten till 240 kg, allt eftersom behovet ökar. Från och med 2021 planerar Sjöbohem att fasa ut sin fordonsflotta med fossildrivna bilar till fordon som drivs av egenproducerad koldioxidfri vätgas.

5.4 Vätterhem

I Jönköping planeras ett projekt där två flerbostadshus innehållandes 44 lägenheter ska vara helt off-grid gällande energi, vatten och avlopp. Intill fastigheten ska två identiska byggnader byggas; där energi, vatten och avlopp är traditionellt inkopplat i samhällsinfrastrukturen. Syftet varför dessa fastigheter ska vara identiska är för att kunna få en bra jämförelse hur off-grid fastigheten fungerar mot det traditionella. (Yellon, 2020).

5.5 Förskola Mariestad

I Mariestad byggs just nu en förskola med plats för 144 elever och där byggnaden och verksamheten ska vara självförsörjande på solenergi med säsongslagring av solöverskottet i vätgas. En elnätsanslutning till lokala elnätet kommer finnas för att mata ut solenergi som inte ”får plats” i förskolans energilager. Första spadtaget togs hösten 2020 och verksamheten planeras starta i januari 2022. Skolan är unik i sitt slag då energin produceras och lagras lokalt för att förste byggnaden med el och värme under hela året. Men kan även fungera som reservkraft eller avlasta det lokala elnätet vid behov. (Mariestad, 2021) och (Nilsson Energy, 2021).

5.6 Tankstationen i Mariestad

Vätgastankstationen i Mariestad är världens första off-grid solcellsdrivna tankstation. Tankstationen är unik av sitt slag då den för allmänheten samt producerar fordonsbränslet på plats. Tankstationen tillverkar fordonsbränslet (vätgas) med hjälp av en elektrolysör som drivs av el från en intilliggande solcellspark och vatten från Väneren. Därmed är tankstationen helt självförsörjande året runt, och en klimatneutral cirkulär ekonomi skapas när några av kommunens vätgasdrivna fordon tankar vid stationen. När bilarna sedan kör på vägarna är de enda utsläppen ren vattenånga. En elnätssladd mellan tankstationen finns ansluten och kan aktiveras om tankstationen skulle behöva mer el än solcellsparken producerar, alternativt för att sälja el vid behov (Energiforsk, 2019).

6 Presentation av projektet

I Gårdstånga, Lund, ska 7 flerbostadshus byggas. Gustaf och Marianne Ramel (GMR) är beställare av projektet och Krafringen har blivit anlitate för att studera energilösningarna för de kommande byggnaderna. Krafringen har tillsammans med GMR kommit överens om att energibehovet för husen ska vara max 56 % av BBR:s energikrav, detta för att få ytterligare investeringsstöd. I det här examensarbetet ska flerbostadshusen testas för off-grid. För att minska lagringsbehovet för flerbostadshusen krävs det att byggnaderna är energieffektiva. Därför kommer byggnaderna inte bara testas mot BBR:s krav, utan även kraven i FEBY 18 för passivhus.

6.1 Information kring flerbostadshusen

Utifrån detaljplanen för Gårdstånga samt ett möte med Gustaf Ramel, har följande information kring husen tagits fram. Flerbostadshusen har två våningar med totalt 400 m² boyta, dvs 200 m² per våning. På nedersta planet ligger tre lite mindre lägenheter och på översta planet finns två lägenheter. Det invändiga takmåtten ska vara 2,5 meter. Utsidan ska ha vit puts, stommen ska vara i betong och grunden ska vara platta på mark. Taket ska vara ett svart plåttak av typen sadeltak, där vinkeln bör ligga runt 40 till 45 grader enligt planbeskrivningen. På taket ska det även placeras solpaneler och solfångare, eventuellt en hybrid av dessa två som kan leverera både el och värme. Placeringen av huset är idag uppritat så att långsidan ligger parallell med väg 104, se Figur 11. Detta innebär att taket där solcellerna ska placeras är riktad mot öst respektive väst. Optimal placering av byggnaden, samt takvinkel kommer att utredas närmare med hjälp av programmet PVGIS i ett senare stycke.

Bullermätningar har gjorts för området av Sweco och en stor bullervall kommer att anläggas längst väg 104, se Figur 11. Bullervallen planeras vara 3 meter hög.

Informationen är knapp eftersom den anlitate arkitekten ännu inte hunnit rita klart husen. Där finns tex ingen information kring varken fönster eller form på huset. GMR har dock tillsammans med arkitekten tagit fram en inspirationsbild för byggnaderna, se Figur 10. I det här examensarbetet kommer dock huset att förenklas till en rektangelform för att underlätta beräkningarna. Optimal form på huset utreds i BIM Energy. Genom ett muntligt möte förklarade Gustaf Ramel att han gärna såg att fönsterna var lite större än standard. Väggen som vetter mot bullervallen och väg 104 behöver inte så mycket fönster, eftersom utsikten kommer skymmas av bullervallen. Berggrunden börjar någonstans mellan 54 och 60 meters djup (SGU, 2020).

Varje lägenhet kommer att ha tillgång till varsin parkeringsplats med möjlighet för elbilsladdning.



Figur 10. Principskiss Gårdstångaprojektet



Figur 11. Översiktsbild Gårdstångaprojektet

6.2 Introduktion av fallen

I det här avsnittet ska de tre olika fall som senare ska studeras i fallstudien att bestämmas. Om flerbostadshusen i Gårdstånga ska vara helt självförsörjande på energi, måste det finnas någon typ av lagringsmöjlighet. I litteraturstudien redogjordes olika sätt att lagra el respektive värme. Några av lagringsmetoderna lämpar sig för större skala eller industri, och passar inte ett off-grid boende bestående av sju flerbostadshus. Både pumpkraftverk och berggrum lämpar sig framförallt för storskalig lagring och dessa metoder är också platsberoende. I Gårdstånga finns varken möjlighet att spränga ut ett berggrum eller att anlägga ett pumpkraftverk. Svänghjul lämpar sig för korttidslagring, och därför är det inte heller ett alternativ för flerbostadshusen i Gårdstånga. Supraleutare används bland annat inom sjukvård och till känsliga sensorer, metoden bedöms inte vara optimal för att värma upp och förse flerbostadshus med el. Superkondensatorer är en form av batteri och framtiden för den här lagringsmetoden spås vara inom mobila tillämpningar. Det är alltså inte heller alternativ för byggnaderna i Gårdstånga. Komprimerad luft är en avancerad teknik och är svår att nyttja i stor skala. Dessutom

finns det bara ett fåtal anläggningar i Sverige som kan hantera den här lagringsmetoden och därför väljs den här lagringsmetoden också bort. Att lagra energi med hjälp av salt är känt sen gammalt, men det är först på senare tid som det verkligen skett forskning inom ämnet. Forskningen är lovande, men tekniken är ännu inte mogen för att kunna användas på riktigt. Slutligen återstår batterier och vätgas. Batterier är en beprövad lagringsmetod och skulle kunna vara ett alternativ för flerbostadshusen i Gårdstånga. Vätgas används redan inom industri, och där finns stor potential för att kunna använda vätgas som lagringsmedium för bostäder. I nuläget finns ett antal verkliga exempel på pågående eller färdiga projekt där vätgas används som lagringsmetod.

För att kunna lagra energi, måste det också produceras energi. Det här examensarbetet fokuserar framförallt på de förnybara energikällorna; sol, vind och vatten. Vattenkraft är platsberoende, och i Gårdstånga finns det ingen möjlighet att använda vattenkraft. Då återstår solceller och vindkraftverk. I projektbeskrivningen framkommer det att solpaneler, solfångare eller en hybrid av dessa redan planeras att användas. Ett alternativ är därför att endast bruka solceller, medan ett annat alternativ är att nyttja både solceller och vindkraft. Solceller har många fördelar och det är enkelt att placera dem ovanpå byggnaderna. Trots att det är få soltimmar på vintern, producerar solcellerna energi vilket gör den till en relativt stabil energikälla. Eftersom det ska anläggas en stor bullervall i det här projektet, hade den kunnat nyttjas för att placera ytterligare solceller på. Vindkraftverk skulle kunna vara ett lämpligt alternativ för flerbostadshusen i Gårdstånga, om det placeras på andra sidan vägen. Då hade bullervallen hjälpt till att dämpa ljudet från vindkraftverken, som annars anses som ett stort problem. Däremot kräver vindkraftverk mer komplexa tillståndprocesser, och vinden är mer osäker än solen. Att nyttja både sol- och vindkraft hade kunnat fungera i det här projektet. Valet i det här arbetet hamnar dock på att nyttja endast solceller. Detta eftersom solceller kan placeras ut på bullervallen som komplement för det som inte får plats på taken, dessutom krävs inga tillstånd. Hybridsolceller samt solfångare tas inte med i beräkningarna, vid intresse kan dessa läggas in i efterhand i projektet.

Utifrån ovanstående diskussion har slutligen tre fall skapats.

Fall A

- Kopplad till elnätet. Traditionell lösning.
- Ej solceller.

Fall B

- Off-grid lösning. Endast batterilagring.
- All elproduktion från solceller.

Fall C

- Off-grid lösning. Batteri- och vätgaslagring.
- All elproduktion från solceller.
- Ackumulatortank.
- Restvärme från vätgas.

7 BIM Energy och PVGIS

Under kapitel 7.1 byggs flerbostadshusen upp i BIM Energy, samt simulerar dess energiförbrukning. I kapitel 7.2 simuleras elproduktionen från solcellerna i PVGIS.

7.1 Uppbyggnad av referenshus i BIM Energy

Det första som skrivs in i BIM energy är boarea, 400 m², samt typologi. BIM har färdiga typologier att välja mellan. Eftersom byggnaden ska vara off-grid, samt ha betongstomme, väljs alternativet superisolerad, tung byggnad. Förinställda värden för superisolerad, tung byggnad kan ses i Tabell 15. Alla förinställda värden går att ändra. I det här fallet har isoleringen för ytterväggen ändrats till 500 mm, eftersom passivhus vanligen har den isolerings-tjockleken. Ytterväggens generella uppbyggnad kan ses i Figur 12 och dess mått kan ses i Tabell 16. Figuren är ej skalenlig.

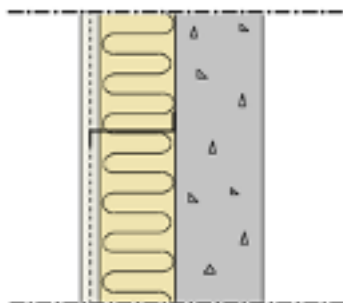
Tabell 15. egenskaper för Superisolerad, tung byggnad

Typ	Tjocklek [m]	U-värde [W/ m ² ,K]
Yttervägg	0,59	0,08
Tak	0,58	0,08
Platta på mark	0,53	0,14
Innervägg	0,07	4,74
Mellanbjälklag	0,16	3,79
Fönster	1 ⁽¹⁾	0,8
Dörr	1 ⁽¹⁾	1

(1). Ett värde som BIM Energy själv anger för att kunna utföra beräkningarna.

Tabell 16. Yttervägg; materiallager och mått

Materiallager från utsidan, yttervägg
KC-bruk
500 mm mineralull 33 mellan träreglar 45 mm, cc600
Betong, normal RH



Figur 12. Generell uppbyggnad av betongyttervägg med utvändig isolering

Köldbryggorna som BIM energy tagit fram kan ses i Tabell 17.

Tabell 17. Köldbryggor för superisolerad, tung byggnad

Köldbryggor	Psi-värde [W/m, K]
Yttervägg/innervägg	0,02
Yttervägg/mellanbjälklag	0,04
Fönster och dörrar	0,03
Yttervägg/tak	0,04
Yttervägg/Platta på mark	0,07
Yttervägg/Yttervägg	0,04

Följande geometri för byggnaden skrivs in:

- Höjd på våningsplan, innermått: 2,5 m
- Antal våningsplan: 2 stycken
- Antal källarplan: 0
- Bredd: 16 m
- Djup: 12,5 m
- Byggnadshöjden blir 5,69 m

När geometrin för byggnaden bestämdes, testades några alternativa utformningar. Olika laborationer i BIM Energy visar att ett kvadratisk hus har ett lägre energibehov än ett rektangulärt. I Tabell 18 och Tabell 19 jämförs två olika hus, där den enda skillnaden är utformningen. Båda husen har bergvärme, frånluft och de är uppritade utan fönster. Måtten är tagna för att golv-arean ska vara 200 m² exakt. Skillnaden mellan total elförsörjning är marginell, men visar ändå på att ett hus med ungefär lika långa sidor kräver mindre energi. Transmission är något högre när byggnaden har en mer rektangulär form. Detta beror på att omslutningsarean är större. Transmission sker via klimatskalet, och därför är det rimligt att transmissionen ökar när omslutningsarean ökar.

Flerbostadshusens form bestäms till 16 x 12,5 m, eftersom roten ur 200 inte blir ett jämnt tal.

Tabell 18. Avgiven energi

Utformning [mxm]	Transmission [kWh/år]
20 x 10	8 790
16 x 12,5	8 611

Tabell 19. Total energiförsörjning

Utformning [mxm]	Total energiförsörjning [kWh/år]
20x10	7 790
16x12,5	7 748

Andel fönster på byggnaden bestäms utifrån dagsljuskravet från BBR, se avsnitt 2.7 "Krav för inomhusmiljön". Enligt BBR bör fönsterarean vara minst 10 % av golvarean. Eftersom planlösningen för flerbostadshuset inte är bestämd, antas det vid beräkning av minsta fönsterarea att hela byggnaden är ett enda stort rum. Det här är givetvis en grov förenkling, men det ger ändå en uppfattning om hur mycket fönster som kommer att

krävas. Nedan ses beräkningar för minsta fönsterandel som krävs för att klara dagsljuskravet.

Minst fönster-area som krävs: $400 \cdot 0,1 = 40m^2$

Omslutningsarea för byggnaden: $16 \cdot 2 \cdot 5 + 12,5 \cdot 2 \cdot 5 = 285 m^2$

Fönsterandel i procent: $\frac{40}{285} = 0,1403 \dots \approx 14\%$

Slutligen bestäms följande fönsterandelar i % för respektive fasad:

- Syd: 20 %
- Öst: 15%
- Väst: 15%
- Norr: 15%

Fasaden som vetter mot söder får en större procentandel, eftersom söderläge bidrar till mer gratisvärme. För att undvika övertemperaturer bör dock inte procentandelen vara för hög mot just söder. Med 20 % fönster på söderfasaden och 15 % på resterande väggar, blir total fönsterandel för hela omslutningsarean cirka 16,4 %, vilket uppfyller medelkraven för dagsljusinsläpp.

De fönster som väljs är argonfyllda 3-glas fönster med lågemissionsbeläggning. De värden som ändras är g-faktorn (soltransmittans total) och LT-värdet (soltransmittans direkt). För övriga egenskaper används BIM Energys förslagna värden. Nedan ses egenskaperna för de valda fönsterna. U-värdet för fönsterna ses i Tabell 15.

- Soltransmittans total: 50 %
- Soltransmittans direkt: 35 % (70 % av g-faktorn)
- Glasandel: 70 %
- Luftläckage, q_{50} : 0,5 l/s,m²

Val av börvärde för byggnaderna:

- Börvärdet för rumstemperaturen sätts till 21 °C, enligt BBR.
- Det finns inget krav för vilken den högsta temperaturen får vara. Socialstyrelsen menar att det inte bör vara högre än 26 °C på sommaren. Därför väljs det här värdet som börvärde.
- Börvärdet för tappvarmvatten sätts till 2,85 W/m² (BEN2)
- Personvärmens sätts till 2,85 W/m² (BEN2, antagit samtliga lägenheter 3RoK)
- Fastighetsenergin internt sätts till noll.
- Fastighetsenergin externt sätts till 0,25 W/m². Belysningen ska i snitt starta vid kl. 19 på kvällen och släckas kl. 6 på morgonen. Det innebär att belysningen ska vara igång cirka 10 h varje dag. Varje belysning antas ha en 10 W-lampa.
- Verksamhetsenergin internt sätts till 3,4 W/m². HH-el antas till 30 kWh/m² (BEN2)
- Verksamhetsenergin externt sätts till 0
- Den totala fuktproduktionen sätts till 1 Mg/s, m² (Förslag från BIM Energy)

I Tabell 20 kan en sammanställning av de olika börvärdena ses.

Tabell 20. Sammanfattning av börvärden för byggnaden

Börvärde	Värde	Enhet	Schema
Uppvärmning	21	°C	Hela året
Kylning	26	°C	Hela året
Tappvarmvatten	2,85	W/m ²	Hela året
Personvärme	2,18	W/m ²	Mellan 17-07
Fastighetsenergi internt	0		
Fastighetsenergi externt	0,25	W/m ²	Mellan 19-06
Verksamhetsenergi, internt	3,4	W/m ²	Hela året
Verksamhetsenergi, externt	0		
Fuktproduktion till rumsluft	1	Mg/s, m ²	Hela året

Det valda ventilationssystemet är FTX, indata för ventilationssystemet står angivet nedan och är förinställt av BIM Energy. FTX lämpar sig för välisolerade och energieffektiva hus, eftersom ventilationen är kontrollerad och det finns värmeåtervinning. I Figur 13 kan inställda val för till- och frånluftstemperatur ses och i Figur 14 ses verkningsgraden för värmeväxlaren.

Lägsta tilluftstemperatur

Aktivera

Tilluftstemperatur: 18 °C, 18 °C

Utetemperatur: 0 °C, 20 °C

Högsta tilluftstemperatur

Aktivera

Tilluftstemperatur: 20 °C, 20 °C

Utetemperatur: -20 °C, 20 °C

Figur 13. Inställningar för till- och frånluft

Värmeväxlare

Aktivera Låst verkningsgrad för värmeväxling

Verkningsgrad: 75 %, 85 %

Utetemperatur: -20 °C, 0 °C

Figur 14. Inställningar för värmeväxlaren

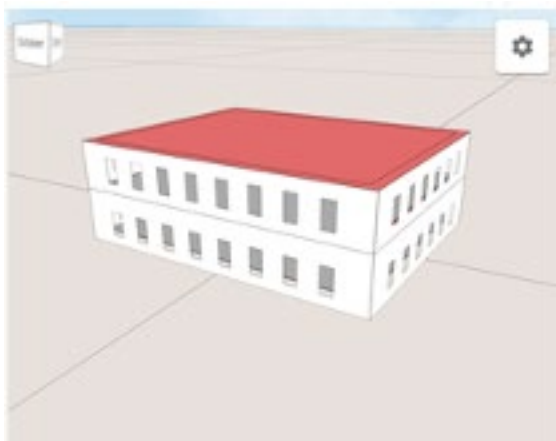
Eftersom berggrunden ligger cirka 65 meter under marknivå, är bergvärme inte ett aktuellt alternativ. Kraftringen vill helst ha jordvärme, men det alternativet finns inte i

BIM Energy. Luft/vatten-värmepump anses ge något sämre värden än jordvärme på årsbasis, medan bergvärme anses ge lite bättre. Därför väljs luft/vatten som värmepumpslösning. Den valda värmepumpen blir en NIBE F2120-8, luft/vatten och elen till cirkulationsfläkten antas till 185 W.

Värden för tappvarmvatten sätts till följande:

- Kallvattentemperatur: 8 °C
- Varmvattentemperatur: 55 °C
- Värmeförlust internt från rör: 0,1 W/m,K
- Rörlängd internt: 25 m
- Värmeförlust externt från rör: 0,1 W/m,K
- Rörlängd externt: 0 m

I Figur 15 kan det färdigritade huset ses. Eftersom taket är en kallvind påverkar detta inte energianvändningen för själva byggnaden, och därför är det inte heller med i bilden. Taket utformas i samband med elproduktionen. Takvinkeln har stor påverkan för elproduktionen, eftersom solcellerna ska placeras på taket. Detta görs i PVGIS och utreds i följande avsnitt. Positioneringen av byggnaden ska skrivas in i BIM energy. Byggnadens placering påverkar produktionen av solenergi. Mest solenergi bör fås om taket är riktat mot söder. Vilken position huset ska få utreds också närmare i PVGIS.



Figur 15. Byggnaden i BIM Energy

Beställaren av projektet önskar aktiv kyla och därför installeras en kylmaskin. Aktiv kyla brukar vanligen undvikas i passivhus då detta ökar energibehovet. Tanken är dock att även passiv kyla ska installeras i form av utvändiga markiser, vilket innebär att kylmaskinen inte kommer förbruka lika mycket energi som BIM Energy kommer beräkna.

Värden för kylmaskinen är enligt Figur 16.

Kylmaskin

Driftpunkt 1	Driftpunkt 2
Utetemperatur 10 °C	Utetemperatur 30 °C
Kylfaktor 3,5	Kylfaktor 3,5
Frikyla under utetemperatur 20 °C	
Elenergi cirkulationspumpar och fläktar 0 % av kylenergi	
Max RH i rumsluft 100 %	

Begränsning av kyleffekt

Aktivera 5000 W

Figur 16. Egenskaper för kylmaskin

7.2 PVGIS

För att ta reda på hur produktionen av sol-el varierar under året har programmet PVGIS använts. Under fliken grid-connected visar programmet den genomsnittliga producerade solenergin per månad under ett år. Programmet gör det även möjligt att bestämma om solpanelerna ska vara integrerade i byggnaden, eller om de ska vara fristående. Det finns också en funktion som simulerar den mest optimala vinkeln, både horisontellt och vertikalt, för solpanelerna. Detta går även att skriva in manuellt.

Indata till PVGIS, grid connected, är följande:

- Vald plats på karta, 55.765, 13.323. Gårdstånga, Lund
- Solar radiation database, PVGIS-SARAH. Denna databas är rekommenderad för det område som ska studeras.
- Toppeffekten sätts till 1 kW_p.
- Systemförlusterna sätts till 14 %. Programmet förslår det här värdet, men säger även att det bör sänkas en aning ifall riktigt högeffektiva solceller ska användas.
- De solceller som används är Crystalline Silicon.
- Det är inte bestämt om solcellerna ska vara fristående eller om de ska vara integrerade i taket. Eftersom de fristående solcellerna är mer beprövade, och även billigare, väljs detta alternativ.
- Vinkeln, räknat från söder, som valts för byggnaden är -20 grader, se Figur 18. Solpanelerna kommer alltså vara riktade mot syd/sydväst. Enligt PVGIS ska byggnaden rotera 3 grader från söder, för att optimera produktionen av solenergi, se Figur 17. Dock är skillnaden mellan de olika positionerna relativt liten, och därför hamnar valet på att rotera byggnaden -20 grader från söder. Detta gör att byggnaden står parallell mot Flyingevägen, vilket är mer tilltalande rent estetiskt.
- Vinkeln för taket är satt till 39 grader. Enligt PVGIS är 39 grader den mest optimala vinkeln för att gynna solcellernas elproduktion. Enligt planbeskrivningen skulle dock taket ligga mellan 40 – 45 grader.



Figur 17. Byggnadens positionering, 3 grader från söder



Figur 18. Byggnadens positionering, -20 grader från söder

8 Resultat av BIM Energy och PVGIS

8.1 Resultat från BIM Energy

I det här avsnittet presenteras resultatet av de simuleringar som gjorts i BIM Energy. I Tabell 21 kan nyckeltalen för byggnaderna ses. Nyckeltalen används främst till beräkningar för kraven hos BBR och FEBY 18. Avgiven och tillförd energi ingår i energibalansen och kan ses i Tabell 22. Tabell 23 summerar energibehovet och den faktiska energitillförseln.

Tabell 21. Nyckeltal för byggnaden i BIM Energy

Nyckeltal	Värde	Enhet
A_{temp}	400	m ²
Omslutningsarea	694,12	m ²
Värmepump ur drift pga temperaturer utanför intervallet	237	h
Luftläckage vid 50 Pa	214,85	l/s
Luftläckage vid 50 Pa	0,31	l/s, m ²
U-medelvärde	0,16	W/m ² , K
Ventilation, medelvärde	0,43	l/s, m ²
Formfaktor	1,74	-

Tabell 22. Resultatposter för byggnaden i BIM Energy

Resultatpost	Totalt
Avgiven Energi (kWh)	
Transmission	14 379
Luftläckage	2 191
Ventilation	37 558
Spillvatten	9 986
Kyla	2 988
Tillförd energi (kWh)	
Återvinning ventilation	18 552
Värmeåtervinning värmepump	9 783
Solenergi genom fönster	6 050
Värmeförsörjning	287
Elförsörjning Totalt	7 307
Latent Energi	8 760
Personvärme	4 452
Processenergi rum	11 914

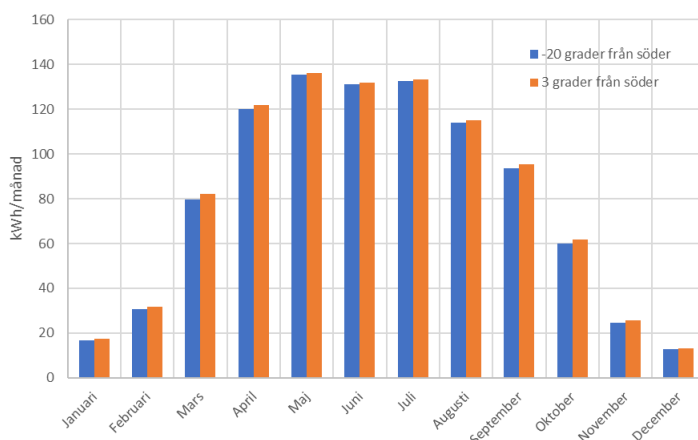
Tabell 23. Energiförbehovet för byggnaden i BIM Energy

	kWh
Värmeförsörjning	
Rumsluft	0
Ventilation	0
Tappvarmvatten	287,34
=	287,34
Värmeförsörjning från värmepump	

Rumsluft	3 140,18
Ventilation	21,01
Tappvarmvatten	10 401,48
=	13 562,67
Summa värmeförsörjning	
Rumsluft	3 140,18
Ventilation	21,01
Tappvarmvatten	10 688,82
=	13 850,00
Kylförsörjning totalt	
Rumsluft	2 065,61
Sensibel kylning av rumsluft	2 065,61
Tilluft	446,00
Sensibel kylning av tilluft	445,73
Latentkylning av tilluft	0,26
=	2 511,61
Elförsörjning totalt	
El värmepump	3 780,38
El kylmaskin	477,02
El tilluftsfläktar	1 326,13
El frånluftsfläktar	1 159,02
El cirkulationspump, värme	564,2
Verksamhetsenergi internt	11 913,6
Fastighetsenergi externt	401,5
=	19 621,85

8.2 Resultat från PVGIS

I Figur 19 kan elproduktionen från solcellerna ses. De blå staplarna visar elproduktionen när byggnaden är roterad -20 grader från söder, medan de röda staplarna visar produktionen när byggnaden är roterad 3 grader från söder. Byggnaden för det här projektet kommer att roteras -20 grader från söder, det andra alternativet är PVGIS eget förslag för optimerad produktion. Störst skillnad i elproduktion är det under vår och höst, medan skillnaden är minimal i december. Totalt sett är skillnaden liten. Med hjälp av dessa värden matchas sedan produktionen till konsumtionen, för fall B och C.



Figur 19. Elproduktion från PVGIS

9 Fallstudie

9.1 Fall A, kopplad till elnätet

9.1.1 Förutsättningar

I fall A är flerbostadshuset kopplade till elnätet. Detta är den traditionella lösningen och det här blir ett jämförelse-fall till off-grid lösningarna i fall B och C. Huset som ritats upp i BIM Energy är kopplat till elnätet. Krafringen vill tillsammans med GMR komma ner till 56 % av BBR:s krav. Eftersom husen i de senare fallen ska prövas för olika off-grid lösningar, är det viktigt att byggnaderna är välisolerade och lufttäta. Därför ska byggnaderna även testas mot kraven i FEBY 18 för passivhus. Detta är dock inget kriterium från GMR eller Krafringen, utan något som bestämts för det här examensarbetet. Samtliga kostnader som nämns är exklusive moms.

Hushållselen dimensioneras till 12 000 kWh/år och byggnad (BEN2)

9.1.2 Avgränsningar

Eftersom flerbostadshuset inte är färdigritade, blir det svårt att beräkna vissa krav från FEBY 18. Till exempel så gäller solvärmelastkravet för det mest utsatta rummet. Eftersom det inte finns någon färdig planlösning har kravet inte beräknats, då resultatet anses bli för osäkert. Ljudnivån är också svår att kontrollera, eftersom mätningar på plats krävs. I fall A har ingen hänsyn till solceller tagits, detta för att få fram om byggnaden i sig klarar BBR:s alla krav. Primärenergitalet, som är ett av kraven hos BBR, syftar på köpt energi. Detta innebär att all egenproducerad el som används av producenten kan dras bort, och därmed få ett lägre primärenergital. Om all el var egenproducerad, skulle primärenergitalet vara noll oavsett hur bra eller dålig byggnaden är i sig.

I fall A läggs inte något värdringspåslag till på beräkningarna.

9.1.3 Beräkningar

9.1.3.1 Beräkningar av krav för byggnaden i BIM Energy

I Tabell 24 kan en sammanställning av jämförelsen med BBR:s krav och byggnadens värde ses, BBR:s krav ses i Tabell 7 sen tidigare. Kraven för passivhus enligt FEBY 18 åskådliggörs i Tabell 25.

Tabell 24. Jämförelse av BBR:s krav och byggnadens värde

	BBR:s krav	Byggnad	56 % av kraven	Godkänd/icke godkänd
Genomsnittlig värmegenomgångskoefficient, U_m [W/m ² , K]	0,4	0,16	-	Godkänd
Installerad eleffekt för uppvärmning [kW]	11,25	3,7 ⁽¹⁾	-	Godkänd

Självförsörjande flerbostadshus, Energilagring med hjälp av vätgas och batterier

Energieffektivitet uttryckt som primärenergital [kWh/m ² A _{temp} och år]	75	41 ⁽²⁾	42	Godkänd
Klimatskärmens genomsnittliga luftläckage vid 50 Pa tryckskillnad (l/s m ²)	-	0,31	-	Godkänd

- (1). Se beräkningar under rubriken ”Beräkningar för installerad eleffekt för uppvärmning”.
- (2). Se beräkningar under rubriken ”Beräkningar för primärenergitalet”.

Tabell 25. Jämförelse av FEBY:s krav och byggnadens värde

	FEBY18, passivhus	Byggnad	Nivå
Levererad el till byggnad för uppvärmning, tappvarmvatten och fastighetsenergi [kWh/m ²]	Brons, 38 Silver, 32 Guld, 26	16	Guld
Värmeförlusttal [W/m ² , A _{temp}]	Brons, 23,8 Silver, 20,8 Guld, 15,8	21 ⁽¹⁾	Brons
Luftläckage [l/s, m ²]	0,3	≈0,3	Godkänd

- (1). Se beräkningar under rubriken ”beräkningar för värmeförlusttal”

Beräkningar för installerad eleffekt för uppvärmning

För att beräkna installerad eleffekt för uppvärmning används ekvationerna från avsnitt 2.4.

Antal fönster samt deras omkrets kan ses i Tabell 26. BIM Energy har även lokaliserat de linjära köldbryggorna och i Tabell 27 kan längden på dessa ses. Arean för respektive byggnadsdel kan ses i Tabell 28. Psi-värden och U-värden är tagna Tabell 15 och Tabell 17. Innetemperaturen är 21 °C och den dimensionerande utetemperaturen sätts till -11,4 °C enligt (Boverket och SMHI, 2017).

Transmissionsförlusterna Q_t är beräknad enligt ekvation 8 nedan.

$$Q_{\text{köldbryggor}} = (0,04 \cdot 20,8) + (0,07 \cdot 57) + (0,04 \cdot 57) + (0,04 \cdot 57) + (0,03 \cdot 215,2) \approx 15,8 \text{ W/K}$$

$$\sum U_j \cdot A = (0,8 \cdot 46,74) + (0,14 \cdot 200) + (0,08 \cdot 249,66) + (0,08 \cdot 200) \approx 101,4 \text{ W/K}$$

$$Q_t = 15,8 + 101,4 \approx 117 \text{ W/K}$$

För att beräkna Q_v görs några förenklingar. Ventilationsförlusterna q_{vent} och $q_{\text{läckage}}$ är okända parametrar. BIM Energy beräknar transmissionsförluster, ventilationsförluster

och återvinning från ventilationsluften i kWh. Med hjälp av förhållandet mellan dessa kan ventilationsförlusterna beräknas i W/K.

$$\frac{14\,376}{37\,558 - 18\,552} = \frac{117}{Q_v}$$

$$Q_v \approx 155 \text{ W/K}$$

Gratisenergi beräknas med ekvation 10 nedan:

$$P_{\text{gratis}} = \frac{9\,000\,000}{8760} \cdot 5 \approx 5\,137 \text{ W}$$

Slutligen beräknas den installerade eleffekten enligt ekvation 6:

$$P = (155 + 117)(21 - (-11,4)) - 5137 \approx 3\,675 \text{ W} \approx 3,7 \text{ kW}$$

Tabell 26. Antal fönster och dess omkrets

Väderstreck	Antal fönster [st]	Omkrets/fönster [m]
Öst	12	3,7
Väst	12	3,7
Söder	16	4,2
Norr	16	3,7

Tabell 27. Köldbryggor mellan byggnadsdelar

Köldbrygga	Längd [m]
Yttervägg/Yttervägg	20,8
Yttervägg/platta på mark	57
Yttervägg/tak	57
Yttervägg/mellanbjälklag	57
Fönster och dörrar	215,2

Tabell 28. Area för olika byggnadsdelar

Byggnadsdel	Area [m ²]
Ytterväggar	249,66
Golv	200
Tak	200
Fönster och dörrar	46,74

Beräkningar för primärenergitalet

Värmeförsörjningsbehovet för byggnaden är 13 850 kWh/år, varav 10 689 kWh/år är tappvarmvattenbehovet. Värmepumpen behöver 3 780 kWh/år för att uppnå det totala värmeförsörjningsbehovet. E_{tvv} blir alltså följande:

$$E_{\text{tvv}} = \frac{10\,689}{13\,850} \cdot 3\,780 = 2\,917 \text{ kWh/år}$$

E_{upp} är resterande energibehov för värmepumpen enligt följande:

$$E_{upp} = 3\,780 - 2\,917 = 863 \text{ kWh/år}$$

I fastighetsenergin ingår till- och frånluftsfläktar, cirkulationspump samt den externa fastighetsenergin såsom fast belysning i allmänna utrymmen. Fastighetsenergin blir följande:

$$E_f = 1\,326 + 1\,159 + 564 + 401 = 3\,450 \text{ kWh/år}$$

E_{kyl} sätts till 477 kWh/år. V_f är 1,8 enligt Tabell 8 och F_{geo} är 0,9 för Lund, men på grund av att A_{temp} är större än 130 m² sätts F_{geo} till 1. Primärenergitalet blir beräknas med hjälp av ekvation 16:

$$EP_{pet} = \frac{(863+477+2\,917+3\,450) \cdot 1,8}{400} + (0,025 + 0,02(1 - 1)) \cdot (400 - 130) \approx 41 \text{ kWh/(m}^2, A_{temp})$$

Beräkning av värmeförlusttal

Ekvationerna som används är tagna från avsnitt 2.2.2. Omslutningsarean är tagen från Tabell 21.

Eftersom $Q_v = 155 \text{ W/K}$ kan värmeförlusttalet beräknas med ekvation 1:

$$VFT_{DVUT} = \frac{(0,16 \cdot 694,12 + 155) \cdot (21 - (-11,4))}{400} \approx 21,55 \text{ W/m}^2, A_{temp}$$

9.1.3.2 Kostnader

En vanlig lägenhetskonsument betalar cirka 1,5 – 2 kr/kWh. I Tabell 29 beräknas kostnaden för att vara uppkopplad på elnätet under en 10 års period. Anslutningsavgiften till elnätet beräknas kosta cirka 50 000 kr.

Tabell 29. Kostnad för fall A

Elpris [kr/kWh]	1,5 – 2
Anslutningsavgift [kr]	50 000
1 byggnad	
Årlig energiförbrukning [kWh]	20 000
Kostnad efter 10 år [kr]	350 000 - 450 000
7 byggnader	
Årlig energiförbrukning [kWh]	140 000
Kostnad efter 10 år [kr]	2 450 000 - 3 150 000

9.1.3.3 Koldioxidekvivalenter

För att ta reda på hur stor miljöpåverkan det blir av att vara uppkopplad på elnätet, kan koldioxidekvivalenter användas. Den svenska elmixen är 47 g CO₂/kWh, medan den nordiska elmixen ligger på 125 g CO₂/kWh (avsnitt 3.1) I Tabell 30 beräknas miljöpåverkan för elanvändningen till byggnaden efter 10 år. Koldioxidekvivalenterna beräknas både med svensk och med nordisk elmix.

Tabell 30. Koldioxidkvivalenter för fall A

Svensk elmix [g CO ₂ /kWh]	≈50
Nordisk elmix [g CO ₂ /kWh]	125
1 byggnad	
Årligt energibehov [kWh]	20 000
Koldioxidkvivalenter 10 år, svensk elmix [kg CO ₂ e]	10 000
Koldioxidkvivalenter 10 år, nordisk elmix [kg CO ₂ e]	25 000
7 byggnader	
Årligt energibehov [kWh]	140 000
Koldioxidkvivalenter 10 år, svensk elmix [kg CO ₂ e]	70 000
Koldioxidkvivalenter 10 år, nordisk elmix [kg CO ₂ e]	175 000

9.1.4 Analys och diskussion av fall A

De uppbyggda flerbostadshusen i BIM Energy klarar BBR:s krav samt de flesta kraven för passivhus enligt FEBY 18. En av parametrarna vid off-grid byggnationer är att bygga så energismart som möjligt och husen i Gårdstånga är byggda på ett energieffektivt sätt. De bör alltså ha goda förutsättningar att bli ett off-grid boende och i de två senare fallen ska dessa möjligheter utredas.

Solvärmelast

Solvärmelastkravet från FEBY 18 var ett av de krav som inte beräknades i det här projektet. Passivhus är välisolerade, vilket innebär att värmen inte ska läcka ut. Eftersom fönster släpper in solvärme, är solvärmelast i allra högsta grad en viktig parameter att ta hänsyn till för att slippa övertemperatur. Flerbostadshusen i Gårdstånga behöver kyla bort cirka 2 500 kWh per år enligt simuleringen i BIM Energy. Börvärdet för högsta tillåtna temperaturen är satt till 26 °C. Byggnaden är utrustad med aktiv kylning, vilket innebär att all överskottsvärme kan kylas bort. Dock planeras det att installeras utvändigt solskydd i form av markiser. Detta ska, enligt BEN2, kunna ta bort upp till 30 % av den instrålade solvärmens. Den överskottsvärmen som behöver kylas bort kommer från bland annat solinstrålning, personvärme och avgiven värme från elektronik. Personvärme och avgiven värme från elektronik är svår att göra något åt, medan de utvändiga markiserna kan reducera solinstrålningen. På grund av detta behöver inte kylsystemet kyla bort exakt 2 500 kWh, utan siffran blir antagligen lägre.

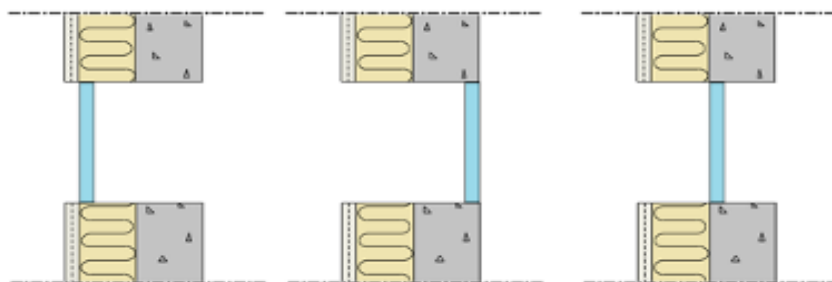
Konflikten mellan solvärmelast och dagsljuskrav

Vid uppbyggnaden av flerbostadshusen i Gårdstånga uppmärksammades konflikten mellan solvärmelast och dagsljuskravet. Dagsljuskravet säger att fönsterarean ska vara minst 10 % av golv-arean. Från ett dagsljus-perspektiv är det bra att ha mycket fönster. När det kommer till solvärmelast och övertemperatur är det inte bra att ha en allt för stor fönsterarea, eftersom mer fönster ger mer gratisvärme. Det gäller att ha tillräckligt stora fönster för att klara dagsljuskravet, men inte för stora så att övertemperatur riskeras. Eftersom husen inte är färdigritade, är det svårt att beräkna dagsljuskravet. Ett försök till beräkning gjordes för att få någon form av riktlinje och enligt den klarar byggnaden dagsljuskravet. Däremot blev byggnaden övertempererad om inte aktiv kylning användes.

Fönsterplacering i BIM Energy

Väggarna i den här byggnaden är 500 mm tjocka. Det står inte någonstans i BIM Energy vart fönstret placeras i förhållande till väggen. Det får dock antas att de placeras på ett gynnsamt sätt för att undvika alltför stora köldbryggor. I Figur 20 kan förslag på lite olika fönsterplaceringar ses. Väggen har utvändig isolering. Om fönstret skulle placeras som på mittenbilden, skulle en del av betongen vara helt utan isolering och därmed skapa en enorm köldbrygga. Beroende på var fönstret placeras kommer byggnaden att få väldigt djupa fönsternischer. För att få en slankare konstruktion, men ändå behålla den isolerande förmågan, hade till exempel vakuumisolering kunnat användas (Adalberth, 2021). Vakuumisolering är dock dyrare än vanlig mineralull och det krävs kunskap kring monteringen då det räcker med ett hål i vakuumisoleringen för att den ska förlora sin effekt.

I BIM Energy går det endast att välja total fönsterarea eller andel fönsterarea för respektive vägg. Det går alltså inte att bestämma själv hur stora eller hur många fönster det ska vara på byggnaden. Storlek samt andel fönster spelar roll för till exempel köldbryggor. Dock bedöms det att detta inte kommer spela allt för stor roll i slutresultatet.



Figur 20. Exempel på fönsterplaceringar

Osäkerheter och felkällor

Många av värdena som är införda i BIM Energy är uppskattningar och förenklingar. De börvärden som är införda baseras på krav, rekommendationer och genomsnittliga värden. Till exempel har det antagits att 2,18 personer bor i varje lägenhet samt att de är hemma 14 h per dygn, vilket är beräkningsmodellen enligt BBR för en genomsnittlig trea. Dessutom är det inte säkert att alla lägenheter kommer att vara treor, utan någon kanske kommer att bli en fyra. Beroende på hur många personer som bor i lägenheterna samt deras brukarbeteende, kan förbrukningen vara mer eller mindre än det som BIM Energy beräknar.

Utformningen på byggnaden blir också en osäkerhet, eftersom den riktiga byggnaden i projektet inte är färdigritad. I BIM Energy har inte taket tagits med. Takvinkeln spelar ingen nämnvärd roll för energiberäkningarna eftersom det ändå ska vara en kallvind. Dock har takvinkeln bestämts till 39 grader. Med dessa mått skulle takhöjden bli cirka 5 meter. Detta innebär att taket kommer bli ungefär lika högt som båda våningarna tillsammans. Med tanke på att solceller ska placeras på taket i de senare fallen, är det bra att taket har den här vinkeln. Dock blir det väldigt mycket volym som inte används,

vilket kan ses som slöseri av byggnadsmaterial. Ett alternativ hade varit att dra ner taket en bit och därmed få lite snedtak på övervåningen. För energiberäkningarna innebär detta att uppvärmningsvolymen minskar.

BIM Energy är ett förenklat program, vilket innebär att det är många små detaljer som inte går att redigera. För att få mer exakta beräkningar hade till exempel simuleringsprogrammet IDA ICE kunnat användas. Detta valdes dock bort tidigt i processen, eftersom flerbostadshusen i Gårdstånga inte var färdigritade och därmed skulle IDA ICE bli svårt att använda. Fördelen med BIM Energy är att det redan finns färdiga modeller, vilka kunde matchas med de krav och riktlinjer som tilldelats från projektet.

En del värden har kontrollräknats för hand, till exempel U-medelvärde och U-värde för vägg.

Köldbryggorna som beräknats av BIM Energy är linjära. Det har alltså inte räknats på någon punktformig köldbrygga. Det kan finnas punktformiga köldbryggor, men detta undersöks inte närmare.

9.2 Fall B, Off-grid lösning med endast batterilagring

9.2.1 Förutsättningar.

I fall B kommer en kombination av solceller och batterier undersökas för möjlighet att vara helt off-grid gällande energibehovet under hela året. Elen produceras genom solceller på taket och vid behov kan bullervallen utnyttjas för kompletterande solceller för att matcha den årliga elkonsumtionen. Den el som inte nyttjas momentant kommer lagras i batterier. Uppvärmning av tappvarmvatten och golvvärme kommer ske med hjälp av en eldriven värmepump. Byggnadernas egenskaper är densamma som i fall A. Primärenergitalet blir dock noll, eftersom all energi produceras och konsumeras av de boende, dvs ingen energi köps in.

Genom att vara självförsörjande över hela året behöver energi lagras från sommarhalvåret till vintern då dagarna är kortare och energiförbrukningen ökar. Då projektets systemlösning endast räknar på solceller som elproduktion kommer den mesta elen att produceras under sommarhalvåret.

Batterierna som används är litiumbaserade. Anledning till att dessa har valts är på grund av att de har bättre energidensitet och bättre livslängd. Vikt, livslängd och kostnad för batterierna hämtas ifrån Tesla, Northvolt, Vattenfall och Powercircle. Verkningsgraden för batterierna ligger kring 90 % enligt energihandboken. Alla batterier har en viss självurladdning och självurladdningen i det här projektet antas till cirka 3 % per månad.

GMR planerar att varje lägenhet ska ha en tillhörande parkeringsplats med möjlighet till elbilsladdning. Därför kommer två olika scenarion att simuleras. Dels utan hänsyn till

elbilsladdning och dels med hänsyn till om varje lägenhet skulle ha en elbil, det vill säga 5 elbilar per byggnad.

Samtliga kostnader som nämns är exklusive moms.

9.2.2 Avgränsningar

PVGIS beräknar total elproduktion per månad och inte per dygn, som annars hade varit önskvärt. Dessutom beräknar PVGIS en medelproduktion per månad, eftersom vädret kan skilja sig från år till år. Genom att dividera antalet dagar med elproduktionen fås ett dygnsmedelvärde. Dygnsmedelvärdet antas uppnås i mitten på månaden och mellan månadernas olika dygnsmedelvärde antas linjära samband.

Både elproduktion och elförbrukning är uppskattade värden, i verkligheten varierar dessa från dag till dag. Dessa variationer tas inte hänsyn till, eftersom det är svårt att förutse både väder och brukarbeteende. Dock anses de uppskattade värdena kunna representera ett dagligt genomsnittligt värde.

Hushållselen, fastighetsselsel, el till elbilar antas ha en jämn förbrukning över året. Vädning fördelas jämnt mellan 1 oktober 31 mars.

Varje byggnad har tillgång till 5 parkeringsplatser med möjlighet till elbilsladdning. I nuläget är det kanske rimligt att anta att det kommer finnas 1 eller 2 elbilar per byggnad. Men i examensarbetet studeras fallen 0 respektive 5 elbilar.

Batterier kräver ett tempererat utrymme för att optimera prestanda och livslängd. Detta är ingenting som kommer tas hänsyn till. Andra komponenter samt teknikum som behöver eventuell uppvärmning har inte tagits hänsyn till.

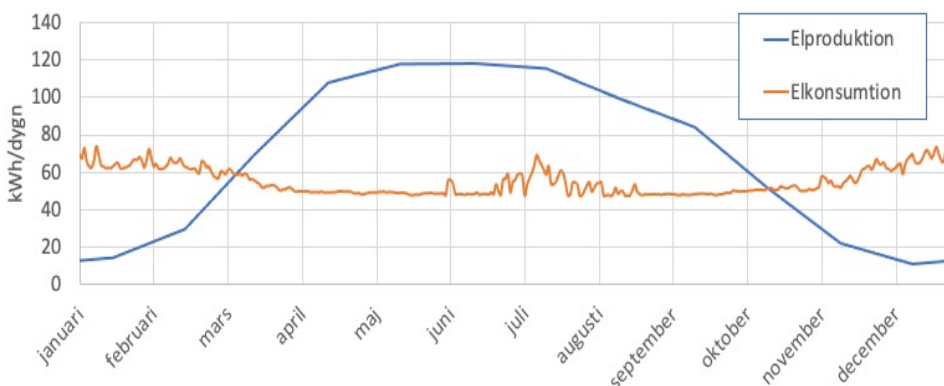
9.2.3 Beräkningar

9.2.3.1 Dimensionering av systemlösning

Alla beräkningar görs i Excel. Beräkningarna nedan gäller för 1 byggnad.

Producerad solenergi över året hämtas från PVGIS och kan ses i Figur 19 under avsnittet ”Resultat från PVGIS”. Indata kring det dagliga elbehovet för byggnaderna exporteras från BIM Energy till Excel. Under avsnittet ”resultat från BIM Energy” kan det totala elbehovet ses. Fastighetselen avrundas från 401,5 kWh till 400 kWh och hushållselen avrundas från 11 913,6 kWh till 12 000 kWh. Utgångspunkten har varit att hushållselen ska ligga på 2 400 kWh/lägenhet, vilket blir 12 000 kWh per byggnad enligt BEN2. I BIM Energy kan förbrukningen endast skrivas in i W/m^2 , och inte förbrukning per lägenhet. Skillnaderna mellan avrundningarna är marginella i förhållande till avgiven energi. Utöver indata från BIM Energy läggs även vädning till. Det rekommenderade vädningsspåslaget är $4 kWh/m^2$, år (se avsnitt 2.9.6 om vädning). Eftersom vädning är ett brukarbeteende är det svårt att veta hur dessa kWh fördelar sig över året. Den vädning som görs på sommaren, behöver inte kompenseras eftersom det bara är överskottsvärme

som vädras ut. Det antas alltså att människor ej vädrar när det är varmare ute än inne, utan bara på kvällar/nätter. Däremot behöver extra värme tillföras om vädringen sker under uppvärmningssäsongen. I Excel har därför 23 en fördelats jämnt mellan 1 oktober och 31 mars. Detta är en grov uppskattning. Dimensioneringen av solcellsanläggningen matchas för att klara byggnadens energibehov. Figur 21 visar hur elproduktion och elkonsumtion över ett år förhåller sig till varandra.



Figur 21. Förhållandet mellan produktion och konsumtion för fall B

Lagringsbehovet för byggnaden tas fram genom att beräkna det största ackumulerade överskottet under året. Det största ackumulerade överskottet är cirka 7 700 kWh, vilket ska lagras i batterier. De batterier som ska användas är, som tidigare nämnt, litiumbaserade batterier med en verkningsgrad kring 90 % samt en självurladdning på cirka 3 % per månad. Detta innebär att en del av den energin som lagras i batterierna kommer att gå till spillo. För att få ut 7 700 kWh, krävs det alltså ett högre ackumulerat överskott. Det är viktigt att nämna att dessa kWh är för långtidslagring. De kWh som produceras på morgonen, men används på kvällen, syns inte i det ackumulerade överskottet. En del el används direkt, en del el lagras i batterierna i mindre än ett dygn och en del el lagras i 6 månader. Därför är det svårt att ta fram en total systemverkningsgrad. Den el som används direkt eller inom ett dygn är drygt en tredjedel av årets förbrukning. Med en diskussion tillsammans med Bengt Sundén och information från Teslas Powerpack, görs en förenkling och den genomsnittliga verkningsgraden sätts till 80 %. Den totala energin som behöver produceras är 25 700 kWh och batterierna behöver en lagringskapacitet på 7 700 kWh.

Storleken på solcellsanläggningen beräknas till minst 27 kWp, vilket motsvarar 135 m² om panelerna har en effekt på 200 W/m². Alla solceller beräknas få plats på taket.

Beräkning med fem elbilar

Det scenario som beräknats ovan tar inte hänsyn till några elbilar. Motsatsen till inga elbilar skulle vara om varje lägenhet hade varsin elbil, dvs totalt fem stycken elbilar per byggnad. En elbil antas förbruka 2 400 kWh per år och detta läggs in som en egen punkt i Excel. Förbrukningen fördelas jämnt över årets alla dagar. Resterande beräkningar görs på samma sätt som ovan.

Den totala energin som behöver produceras blir 41 000 kWh och batterierna behöver en lagringskapacitet på 11 300 kWh. Storleken på solcellsanläggningen beräknas till minst 43 kW_p, vilket motsvarar 215 m² om panelerna har en effekt på 200 W/m².

I Tabell 31 kan en sammanfattning av båda scenariona ses, dvs med och utan elbilar.

Tabell 31. Solcellernas egenskaper för fall B

Batterilagring	Produktion [kWh]	Konsumtion [kWh]	Max lagring [kWh]	Solceller [kW _p]	yta solceller [m ²]
0 elbilar	25 700	20 000	7 700	27	135
5 elbilar	41 000	32 000	11 300	43	215

9.2.3.2 Dimensionering av batterilagringen

För att ta fram hur stor plats själva batterilagringen kräver, kommer tre olika batterilösningar från tre olika leverantörer att beräknas. De olika batterilösningarna som ska jämföras är Northvolts Voltpack, Teslas Powerpack samt Vattenfall/Boliden Bergsöe. Värderna för varje batterilösning är hämtad från teorin, avsnitt 3.5, och resultatet kan ses i Tabell 32. Mellanrum mellan modulerna har inte tagits hänsyn till. Det har också antagits att Northvolts moduler kan staplas på varandra två och två. Teslas omvandlarmodul har inte heller räknats med.

Tabell 32. Dimensionering av batterilager enligt Northvolt, Tesla och Vattenfall

	Northvolt	Tesla	Vattenfall
Area per modul [m ²]	3,2	1,3	14,8
Batterikapacitet per modul [kWh]	245	232	890
Vikt per modul [kg]	< 3 000	2 199	15 000
1 byggnad, 0 elbilar			
Antal moduler som krävs [st]	32	33	9
Total area för batterilagring [m ²]	51	43	133
Total vikt för batterilagring [ton]	96	72,6	135
1 byggnad, 5 elbilar			
Antal moduler som krävs [st]	46	49	13
Total area för batterilagring [m ²]	74	64	192
Total vikt för batterilagring [ton]	138	107,8	195
7 byggnader, 0 elbilar			
Antal moduler som krävs [st]	219	231	61
Total area för batterilagring [m ²]	350	300	903
Total vikt för batterilagring [ton]	657	508	915
7 byggnader, 5 elbilar/byggnad			

Självförsörjande flerbostadshus, Energilagring med hjälp av vätgas och batterier

Antal moduler som krävs [st]	322	340	89
Total area för batterilagring [m ²]	515	442	1 317
Total vikt för batterilagring [ton]	966	748	1 335

9.2.3.3 Kostnader

Enligt Powercircle beräknas kostnaden för batterilagring i elnätsapplikationer ligga mellan 200 - 600 \$/kWh (se avsnitt 3.1) och det årliga lagringsbehovet för en byggnad är cirka 7 700 kWh samt 11 300 kWh, beroende på om hänsyn till elbilar tagits eller inte. Solpanelerna beräknas kosta 350 000 kr/byggnad utan hänsyn till elbilar, enligt Kraftringen. Med hänsyn till elbilar kommer solpanelerna kosta cirka 500 000 kr/byggnad.

I Tabell 33 kan de beräknade priserna för batterianläggningen ses. Priserna är avrundade.

Tabell 33. Kostnad för batterilagring

	1 byggnad, 200 \$/kWh	1 byggnad, 600 \$/kWh	7 byggnader, 200 \$/kWh	7 byggnader, 600 \$/kWh
0 elbilar	12,5 miljoner kr	40 miljoner kr	85 miljoner kr	290 miljoner kr
5 elbilar	18 miljoner kr	60 miljoner kr	125 miljoner kr	425 miljoner kr

Om batterierna planeras hålla i 10 år blir genomsnittskostnaderna ur ett livscykelperspektiv mellan 55 och 200 kr/kWh baserat på en årlig elkonsumtion enligt Tabell 31.

9.2.3.4 Koldioxidekvivalenter

Koldioxidekvivalenterna för fall B ses i Tabell 34. Det antas att batterierna har en medellivslängd på 10 år. Solcellerna har ett genomsnittligt utsläpp på cirka 30 g CO₂e/kWh under dess livslängd.

Tabell 34. Beräkning av koldioxidekvivalenter för batterierna i fall B för 10 år.

Litiumbaserade batterier [kg CO ₂ e /kWh]	61–146 (100 används i beräkningarna)
Solceller [g CO ₂ e/kWh]	30
1 byggnad, 0 elbilar	
Lagringskapacitet [kWh]	7 700
Årlig producerad el från solceller [kWh]	25 700
Koldioxidekvivalenter för batterierna + el, 10 år [kg CO ₂ e]	780 000
1 byggnad, 5 elbilar	
Lagringskapacitet [kWh]	11 300
Årlig producerad el från solceller [kWh]	41 000
Koldioxidekvivalenter för batterierna + el, 10 år [kg CO ₂ e]	1 140 000
7 byggnader, 0 elbilar	
Lagringskapacitet [kWh]	54 000
Årlig producerad el från solceller [kWh]	180 000
Koldioxidekvivalenter för batterierna + el, 10 år [kg CO ₂ e]	5 500 000
7 byggnader, 5 elbilar/byggnad	

Lagringskapacitet [kWh]	80 000
Årlig producerad el från solceller [kWh]	286 000
Koldioxidkvalanter för batterierna + el, 10 år [kg CO ₂ e]	8 000 000

9.2.4 Analys och diskussion av fall B

Batterisystemens vikt och storlek för projektet i Gårdstånga

Resultatet av beräkningarna från fall B visar att det krävs en hel del batterier för att flerbostadshusen i Gårdstånga ska kunna bli helt off-grid. Tre stycken olika litiumbaserade batterier från olika företag har testats. Northvolts batteri, Voltpack, är fortfarande under utveckling och enligt deras hemsida planeras den att tas i produktion år 2021. Batteriernas storlek samt egenskaper är taget från företagets hemsida. Information kring Teslas batterisystem, Powerpack, är hämtat från Teslas hemsida. Dock verkar deras värde på energikapacitet vara bättre på hemsidan än vad det är i ett referensprojekt. Referensprojektet ligger vid Forshuvuds vattenkraftverk i Borlänge. Referensprojektet består av 39 moduler med en samlad kapacitet på 6,2 MWh, vilket ger en kapacitet på 160 kWh/modul jämfört med 232 kWh/modul som Teslas hemsida anger. Om värdena från referensobjektet skulle appliceras på byggnaderna i Gårdstånga skulle det krävas totalt 492 moduler istället för 340, för 7 byggnader och 5 elbilar per byggnad. Detta ger alltså en area på 640 m² istället för 442 m², samt en vikt 1 082 ton jämfört med 748 ton som beräknades först.

Resultatet som kan dras är att dimensioneringen av batterilagret är väldigt osäker. Värdena som anges på leverantörernas egna hemsidor är troligtvis teoretiska värden. För 7 byggnader och 5 elbilar kommer den totala arean för batterilagret att hamna någonstans mellan 450 - 1 320 m², dessutom tillkommer utrymme mellan modulerna för bland annat inspektion och underhåll. Den totala byggnadsarean för de 7 byggnaderna är tillsammans 1 400 m², vilket innebär att batterilagret nästan skulle ta lika stor plats som flerbostadshusen tillsammans. Detta anses som en icke-hållbar lösning.

Kostnad och livslängd för batterisystemen

Att beräkna kostnader för det här energisystemet är svårt då det finns mycket osäkerheter. Priserna enligt Powercircle beror bland annat på valutakurs, och därför anses priset kunna hamna någonstans mellan 85 – 290 miljoner kronor för 7 byggnader och 0 elbilar. Om hänsyn till elbilar tas kan priset istället hamna mellan 125 – 425 miljoner kronor. En annan parameter som är viktig att ta hänsyn till vid den ekonomiska frågan är batteri-systemens livslängd. Enligt Northvolt beräknas deras batterisystem att ha en livslängd på cirka 10 år, beroende på hur hårt systemet körs. Vattenfall beräknar, precis som Northvolt, att deras container-lösning ska hålla i cirka 10 år. Priserna i samband med en förhållandevis kort livslängd är inte ekonomiskt hållbart och detta anses inte som en bra lösning.

Miljöaspekter

Komponenterna för litiumbaserade batterier är inte en oändlig resurs, vilket innebär att återvinning och återbruk är otroligt viktigt. Eftersom återvinning av litiumbaserade batterier inte har kommit igång på riktigt i Sverige, är det svårt att bedöma hur bra eller dåligt det är att välja dessa batterier med hänsyn till miljön. Dock beräknas återvinningen

av just litiumbaserade batterier ta fart om några år, när det helt enkelt finns fler batterier att återvinna. Produktionen av litiumbaserade batterier är också svår att bedöma utifrån en miljösynpunkt, då det inte finns speciellt mycket data kring detta. Det släpps ut en del koldioxid vid tillverkningen, mellan 61 – 146 kg koldioxidekvivalenter per producerad kWh litiumbaserade batterier. Kina står också för den största andelen av kobolt i världen, som utvinns till stor del i Kongo, vilket innebär att materialet behöver fraktas långt om det ska till Sverige. Dessutom blir hela näringskedjan beroende av ett land, i det här fallet Kina. Dock pågår en hel del forskning om att ta fram nya batterier som inte kräver kobolt. Den stora frågan är egentligen om ett batterilager som detta i projekt är mer miljövänligt än att vara ansluten till elnätet. Med tanke på omfattningen av batterilagret, bör en vanlig traditionell uppkoppling vara mer miljövänlig. Beroende på om elnätet levererar el från en förnybar eller icke-förnybar energikälla, är uppkoppling mot elnätet mer eller mindre miljövänlig. Eftersom svensk elproduktion beräknas i snitt vara 47 g koldioxidekvivalenter per kWh. Detta innebär på ett ungefär att koldioxidutsläppen för batterilösningen släpper ut 78 gånger mer koldioxid än den vanliga energiproduktionen.

Osäkerheter i beräkningarna

Det finns en hel del osäkerhetsmoment kring beräkningarna, framförallt gällande batterierna. För det första har batteriernas genomsnittliga verkningsgrad antagits till 80 %. Detta är en uppskattning av både verkningsgrad och självurladdning. Batteriet tappar sin kapacitet med åren, vilket innebär att den inte kan lagra lika mycket. Om batterierna hade haft 100 % verkningsgrad hade lagringsbehovet hamnat på cirka 6 500 kWh, istället för 7 700 kWh (1 byggnad, 0 elbilar). Batterierna behöver vistas i en viss temperatur för att fungera optimalt, vilket innebär att det går åt energi för att hålla utrymmet varmt. Denna energiförbrukning är inte medräknat, som enligt vattenfall kan vara upp till 0,5 – 1 kW per container vilket också bidrar till en viss osäkerhet i beräkningarna.

Samtliga solpaneler är riktade åt samma håll, med samma vinkel, enligt beräkningsmodellen. I praktiken kommer de solpaneler som sätts på bullervallen vara mer vinklade åt sydväst, istället för mot syd-sydöst som de på taket. Detta innebär att elproduktionen kan se annorlunda ut i verkligheten. Även väder och klimat varierar över åren, vilket påverkar antalet producerade kWh per år.

Är endast batterilagring en bra lösning?

Det finns inte någon buffert för att klara av variationer över året, till exempel genom en kall vinter eller en regnig sommar med färre antal soltimmar än normalt. Vid val av systemlösning är det viktigt att ta hänsyn till denna buffert för att förhindra att elen tar slut. För att undvika elbrist kan byggnaderna anslutas till elnätet som en backup. Om samtliga byggnader ska dela på ett enda stort batterilager, eller om de ska ha enskilda lager kan diskuteras. Fördelen med ett gemensamt batterilager är att buffertkapaciteten inte behöver ha lika stor marginal, eftersom energikonsumtionen mellan byggnaderna kan variera. På detta sätt undviks det att ett batterilager står tomt, medan ett annat är fullt. Det blir också enklare att koppla in solcellerna på bullervallen till det gemensamma lagret. Fördelen med att ha separata system är att robustheten ökar. Om något batterilager skulle kortslutas eller få något annat problem, blir konsekvensen inte lika stor som om det hade funnits ett stort och det är bara den aktuella byggnaden som drabbas.

Är det rimligt att välja en systemlösning bestående av litiumbaserade batterier? För projektet i Gårdstånga anses detta inte lämpligt. Både ekonomiskt, miljö- och platsmässigt anses detta vara ett dåligt alternativ.

9.3 Fall C, Off-grid lösning med batteri- och vätgaslagring

9.3.1 Förutsättningar

I fall C ska en systemlösning bestående av vätgas och batterier studeras. Samma hus som i föregående fall har använts. Vätgastankar ska stå för den största långtidslagringen, medan batterierna blir ett komplement för att klara av dygnsvariationen. Batterierna antas vara litiumbaserade batterier, precis som i föregående fall. Verkningsgrad och självurladdning är också densamma. För att kunna använda vätgas som lagring av energi krävs en bränslecell och en elektrolysör. Bränslecellen är en PEM-bränslecell och denna väljs på grund av att den termiska värmen ligger runt 60 °C (se avsnitt 3.8). En SOFC-bränslecell är inte aktuell eftersom den måste komma upp i en temperatur på cirka 800 °C (se avsnitt 3.8.2). För att producera ett kilo vätgas krävs det 55 kWh, enligt Hans-Olof Nilsson. Från ett kilo vätgas går det sedan att utvinna 13 kWh el och 13 kWh värme. Elektrolysör och bränslecell är inte igång kontinuerligt utan programmeras efter hur laddade batterierna är och tillgång på solenergi.

Beräkningsmodellen för fall C är densamma som för fall B, frånsett att nettoöverskottet av el per dygn lagras i vätgas medan nettounderskottet kommer från en bränslecell. Precis som i fall B kommer två scenario att simuleras, ett scenario med 0 elbilar och ett scenario med 5 elbilar/byggnad. Eftersom vätgas har sämre verkningsgrad än batterier, kommer troligtvis fler solpaneler att behövas än vad som får plats på taket. Beräkningarna kommer dock förutsätta att samtliga solpaneler har samma lutning och vinkel.

Akkumulatortank för tappvarmvatten samt golvvärme planeras att överdimensioneras. Detta för att kunna nyttja så mycket termisk energi som möjligt från elektrolysör och bränslecell. Uppvärmning av tankarna sker direkt via solcellerna, istället för att ta omvägen via batterier och på så sätt kan högre total verkningsgrad uppnås. Exakt storlek på akkumulatortank är inte bestämt, utan får utredas av sakkunnig.

Då projektet i Gårdstånga består av sju stycken identiska byggnader, finns det flera sätt att utforma systemlösningen. Till exempel kan varje byggnad ha sitt eget system, med en egen bränslecell, elektrolysör och batterier. Alternativt att alla byggnader har ett gemensamt system, med en större dimensionerad bränslecell, elektrolysör och batterier. Vätgastankarna kan också delas upp, eller lagras på gemensamt ställe. Systemlösningen bestäms inte nu, utan diskuteras i analysen.

Samtliga kostnader som nämns är exklusive moms.

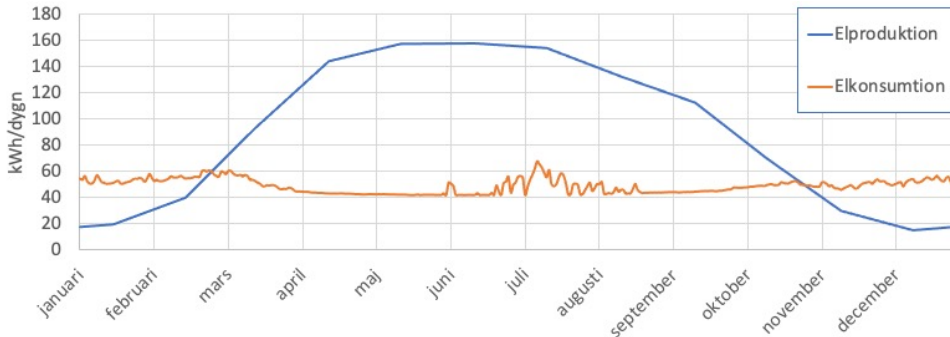
9.3.2 Avgränsningar

Avgränsningarna är desamma som för fall B.

9.3.3 Beräkningar

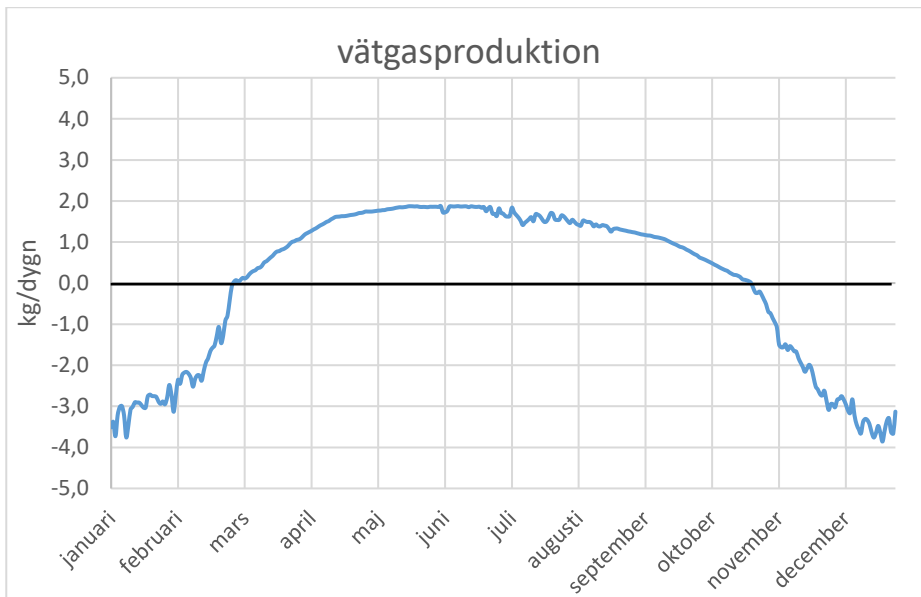
9.3.3.1 Dimensionering av systemlösningen

På samma sätt som i fall B har först elkonsumtionen och värmebehovet tagits fram, samt att den producerade solenergin hämtats från PVGIS. Förhållandet mellan dessa kan ses i figur 22. Alla beräkningar görs i Excel. Beräkningarna nedan är för 1 byggnad.



Figur 22. Elproduktion och konsumtion över året

Värmebehovet per dygn för tappvarmvatten och rumsuppvärmning separeras från den övriga elförbrukningen, detta för att kunna se hur mycket restvärme från elektrolysör och bränslecell som går att nyttja. Bränslecellen producerar el som används till värmepumpen, samtidigt som restvärmen kan täcka en del av det värmebehov som finns. Om all restvärme täcker hela värmebehovet, vilket den inte gör i verkligheten, behövs ingen värmepump och detta innebär att bränslecellen inte heller behöver producera någon el till värmepumpen. Därför krävs interpolering för att värmepump och bränslecell ska kunna komplettera varandra och maximal termisk restvärme utnyttjas. Resultatet av interpoleringen visas som överskott samt underskott dag för dag, och därmed kan produktion och konsumtion av vätgas tas fram. I Figur 23 kan vätgasproduktionen ses. När elproduktionen är större än elkonsumtionen produceras vätgas, och när produktionen är mindre förbrukas vätgas.



Figur 23. Vätgasproduktion över året

Det största ackumulerade överskottet av vätgas är 310 kg per byggnad, 0 elbilar. Detta innebär att solpanelerna behöver en topp effekt på 36 kWp, vilket motsvarar en area på 180 m².

Beräkning med fem elbilar

Scenariot med fem elbilar beräknas på samma sätt som ovan. Elbilar läggs till som en post i Exceldokumentet. Resultatet blir att solpanelerna kräver en topp effekt på 56 kWp, vilket motsvarar 280 m². Det största ackumulerade överskottet av vätgas hamnar på 460 kg.

I Tabell 35 kan en sammanfattning av båda scenarierna ses, det vill säga med respektive utan elbilar för en byggnad.

Tabell 35. Solcellernas egenskaper för fall C

Vätgasfall	Produktion [kWh]	Konsumtion [kWh]	Max lagring [kg]	Solceller [kWp]	yta solceller [m ²]
0 elbilar	34 200	17 700	310	36	180
5 elbilar	53 300	29 000	460	56	280

Då det krävs ca 11 liter vatten för produktion av 1 kg vätgas beräknas årskonsumtionen bli ca 3,5 till 5 m³ per byggnad och därmed 24 till 36 m³ för samtliga byggnader beroende på om hänsyn till elbilar tas eller ej.

9.3.3.2 Dimensionering av storlek

Via en mailkonversation har Nilsson Energy föreslagit en containerlösning för flerbostadshusen. Containern som föreslogs är en 20-fotscontainer och har en lagringskapacitet på 380 kg vätgas vid ett tryck på 300 bar.

I Tabell 36 beräknas hur stor yta lagringen förväntas tas.

Tabell 36. Storlek på lagring

	1 byggnad, 0 elbilar	1 byggnad, 5 elbilar	7 byggnader, 0 elbilar	7 byggnader, 5 elbilar/byggnad
Lagringsbehov [kg]	310	460	2 170	3 210
Antal containrar [st]	1	2	6	9
Lagringskapacitet el/termisk värme [kWh]	380 / 380	760 / 760	2 280 / 2 280	3 420 / 3 420
Upptagen plats för lagring [m ²]	15	30	90	135

Skillnaden mellan lagringsbehov och lagringskapacitet blir en buffert, eftersom hela containerns kapacitet utnyttjas. För beräkningen ”1 byggnad” kan en separat byggnad, till exempel ett Attefallshus, användas för lagring istället för en container. Då kan storleken anpassas för att passa efterfrågad lagringsvolym och därmed eventuellt få ner kostnad samt att lagringsbyggnaden passar omgivningen mer estetiskt. Ett annat alternativ är att minska efterfrågat tryck från 300 bar till 200 bar. 200 bar innebär 30 % mer lagertanksvolym, vilket innebär att kostnaderna ökar med cirka 30 %. Energiåtgång för komprimering till 300 bar jämfört med 200 bar är låg, cirka 3 – 4 % mer energiförbrukning (Nilsson Energy).

Utöver vätgaslagret kommer det att krävas plats för elektrolysör, kompressor och andra komponenter, som förslagsvis får plats i ytterligare en 20-fotscontainer. För en byggnad anses komplement-batterierna få plats i containern tillsammans med elektrolysören. Vid beräkning av 7 byggnader föreslås en gemensam elektrolysör, och den placeras förslagsvis tillsammans med kompressorn intill vätgaslagret. Resterande komponenter planeras i en antingen utbyggnad eller container intill byggnaden. Det totala årliga vattenbehovet till elektrolysören beräknas till 24 – 36 m³, eller 3 – 5 m³ per byggnad, beroende om dimensioneringen tar hänsyn till elbilar eller inte. Om vattnet lagras i tankar behöver utrymme till dessa tas hänsyn till.

9.3.3.3 Kostnader

Det är svårt att få fram exakta kostnader, dels för att det är många komponenter och dels för att pris på elektrolysör samt bränslecell sjunker drastiskt för varje år. En prisindikation har tillhandahållits från Nilsson Energy om vad det dimensionerade systemet hade kunnat kosta idag. Den ungefärliga kostnaden för vätgaslagringen (Om den sker containerbaserad), ses i Tabell 37. Utöver lagringen tillkommer kostnad för resterande komponenter.

Tabell 37. Antal containrar som krävs samt dess kostnad

	1 byggnad, 0 elbilar	1 byggnad, 5 elbilar	7 byggnader, 0 elbilar	7 byggnader, 5 elbilar/byggnad
Antal containrar [st]	1	2	6	9
Pris/container [Mkr]	2,16	2,16	2,16	2,16
Total kostnad, lagring [Mkr]	2,16	4,32	13	19,5

Beroende på önskad kapacitet på bland annat elektrolysör, bränslecell och kompressor kan priset variera en hel del. Nilsson Energy rekommenderar, ur kostnadssynpunkt, en gemensam elektrolysör istället för en elektrolysör per byggnad. En gemensam elektrolysör och kompressor skulle för det här projektet kosta cirka 5 miljoner, medan en enskild elektrolysör och kompressor skulle kosta cirka 855 000 kr/byggnad. Bränslecellen kommer i dagsläget kosta cirka 330 000 kr/byggnad, medan en gemensam bränslecell hade hamnat kring 1,5 miljon kronor.

Enligt Kraftringen beräknas solpanelerna kosta ca 450 000 kr/byggnad utan hänsyn till elbilar och 650 000 kr/byggnad med hänsyn till elbilar. Batterierna kostar enligt Powercircle runt 200 - 600 \$/kWh. Batteriets storlek kan anpassas beroende på budget och vilket pris som kan fås. Andra komponenter såsom kompressor och vattenrening tillkommer också i slutpriset. Om en friggebod väljs istället för en container kommer priset förmodligen att sjunka något.

Nilsson Energy har tagit fram ett prisförslag på vad systemlösningen med vätgaslagring hade kostat idag. Nilsson Energys egna helhetssystemlösning heter RE8760 och skulle kosta cirka 3 miljoner kr för en byggnad utan hänsyn till elbilar. För alla byggnader skulle det kosta cirka 24 miljoner kronor. Solpanelerna är inte inräknade i detta pris. Enligt Nilsson Energy bör drift och underhållskostnaden beräknas till ca 1 % av investeringskostnaden. Enligt Nilsson Energy kan livslängden på de olika komponenterna kan förlängas avsevärt tack vare kontinuerlig drift. Däremot lär de flesta komponenterna behöva bytas ut när de närmar sig 20 år.

Tabell 38 beräknar genomsnittliga elpriset ur ett förenklat livscykelperspektiv baserat på investeringskostnaden genom förväntad elförbrukning på 10 respektive 20 års sikt. Hänsyn har inte tagits till drift- och underhållskostnader eller andra tillkommande kostnader. Detta då investeringskostnaden är så pass osäker så att drift- & underhållskostnaderna hamnar inom felmarginalen. Elförbrukning räknar på samma som för de andra fallen, det vill säga 20 000 kWh istället för 17 700 från tabell 35. Detta då termisk värme från elektrolysör eller bränslecell kan tas tillvara på, vilket inte syns i tabell 35. Investeringskostnaden har slagits ut över den elförbrukning som nyttjas i form av el eller värme av de boende. Investering för solcellerna har inte tagits hänsyn till i tabellen nedan.

Tabell 38. Kostnader ur ett livscykelperspektiv

	Investeringskostnad	Elförbrukning [kWh]	Kr/kWh
1 byggnad 10 år	3 milj. kr	200 000	15
1 byggnad 20 år	3 milj. kr	400 000	7,5
7 byggnader 10 år	24 milj. kr	1 400 000	17
7 byggnader 20 år	24 milj. kr	2 800 000	8,5

9.3.3.4 Koldioxidekvivalenter

Koldioxidekvivalenterna för elanvändningen i fall C kan ses i Tabell 39. Koldioxidekvivalenter för de olika komponenterna har inte tagits fram på grund av ej hittad information. Solcellerna beräknas ha ett genomsnittligt utsläpp på 30 g CO₂e/kWh under dess livslängd.

Tabell 39. CO₂e utsläpp 10 års elförbrukning

Solceller [g CO ₂ e/kWh]	30
1 byggnad, 0 elbilar	
Årlig producerad el från solceller [kWh]	20 000
Koldioxidekvivalenter för elproduktion 10 år [kg CO ₂ e]	6 000
1 byggnad, 5 elbilar	
Årlig producerad el från solceller [kWh]	32 000
Koldioxidekvivalenter för elproduktion, 10 år [kg CO ₂ e]	9 600
7 byggnader, 0 elbilar	
Årlig producerad el från solceller [kWh]	140 000
Koldioxidekvivalenter för elproduktion, 10 år [kg CO ₂ e]	42 000
7 byggnader, 5 elbilar/byggnad	
Årlig producerad el från solceller [kWh]	224 000
Koldioxidekvivalenter för elproduktion, 10 år [kg CO ₂ e]	67 200

9.3.4 Analys och diskussion av fall C

Vätgas-lagringens storlek och vikt för projektet i Gårdstånga

Vätgaslagret kan antingen lagras i en separat byggnad, till exempel en friggebod, alternativt containerbaserat system. Beräkningarna har tagit hänsyn till containerbaserat system då denna typ är skalbar samt mobil och därmed lätt att flytta eller ändra vid behov. Då det är många komponenter att ta hänsyn och priset varierar mycket beroende på dimensionering har hjälp tagits av Nilsson Energy för att få fram en ungefärlig kostnad för systemlösningen. Om vätgaslagret planeras att förvaras i en separat byggnad, kan beräkning av storlek jämföras med Hans-Olof Nilssons referenshus i avsnitt 5.1.

Batterier som komplement

Batteriet dimensioneras för någon dags förbrukning. Detta som kortvarig lagring samt dygnsutjämning. Dimensionering av batterierna kan variera stort beroende på budget och önskemål. Desto större batteri, desto mindre och jämnare behöver elektrolysör och bränslecell köras. Under höst och vår när elproduktion och elkonsumtion är ungefär lika stora är det därför en fördel att ha större batterier. Förslag på när elektrolysör och bränslecell ska köras hämtas från Hans-Olof Nilssons villa. Styrningen baseras på enligt följande: När batteriet laddas av solcellerna och uppnår en SOC på 85 %, startar elektrolysören och vätgas produceras. När solen går ner för dagen eller batteriets SOC

understiger 30 %, stängs elektrolysören av. På vinterhalvåret när elförbrukningen är större än elproduktionen startas istället bränslecellen när batterinivån understiger 30 % och laddar upp batteriet till 60 %. Exakt programmering för optimal funktion diskuteras inte vidare i det här examensarbetet.

Systemlösning

I den här systemlösningen finns fler komponenter än i fall B. Det finns en elektrolysör för att producera vätgas, tankar för att lagra vätgasen, kompressor för att komprimera vätgasen, bränslecell som omvandlar vätgasen till el respektive värme, tillgång till vatten och batterier som komplement. Utöver dessa krävs även styrsystem och tillhörande komponenter till solcellsanläggningen. Det finns några olika sätt att tänka gällande hur systemlösningen ska utformas. I huvudsak finns det två utgångspunkter. Det första alternativet är att alla byggnader har en gemensam elektrolysör, bränslecell och vätgaslager. Precis som för fall B, krävs då en mindre buffert samt att investeringskostnaden troligtvis blir lägre. Ett annat alternativ hade varit att varje byggnad har sin egen systemlösning. Fördelen är att systemet blir mer robust, eftersom ett komponenthaveri inte drabbar alla flerbostadshus. Det finns flera olika varianter och kombinationer av dessa två lösningar. Efter diskussion med Nilsson Energy har ett förslag tagits fram. Systemlösningen består av en gemensam elektrolysör, en kompressor och ett vätgaslager. De resterande komponenterna är inte gemensamma, utan varje byggnad har sin egen bränslecell osv. Enligt Hans-Olof Nilsson är det enklare att få tillstånd om vätgaslagret placeras i en separat byggnad, jämfört med om det skulle lagras i till exempel en källare. Att placera vätgaslagret på andra sidan vägen kan vara ett rimligt alternativ, eftersom det ökar avståndet till bostadshuset. Dock måste i sådana fall rören dras under vägen, vilket kan bli problem. Vätgas är, som tidigare nämnt, en explosiv gas och något som ska hanteras med säkerhet. Detta förutsätter dock att det är rättsligt godtagbart då marken på andra sidan vägen tillhör en annan fastighet. Den exakta placeringen av vätgaslagret får tas fram via en riskanalys. Fördelen med ett gemensamt lager är att mindre buffert krävs samt att det jämnar ut konsumtionsvariationen mellan byggnaderna. Vid gemensamt lager är det rimligt att ha en gemensam kompressor i anslutning till lagret.

Gemensam elektrolysör har, enligt Nilsson Energy, rekommenderats ur kostnadssynpunkt. Vid en gemensam elektrolysör kan restvärmen från denna inte tas tillvara på ett effektivt sätt, då ett kulvertsystem hade behövts och därmed gett upphov till värmeförluster. Detta innebär en något ökad elförbrukning, då värmepumpen behöver värma upp motsvarande förlust. En enskild elektrolysör per byggnad hade kunnat placeras kloss intill värmepumpssystemet, och då hade restvärmen kunnat nyttjas på ett smidigare sätt. Trots detta föreslås en gemensam elektrolysör. Om elektrolysören skulle gå sönder, påverkar inte det de boende nämnvärt eftersom det endast är överskottsel som körs i elektrolysören. Den enda egentliga nackdelen är att lagret av vätgaslagret inte fylls på.

Byggnaderna bör ha varsin bränslecell, på grund av all termisk värme som produceras. Eftersom bränslecellen körs under vintertid, är det därför önskvärt att kunna nyttja den termiska värmen. Om byggnaderna hade haft en gemensam bränslecell, hade verkningsgraden blivit sämre på grund av kulvertsystem. En större bränslecell är dock

billigare än 7 stycken mindre. Men eftersom så pass mycket termisk värme kan nyttjas under vintertid, anses det ändå som ett bra alternativ att varje byggnad har varsin. Om en bränslecell havererar står de boende ganska snart utan el och värme eftersom bränslecellen framförallt körs under vinterhalvåret. Därför blir systemet mer robust om varje byggnad har en egen bränslecell jämfört med om de skulle ha en gemensam, då endast en byggnad drabbas och inte alla. Eftersom bränslecellen laddar batteriet föreslås även varsitt batterilager för varje byggnad.

Systemlösningen behöver också tillgång till vatten. Det går åt cirka 11 liter vatten för att producera 1 kilo vätgas. Detta innebär att det totalt sett behövs mellan 24 och 35 m³ vatten beroende på om hänsyn till elbilar tas eller inte. Ett förslag för det här projektet är att nyttja den anlagda dammen. Fördelen är att det inte krävs några ackumulatortankar, som annars hade behövt ha en gemensam volym mellan 24 och 35 m³. Nackdelen är att vattnet kommer behöva avjoniseras och renas. När vattnet är använt kommer det att släppas ut i dammen igen. Rör mellan damm och byggnader kommer också krävas. Valet mellan damm och vattentank utreds dock inte närmare i det här examensarbetet.

Kostnad och livslängd för systemlösningen

Då det är många komponenter att ta hänsyn och priset varierar mycket beroende på dimensionering har hjälp tagits av Nilsson Energy för att få fram en ungefärlig kostnad för systemlösningen. Då det är många olika komponenter att ta hänsyn till och att priserna uppdateras kontinuerligt är det svårt att få ett generellt kostnadsförslag. Framförallt med tanke på alla de olika kombinationer av systemlösningar som har beräknats. Men en riktlinje mot vad systemet skulle kunna kosta har ändå uppskattats. Gällande livslängden kan systemet hålla i många år vid fortlöpande service och underhåll. Svårt att bedöma servicekostnad men enligt Nilsson Energi kan en årlig kostnad på cirka 1 % av investeringskostnaden antas.

Miljöaspekter

Elektrolysören använder endast el för att spjälka vatten till vätgas samt syrgas. Det omvända gäller för bränslecellen, som omvandlar vätgas samt syrgas till el respektive vatten. Därmed avges inga miljöskadliga ämnen under användning av maskinerna. Värden för koldioxidkvivalenter har inte hittats, och därför är det svårt att jämföra miljöpåverkan med de andra fallen.

Lagar, regler och säkerhetsaspekter

Eftersom vätgas är en explosiv gas, krävs en riskanalys. Vätgas är en av de vanligaste industrigaserna, men det är fortfarande relativt ovanligt med vätgashantering i bostadsområden. På grund av detta finns det inte heller några tydliga riktlinjer för hur detta ska hanteras. Därför kan det finnas stora variationer i hur samma riskanalys tolkas av räddningstjänsten i olika städer. Detta innebär att samma projekt kan bli godkänt eller nekad beroende på i vilken kommun den ligger i.

Fossilfritt Sverige lämnade över sin vätgasstrategi till regeringen den 21 januari år 2021 och några veckor därefter började regeringen arbeta med att ta fram en nationell vätgasstrategi. Fram tills att det finns nationella riktlinjer att följa, kan regler för natur/biogas appliceras som riktlinjer för vätgashanteringen. Detta enligt flera

sakkunniga inom området. Nuvarande bensinstationer i Lund gäller ett säkerhetsavstånd till känslig bebyggelse på 25 meter. Till allmän väg gäller ett säkerhetsavstånd på 8 meter. Motsvarande siffror för ett vätgaslager har inte tagits fram än. Om säkerhetsavståndet för bensinstationer appliceras för vätgaslager, är det därför motiverat att placera lagret på andra sidan vägen i det här projektet. Dock är flerbostadshusens exakta placering inte helt bestämd, vilket kan möjliggöra en placering av vätgastanken på samma sida som byggnaderna.

Enligt Skatteverket ska vätgas som förbrukas i bränsleceller till fordon beskattas på samma sätt som naturgas/biogas. Då naturgas/biogas är undantagna från skatt bör denna riktlinje antas kunna gälla även för uppvärmning av fastigheter.

Det är också viktigt att göra de boende uppmärksamma på att de bor nära ett vätgaslager och att informera om eventuella risker.

Osäkerheter i beräkningarna

Precis som för fall B finns det en del osäkerheter i beräkningarna. Många av osäkerheterna är desamma som för fall B, som brukarbeteende, klimatvariation och vinkeln på solcellerna.

Verkningsgraden över tid kommer att påverkas, men detta har inte tagits hänsyn till i beräkningarna. Elförsörjningen för de olika komponenterna har inte heller tagits hänsyn till, förutom elektrolysören. Till exempel kräver kompressor, avjonisering och rening el. Beräkningarna har också förenklats på så sätt att allt nettoöverskott per dygn omvandlas till vätgas samt att nettounderskottet hämtas från vätgasen. I verkligheten kommer driften av elektrolysör och bränslecell bero på batteriets laddningsnivå. Eftersom batteriet är en dygnsutjämnare behöver inte bränslecellen användas varenda gång det är ett litet underskott, vilket den gör i beräkningarna. Detta innebär att beräkningarna antagligen visar på att mer vätgas behövs än vad det egentligen gör.

Fungerar en systemlösning av vätgas och batterier för projektet i Gårdstånga?

En systemlösning bestående av vätgas och batterier hade kunnat fungera. Referenshuset, Hans-Olofs villa, visar att den här typen av systemlösning fungerar då hans hus har varit off-grid sedan 2015. Enligt den förenklade livscykelanalysen visade det att elpriset för 7 byggnader hamnar på 4 kr ur ett 20-årsperspektiv. Den här siffran bör dock justeras uppåt då bland annat drift och underhåll tillkommer. Priset på hela systemanläggningen förväntas dock sjunka under de kommande åren, då komponenterna blir billigare och billigare. Detta innebär att det kan komma att bli mer lönsamt att vara off-grid jämfört med att vara ansluten till elnätet om några år. I dagsläget är det dock inte mer motiverat att bygga off-grid i Lund jämfört med att vara uppkopplad på elnätet.

10 Diskussion

10.1 Jämförelse mellan alternativen

I tabell 40 finns en sammanställning av de olika fallen. Kostnaden i tabellen är ur ett 10-års perspektiv. I fall C beräknas komponenterna egentligen ha en livslängd närmare 20 år. Om ett 20-års perspektiv räknas halveras kostnad per kWh för detta fallet.

Tabell 40. Sammanställning av fallen

Fall	Lagringsyta [m ²]	Kostnad, lagring [Mkr]	Kostnad [kr/kWh]
Fall A, elnät	0	0	1,5 - 2
Fall B, batteri	45 - 135	12,5 - 40	60 - 200
Fall C, vätgas och batteri	15	3	15

Vilket av alternativen är mest lämpad för projektet i Gårdstånga? Det finns många olika faktorer att ta hänsyn till vid en jämförelse av fallen. Det finns både för- och nackdelar med båda lagringsmetoderna, samt hur dessa förhåller sig till den traditionella lösningen att vara uppkopplad till elnätet. Fördelen med att vara uppkopplad på elnätet som i fall A är att driftsäkerheten är väldigt hög, det är förhållandevis låg driftkostnad samt låg investeringskostnad. Dessutom ger det en trygghet att alltid ha tillgång till el. I dagsläget finns det ingen större nackdel att vara uppkopplad till elnätet i just Gårdstånga. Dock går det inte att veta hur framtiden ser ut. Elbehovet kommer troligtvis öka i Sverige, och redan idag finns det effektbrist samt kapacitetsbrist under vissa perioder. Detta beror bland annat på förhållandet mellan planerbar och icke planerbar elproduktion samt att elnätet inte är dimensionerat för att hantera det nya behovet. Om elnätet och elproduktionen utvecklas i samma takt som att det nya behovet ökar, kommer det inte finnas några större nackdelar att vara uppkopplad. Problemet är om behovet ökar mer än vad elnätet och elproduktionen klarar av. Då finns det risk för effektbrist allt oftare, och att bo off-grid blir en fördel. En annan fördel att vara off-grid är att man inte är beroende av elpriset.

I det här examensarbetet har två stycken olika off-grid lösningar presenterats, nämligen batterilagring samt vätgas- och batterilagring. Fördelarna med att lagra med hjälp av batterier är att de har snabb responstid, det är en väletablerad lagringsmetod och det finns mycket kunskap om batterier. Batterier ger inga utsläpp under driften, de är tysta och är i princip underhållsfria. Än så länge innehåller batterier många ädelmetaller, vilket riskerar att bli en bristvara i framtiden. Dock sker det mycket forskning kring detta i hopp om att ersätta dessa mineraler med mer miljövänliga sådana. Nackdelarna med att lagra så pass mycket energi som i det här projektet är att det blir väldigt dyrt samt att batterier har en väldigt låg energidensitet och därmed tar väldigt stor plats. I takt med att batterier utvecklas och massproduktionen ökar, sjunker priset konstant. I nuläget beräknas batteripriset för den här typen av applikation på 200 – 600 \$/kWh, vilket innebär att man snabbt kommer upp i väldigt höga summor. Förhållandet mellan livslängd och kostnad/miljö kan också diskuteras.

De stora skillnaderna med att ha en systemlösning i form av ett vätgaslager jämfört med ett batterilager är att vätgasen har en högre energidensitet, vilket innebär att det tar mindre plats. Batterier har en självurladdning på upp till 5 % per månad, vilket innebär att en del energi försvinner vid långtidslagring. Detta problem har inte vätgas. Däremot har vätgasen en sämre verkningsgrad vid omvandlingen i elektrolysör och bränslecell. Detta medför att batterier lämpar sig främst för korttidslagring, medan vätgas är ett bättre alternativ för långtidslagring. Om flerbostadshuset i Gårdstånga skulle vara off-grid föreslås vätgaslagring som ett alternativ, eftersom det rör sig om mycket långtidslagring samt att en systemlösning med vätgas tar mindre plats i anspråk. Det finns dock nackdelar med just vätgasset. Dels innehåller systemet fler komponenter, vilket innebär att det är en större risk för komponenthaveri. Vätgas är en beprövad industrigas, men hanteringen av denna är fortfarande ny utanför industriområden. Detta medför osäkerhetsfaktorer, bland annat att det inte finns tydliga ramverk för hur systemet ska hanteras och tolkas. I nuläget är det också relativt dyrt att anlägga ett sådant här system, då elektrolysör och bränslecell inte massproduceras. Däremot beräknas systemkostnaden sjunka drastiskt de kommande åren, på samma sätt som batterier har gjort. Säkerhetsaspekten är också en viktig faktor att ta hänsyn till vid hantering av vätgas.

Att bygga Gårdstånga helt off-grid anses inte vara en optimal lösning då det befintliga elnätet redan är så pass bra och en uppkoppling vore både billigare och ha en lägre risk. Däremot kan en off-grid lösning för Gårdstånga vara aktuell i ett forskningssyfte i med närheten till Lund och Science Village.

Även om inte off-grid lösningen som tagits fram för det här projektet inte är optimalt för just Gårdstånga, innebär det inte att den inte är optimal för andra platser i Sverige. Avlägsna platser såsom små öar i skärgården och samhällen ute i norrländska skogar är mer aktuella för off-grid lösningar då dessa redan idag kan lida av långvarig elbrist. Idag läggs mycket pengar på att stormsäkra elnätsledningar i form av nedgrävning av elnätskablar.

10.2 Buffert och dimensionering av lagringssystemet

Då systemet är bortkopplat från elnätet i fall B och C kommer det inte finnas något annat sätt att tillföra el utöver solceller och batteri/vätgaslager. Därför behöver systemet överdimensioneras för att klara av variationer i klimatet, som till exempel en 10-årsvinter. I det här examensarbetet har 5 elbilar/byggnad ansetts som ett rimligt scenario inom snar framtid. Fem elbilar per byggnad kommer antagligen inte uppnås inom de närmaste åren, vilket gör att detta blir en buffert för att klara en solfattig sommar eller en kall vinter. Det är viktigt att poängtera att både systemlösningen med batterilagring och systemlösningen med vätgaslagring är skalbara. Detta innebär att systemen kan byggas ut eller skalas upp på ett smidigt sätt om elförbrukningen ökar. Om utvecklingen av elbilar skulle gå fortare framåt än planerat, kanske varje lägenhet skulle ha två elbilar var samt att dessa skulle förbruka mer än 2 500 kWh per år. Därför är det bra att systemen är skalbara. Alternativ kan diskuteras i form av att ändå ha en kabel ansluten till elnätet så att batterierna/vätgaslagret kan fyllas på vid behov (helst lågtimmarna) alternativt sälja överskottselen om överskottet är stort. Hans-Olof Nilssons villa, tankstationen i

Mariestad, Mariestads förskola och Sjöbohem har alla, eller planerar att ha, en anslutningskabel till det lokala elnätet som skulle kunna kopplas på vid behov. Detta ökar robustheten för systemet och det behövs inte tas lika stor höjd vid dimensioneringen.

Möjlighet att minska förbrukningen

Hushållselen i det här projektet beräknas generellt stå för cirka 60 % av all el, utan elbilar inräknat. Om elbilar tas med i beräkningarna står hushållselen och elen till elbilarna för cirka 75 % av den årliga elkonsumtionen. Detta innebär att det är just hushållselen som påverkar den totala elförbrukningen mest. När huset är så pass välisolerat som i det här fallet, är det alltså brukarbeteendet som spelar störst roll för förbrukningen. Elförbrukningen för rumsuppvärmningen står endast för 4% av den totala elförbrukningen. När byggnaden var måttligt isolerad hamnade rumsuppvärmningen på cirka 15 % av den totala elförbrukningen över året. Om vätgaslösningen appliceras på de här siffrorna hade mycket restvärme kunnat tas tillvara på och därmed minska andelen el till rumsuppvärmningen. Detta innebär rent praktiskt att mer isolering skulle göra marginell skillnad i elförbrukningen, än mindre i fall C med vätgaslösningen.

Vad kan man egentligen göra för att minska hushållselen? Ett alternativ är att införskaffa energisnåla armaturer och vitvaror. Ett annat alternativ är att göra individuell mätning och debitering (IMD). Detta gör de boende mer medvetna om hur deras vanor påverkar konsumtionen då de blir debiterade för det de förbrukar. Det är också viktigt att göra de boende uppmärksamma på att de lever i ett off-grid boende, även om det generellt sett är väldigt svårt att påverka brukarbeteende. Om alla boende hade varit engagerade hade förbrukningen kunnat minskas, men syftet med det här projektet är att vem som helst ska kunna bo i flerbostadshuset oavsett intresse för energihushållning. Rent praktiskt kommer antagligen inte upplysning om energihushållning påverka den totala förbrukningen nämnvärt.

10.3 Möjligheter med andra förutsättningar

Vilka förutsättningar krävs för att göra en byggnad självförsörjande på energi? Enligt teorin är det tre aspekter som är viktiga. Lågt värmebehov, låg energiförbrukning och en elproduktion som täcker behovet året runt. Det här arbetet har främst handlat om säsongslagringen och vad som krävs av den. Behovet av säsongslagring varierar dock beroende på hur byggnaden är utformad. I det här avsnittet görs en känslighetsanalys av hur energibehovet förändras när förutsättningarna ändras. Är det en förutsättning att ha ett passivhus för att kunna vara off-grid och hur stor roll spelar den geografiska platsen?

Måste man ha ett passivhus för att kunna vara off-grid?

En av punkterna som är viktiga att ta hänsyn till vid off-grid byggnationer är just att byggnaden ska vara energieffektiv. Eftersom alla off-grid hus är i behov av någon form av säsongslagring, är det därför bra om behovet av energi inte är speciellt stort. Ju större energibehov en byggnad har, desto mer energi behöver produceras samt lagras. Rent teoretiskt går det alltid att vara off-grid. Frågan är snarare hur stor produktion samt lagring det går att ha utan att det blir orimligt i avseende på upptagen plats och pris. För att testa huruvida produktion- och lagringsbehov förändras med minskat U-medelvärde

ändrades flerbostadshuset i Gårdstånga till ”måttligt isolerad, lätt byggnad”. Detta innebar att byggnaderna fick ett U-medelvärde på $0,37 \text{ W/m}^2$, K istället för $0,16 \text{ W/m}^2$, K, i övrigt var byggnaderna identiska. För fall C, med vätgas- och batterilagring, innebar detta att 35 m^2 mer solceller behövdes jämfört med innan. Om hänsyn till elbilar togs krävdes det 60 m^2 . Värmebehovet ökade väldigt mycket, men tack vare värmepumpens höga verkningsgrad ökade elförbrukningen med endast $3\,000 \text{ kWh}$ per år och detta gick till värmepumpen för rumsuppvärmning.

Flerbostadshuset i Gårdstånga hade kunnat ha ett U-medelvärde på $0,37 \text{ W/m}^2$, K och ändå kunnat fungera som ett off-grid boende. Dock är det bättre att ha en så liten energiförbrukning som möjligt och det bör alltid eftersträvas vid off-grid byggnationer. Val av värmepump verkar vara minst lika viktigt som välisolerade ytterväggar. Även närvaro/behovsstyrd FTX-ventilation kan spela stor roll.

Geografiska förutsättningar

Platsen som dessa flerbostadshus ska byggas i är Gårdstånga, Lund. Frågan är egentligen om platsen är lämplig för off-grid boende? För att se om platsen spelar någon roll flyttades byggnaden till Sandhamn i Stockholms skärgård. Platsen är vald på grund av att Sandhamn är en ö och ligger långt ut i Stockholms skärgård. Tekniskt sett är det sådana här platser som off-grid lösningar hade varit till mest nytta. Elproduktionen visade sig vara en aning högre i Sandhamn än Gårdstånga, däremot ökade förbrukningen en aning. Totalt sett blev dimensioneringen densamma.

Byggnaden testades även att flyttas söderut till Mallorca. I verkligheten byggs inte hus på samma sätt i Sverige som Mallorca. Anledningen till jämförelsen med Mallorca är för att se hur lagringsbehovet förändras när de geografiska förutsättningarna ändras. Elförsörjning för värme, kyla och fläktar för huset ökade från $7\,300 \text{ kWh}$ till $7\,700 \text{ kWh}$, förutsatt att tappvarmvattenbehov och alla andra värden är densamma. Den stora skillnaden är att kylningen ökar, medan rumsuppvärmningen står på 0. Elproduktionen över året är däremot mer jämn nere i Mallorca jämfört med Gårdstånga. Detta innebär att det då krävs mindre lagring, eftersom elen produceras kontinuerligt. Detta innebär också att självurladdningen på batterier minskar eftersom energin inte behövs lagras några längre perioder, vilket bidrar till mindre förluster. För fall B skulle detta betyda att endast 65 respektive 105 m^2 solceller behövs, beroende på om hänsyn till elbilar tas eller inte. I fall C krävs 80 respektive 120 m^2 solceller, med eller utan hänsyn till elbilar. Vätagaslagret hamnar på 75 respektive 100 kg . Det är alltså en klar skillnad om byggnaden placeras i Sverige jämfört med Mallorca. Förbrukningen ökar, men energiproduktionen är mer jämn över året vilket innebär mindre lagring och att mer energi kan nyttjas momentant.

Som slutsats går det att påstå att den geografiska platsen spelar roll. Det är mer fördelaktigt att ha ett off-grid boende på platser närmare ekvatorn där soltimmarna är jämnare fördelat över året. Trots att det inte var någon större skillnad mellan Gårdstånga och Sandhamn, är det troligt att det kan skilja sig på andra platser i Sverige. I norra Sverige är det mindre soltimmar på vintern, vilket påverkar energiproduktionen och därmed behövs mer energi produceras under sommarmånaderna. Dessutom finns det

större risk att snö täcker solcellerna högre upp i landet, och då produceras noll kWh. PVGIS tar inte hänsyn till om solcellerna täcks med snö och frost.

10.4 Framtidsutsikter

Det är aktuellt att titta på off-grid lösningar idag eftersom det finns högt satta miljömål. Off-grid lösningar är ett steg på vägen att klara dessa mål. Dessutom tros elförbrukningen öka, och ett sätt att minska risken för effekt- samt kapacitetsbrist i samhället är att bygga off-grid. I samband med att bo off-grid gör sig människan även oberoende av omgivningen, vilket många anser som en fördel.

Framtidsutsikterna för självförsörjande byggnader ser god ut. Idag finns det mycket kunskap kring att bygga energieffektiva hus och även hur man lagrar energi. Den metod som ser mest lovande ut är vätgaslagringen, trots att det råder delade meningar kring vätgasens potential utanför industriområdet. De senaste åren har det dock skett stora satsningar inom vätgasbranschen för att ersätta fossila bränslen. Sommaren 2020 presenterade EU sin vätgasstrategi, där de vill satsa 430 miljarder Euro på grön vätgas samt en sammanlagd elektrolyskapacitet på 40 GW. Därefter har många länder inom EU kompletterat med sina egna strategier och satsningar. Fossilfritt Sverige lämnade över sin vätgasstrategi till regeringen i januari år 2021. Någon vecka senare gav regeringen energimyndigheten i uppdrag att ta fram ett förslag på en svensk vätgasstrategi. Det som talar för vätgasen är att den kan användas inom flera områden. Dels kan den nyttjas som råvara inom industri, bland annat ståltillverkning. Det kan också nyttjas som fordonsbränsle eller också användas för el och uppvärmning till bostäder. Möjlighet till decentraliserad produktion fungerar också i med att det endast krävs tillgång till el och vatten. Detta innebär att det kan produceras på avlägsna områden som idag kräver mer logistik för att fungera. Ett exempel på en fungerande lösning är vätgastankstationen i Mariestad. Där produceras vätgas med hjälp av vatten från Väneren och el från en intilliggande solcellspark. Några av kommunens bilar tankar där, och bilarnas enda utsläpp är ren vattenånga. Detta innebär en cirkulär, grön ekonomi där fordonet kör på grön energi oavsett när på dygnet/året den tankas. Med tanke på att användningsmöjligheterna är många, blir det en synergieffekt som är positiv för framtida utveckling. En och samma investering kan rikta sig till flera branscher. Till exempel ett vindkraftverk med vätgasproduktion kan den producerade vätgasen säljas som både fordonsbränsle, fjärrvärme samt el till elnätet.

För att batterier ska bli aktuellt för storskalig lagring krävs det dels att priserna fortsätter sjunka, de behöver en högre energi- och volymdensitet samt minska mängden kritiska mineraler. Därför är vätgaslagring än så länge ett bättre alternativ för framtidens självförsörjande hus.

10.5 Förslag till vidare studier

- **Alternativ elproduktion i form av till exempel vindkraftverk.**

I det här examensarbetet valdes det att fokusera på solceller, men vindkraft är också ett alternativ som hade kunnat fungera. De största vindkraftverken hade troligtvis varit överdimensionerade, utan det är gårdskraftverken som hade varit

aktuella. Vidare utredning ifall vindkraftverk är aktuellt för Gårdstånga kan undersökas.

- **Möjlighet för egen vätgastankstation**

Om de boende i flerbostadshusen skulle skaffa vätgasbilar istället för elbilar, hade en diskussion kring om en egen vätgastankstation kunnat uppstå. Då det finns en tankstation vid E22 500 meter västerut, hade möjligheter för att tanka vätgas varit intressant. En annan intressant aspekt hade varit om tankstationen kopplats ihop med vätgassystemet i Gårdstånga.

11 Slutsats

Nedan besvaras och sammanfattas de frågeställningar som ställdes i början av examensarbetet.

- **Vilka olika lagringsmetoder finns det idag och vilka lämpar sig för energilagring till bostäder?**

De lagringsmetoder som tagits upp i examensarbetet är superkondensatorer, supraledare, komprimerad luft, svänghjul, pumpkraftverk, bergrum, SaltX, batterier samt vätgas. Av dessa alternativ är endast vätgas i kombination av batterier är lämplig lösning för energilagring till bostäder med de förutsättningar som finns i Gårdstånga.

- **Vad krävs det för att göra ett hus helt självförsörjande på energi?**

Teoretiskt sätt krävs det ingenting för att bo off-grid. Många människor bor idag tex ofrivilligt off-grid. För att kunna ha de moderna bekvämligheterna krävs det dock möjlighet till egen elproduktion samt någon form av energilagring. Det är en klar fördel att ha ett energieffektivt hus som är bra isolerat, men det är inget krav. Vidare följer att ekonomi samt område är de parametrar som bestämmer hur energieffektiv en byggnad måste vara. Sämre isolering innebär ökad förbrukning, som i sin tur innebär mer lagring och därmed krävs det större yta och högre kostnader. Det är också en fördel att bygga självförsörjande hus närmare ekvatorn, där solenergiproduktionen är mer jämn.

- **Vilka för- och nackdelar finns det med de skapade fallen?**

Fördelarna med fall A (kopplad till elnätet) är att det är förhållandevis billigt jämfört med de andra fallen. Det är också mer säkert eftersom systemet är mer robust samt att systemet övervakas av elnätsägaren och därför åtgärdas oftast strömavbrott omgående utan att konsumenten behöver göra någonting. Den största nackdelen är man blir beroende av elpriserna och att elnätet ska fungera.

Fördelarna med fall B (självförsörjande på energi med batterilager) är att byggnaden är off-grid. Att vara bortkopplad från elnätet innebär att man blir oberoende av elpriser och opåverkad av tillfälliga strömavbrott i samhället. Det är också en fördel att batterier är en välbeprövad metod för energilagring. Nackdelarna är att det är alldeles för dyrt samt att det tar upp alldeles för stor plats jämfört med vad som är rimligt. Dessutom innehåller batterier kritiska metaller. Om batterierna skulle haverera, eller någon annan komponent i systemlösningen, står man dock utan el.

Fördelarna med fall C (självförsörjande på energi med vätgas- och batterilager) är, precis som i fall B, att byggnaden är off-grid. Till skillnad från fall B, är fall C betydligt mer överkomlig både pris- och platsmässigt. En annan fördel är att systemet är helt klimat neutralt under drift. Nackdelarna med fall C är att det för det första inte finns tydliga lagar och regler för hur gasen ska hanteras utanför industriområden. Det är heller inte en lika beprövad lagringsmetod som till

exempel batterier är. På grund av att systemet har många komponenter är det också större risk för att någon komponent ska haverera.

- **Är det möjligt att göra husen i Gårdstånga helt självförsörjande på el samt värme och vad är i så fall den bästa lösningen?**

Ja, det är möjligt att göra husen i Gårdstånga helt självförsörjande på energi. Vätgas i kombination med batterier anses vara den bästa lösningen. Ekonomiskt sätt är det dock lämpligare i dagsläget att vara uppkopplad på elnätet.

- **Varför är det överhuvudtaget aktuellt att titta på sådana här lösningar?**

På grund av högt satta miljömål från bland annat FN är det idag aktuellt att titta på hållbara energisystem. Elförbrukningen i samhället förväntas att öka och för att undvika effekt- och kapacitetsbrist kan en off-grid lösning vara väldigt aktuell.

- **Hur ser framtida möjligheter ut för att bo i självförsörjande hus?**

Framtida möjligheter ser lovande ut. Utveckling av både elektrolysörer och bränsleceller går framåt och priserna sjunker. Till exempel satsar EU stora pengar på att ersätta fossila bränslen med vätgas, och många EU-länder har följt efter. I takt med ökad kunskap kring ämnet ser framtiden för energilagring med hjälp av vätgas ljus ut.

12 Litteraturförteckning

BBR, 1998. *Utdrag ur OVK för äldre byggregler*. [Online]

Available at:

<https://www.boverket.se/contentassets/3108c5069a60495380949c906e9c6f0b/bbr-7-ovk.pdf>

[Använd 17 12 2020].

BBR, 2020. *Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR*.

[Online]

Available at:

https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf

[Använd 08 12 2020].

Bertilsson, B., 1999. *Supraledare - kalla dem oemotståndliga*. [Online]

Available at: https://people.kth.se/~e98_bbe/kth/supraledare/supraledare.html

[Använd 26 11 2020].

Bostad Västerås, 2020. *Bygg energieffektivt*. [Online]

Available at:

<https://www.bostadvasteras.se/CM/Templates/Article/general.aspx?cmguid=f538a288-8704-4b7c-bb81-1151e43cb246>

[Använd 05 12 2020].

Boverket och SMHI, 2017. *Öppna data - Dimensionerande vinterutetemperatur (DVUT 1981-2010) för 310 orter i Sverige*. [Online]

Available at: <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/oppna-data/dimensionerande-vinterutetemperatur-dvut-1981-2010/>

[Använd 15 01 2021].

Boverket, 2017. *BBR BEN2*. [Online]

Available at: <https://rinfo.boverket.se/BEN/PDF/BFS2017-6-BEN-2.pdf>

[Använd 01 01 2021].

Boverket, 2018. *Boverkets byggregler och klimatanpassning*. [Online]

Available at:

<https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/boverkets-byggregler-och-klimatanpassning.pdf>

[Använd 11 10 2020].

Boverket, 2020. *Dagsljus*. [Online]

Available at: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/ljus-i-byggnader/dagsljus/>

[Använd 10 12 2020].

Boverket, 2020. *Stöd för hyresbostäder och bostäder för studerande*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/bidrag--garantier/stod-for-hyresbostader-och-bostader-for-studerande/>
[Använd 03 12 2020].

Boverket, 2021. *Nya regler och krav på laddinfrastruktur för laddning av elfordon*. [Online]
Available at: <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/nyheter/nya-regler-och-krav-pa-laddinfrastruktur-for-laddning-av-elfordon/>
[Använd 18 02 2021].

Byggghus, 2020. *Isolera med rätt tjocklek och metod*. [Online]
Available at: <https://www.byggghus.se/isolera-med-ratt-tjocklek-och-metod>
[Använd 14 12 2020].

Daimler, 2020. *Collaboration with Linde on liquid-hydrogen refueling technology*. [Online]
Available at: <https://www.daimler.com/investors/reports-news/financial-news/20201210-refuelig-liquid-hydrogen-trucks.html>
[Använd 22 02 2021].

Ekonomifakta, 2020. *Elproduktion - internationellt*. [Online]
Available at: <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Energibalans-i-Sverige/Elanvandning/>
[Använd 10 12 2020].

Ekonomifakta, 2020. *Sveriges energianvändning sektorsvis*. [Online]
Available at: <https://www.ekonomifakta.se/fakta/energi/energibalans-i-sverige/energianvandning/?graph=/1340/all/all/>
[Använd 25 11 2020].

Ellevio, 2019. *Effektbrist eller kapacitetsbrist – eller både och? Vi reder ut begreppen..* [Online]
Available at: <https://www.ellevio.se/om-oss/Pressrum/newsroom/2019/mars/effektbrist-eller-kapacitetsbrist--eller-bade-och-vi-reder-ut-begreppen/>
[Använd 10 12 2020].

Energi & Miljö, 2011. *Lågenergihus för varma på sommaren*. [Online]
Available at: <https://www.energi-miljo.se/energi-miljo/lagenergihus-varma-pa-sommaren>
[Använd 20 11 2020].

Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020. *Frånluftsvärmepump*. [Online]
Available at: <https://www.ekrs.se/franluftsvarmepump>
[Använd 25 11 2020].

Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020. *Luft-/luftvärmepump*. [Online]
Available at: <https://www.ekrs.se/luft-luftvarmepump>
[Använd 25 11 2020].

Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020. *Luft-vattenvärmepump*. [Online]
Available at: <https://www.ekrs.se/luft-vattenvarmepump>
[Använd 25 11 2020].

Energi- och Klimatrådgivarna i Skåne, 2020. *Värmepumpar*. [Online]
Available at: <https://www.ekrs.se/varmepumpar-allmant>
[Använd 25 11 2020].

Energi- och Miljötekniska Föreningen, 2011. *Lågenergihus för varma på sommaren*. [Online]
Available at: <https://www.energi-miljo.se/energi-miljo/lagenergihus-varma-pa-sommaren>
[Använd 03 12 2020].

Energiföretagen, 2020. *Elstatistik för 2019: Största nettoexporten någonsin*. [Online]
Available at:
<https://www.energiforetagen.se/pressrum/pressmeddelanden/2019/elstatistik-for-2019-storsta-nettoexporten-nagonsin>
[Använd 15 11 2020].

Energiforsk, 2018. *Vätgaslagring i fordon*. [Online]
Available at:
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/25628/vatgaslagring-i-vagfordon-energiforskrapport-2018-553.pdf>
[Använd 22 02 2021].

Energiforsk, 2019. *Mariestad – modellområde för hållbar utveckling*. [Online]
Available at: <https://energiforsk.se/info/omvarldsbevakning-solel-juni-2019/>
[Använd 24 02 2021].

Energiforsk, 2019. *Teknoekonomisk jämförelse av olika tekniker för termiska lager i fjärrvärménät*. [Online]
Available at: <https://energiforsk.se/media/26771/teknokonomisk-jamforelse-av-olika-tekniker-for-termiska-lager-energiforskrapport-2019-598.pdf>
[Använd 26 11 2020].

Energimyndigheten, 2014. *Växthusgasberäkning*. [Online]
Available at:
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/hallbarhetskriterier/hallbarhetslagen/fragor-och-svar/vaxthusgasberakning/>
[Använd 10 02 2021].

Energimyndigheten, 2015. *Värmepump*. [Online]

Available at: <http://www.energimyndigheten.se/snabblankar/lattlast/hur-varmer-du-upp-ditt-hus/varmepump/>

[Använd 20 11 2020].

Energimyndigheten, 2019. *Forskningsöversikt om återvinning och återbruk av litiumjonbatterier*. [Online]

Available at: <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/overgripande/forskningsoversikt-om-atervinning-och-aterbruk-av-litiumjonbatterier-2019.pdf>

[Använd 20 01 2020].

Energimyndigheten, 2020. *Gårdsverk*. [Online]

Available at:

<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/vindkraft/vindlov/planering-och-tillstand/gardsverk/>

[Använd 06 12 2020].

Energirådgivaren, 2011. *Elförbrukning i en genomsnittlig villa respektive lägenhet*. [Online]

Available at: <https://www.energiradgivaren.se/2011/09/elforbrukning-i-en-genomsnittlig-villa-respektive-lagenhet/#:~:text=F%C3%B6r%20en%20villa%20med%20,cirka%203%20500%20kWh%20energi>

[Använd 20 11 2020].

Energy Building, 2020. *Frånluftsventilation – så funkar det och så här går det att förbättra den!*. [Online]

Available at: <https://www.energybuilding.se/franluftsventilation/>

[Använd 19 12 2020].

Energy Building, 2020. *Off-grid från historiskt ofrivilligt till en frivillig framtid?*. [Online]

Available at: <https://www.energybuilding.se/off-grid/>

[Använd 30 11 2020].

Energy Building, 2020. *Självdragsventilation – så fungerar det! Och så här förbättras det enkelt*. [Online]

Available at: <https://energybuilding.se/sjalvdragsventilation/>

[Använd 19 11 2020].

European Commission, 2020. *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. [Online]

Available at: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

[Använd 13 02 2021].

FEBY 18, 2018. *FEBY 18*. [Online]

Available at: <https://www.feby.se/files/2019-01/kravspecifikation-feby18.pdf>

[Använd 16 12 2020].

FEBY, 2020. *Värmeförlusttal*. [Online]

Available at: <https://www.feby.se/V%C3%A4rme%C3%B6rlusttal>

[Använd 05 12 2020].

Folkhälsomyndigheten, 2014. *Folkhälsomyndighetens allmänna råd om temperatur inomhus*. [Online]

Available at:

<https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/dal3aa23b84446d3913c4ec32a6a276d/fohmfs-2014-17.pdf>

[Använd 10 12 2020].

Fortum, 2020. *Hur fungerar solceller?*. [Online]

Available at: <https://www.fortum.se/privat/smarta-hem/solceller/hur-fungerar-solceller#:~:text=Solceller%20omvandlar%20solens%20strålar%20till,antal%20solceller%20till%20en%20solpanel>

[Använd 02 12 2020].

Fortum, 2020. *Vår unika batterilösning vid Forshuvuds kraftverk*. [Online]

Available at: <https://www.fortum.se/om-oss/hallbarhet/investeringar-i-vattenkraft/var-unika-batterilosning-vid-forshuvuds-kraftverk>

[Använd 20 01 2021].

Fossilfritt Sverige, 2021. *Strategi för fossilfri konkurrenskraft - vätgas, u.o.: u.n.*

Free Energy, 2020. *HYSS - mer än en värmepump!*. [Online]

Available at: <https://www.free-energy.com/se/hyss#section-5>

[Använd 05 12 2020].

Göteborgs Energi, 2020. *Energilagring från vind och sol*. [Online]

Available at: <https://www.goteborgenergi.se/i-var-stad/artikelbank/energilagring-fran-vind-och-sol-din-guide-i-lagringsdjungeln>

[Använd 22 11 2020].

GDS, 2019. *Slipp köldbryggor*. [Online]

Available at: <https://gds.se/hus/inomhusklimat/slipp-koldbryggor>

[Använd 30 11 2020].

Hemsol, 2020. *kW, kWp och märkeffekt för solceller*. [Online]

Available at: <https://hemsol.se/vanliga-fragor/kwp-och-kwh/>

[Använd 02 12 2020].

Hemsol, 2020. *Soltak: Tak av solceller*. [Online]

Available at: <https://hemsol.se/solcellspaket/soltak/>

[Använd 02 12 2020].

If, 2021. *Batteriguiden*. [Online]

Available at: <https://www.if-sakerhet.se/batteriguiden>

[Använd 20 01 2021].

IVA, 2015. *Energilagring*. [Online]

Available at: <https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagval-el-lagring.pdf>

[Använd 28 11 2020].

Jämtkraft, 2020. *Hur fungerar vattenkraft?*. [Online]

Available at: <https://www.jamtkraft.se/om-jamtkraft/var-fornybara-produktion/vattenkraft/hur-fungerar-vattenkraft/>

[Använd 01 12 2020].

Jernkontoret, 2020. *Lagring av elektrisk energi*. [Online]

Available at: <https://www.energihandbok.se/lagring-av-elektrisk-energi#:~:text=Svänghjul%20kan%20lagra%20elektrisk%20energi,en%20verkningsgrad%20på%20nästan%2090%20%25>

[Använd 23 11 2020].

Jernkontoret, 2020. *Lagring av termisk energi*. [Online]

Available at: <https://www.energihandbok.se/lagring-av-termisk-energi#:~:text=Det%20finns%20tre%20huvudtyper%20av,Kemisk%20värmelagring>

[Använd 23 11 2020].

Jernkontoret, 2020. *Värmeöverföring*. [Online]

Available at: <https://www.energihandbok.se/varmeoverforing>

[Använd 22 11 2020].

Konsumenterna Energimarknadsbyrå, 2020. *Vad är fjärrvärme?*. [Online]

Available at: <https://www.energimarknadsbyran.se/fjarrvarme/vad-ar-fjarrvarme/>

[Använd 27 11 2020].

Kraftringen, 2021. *Anslut till Kraftringens elnät*. [Online]

Available at: <https://www.kraftringen.se/brf/el/elnat/anslut-till-elnetet/>

[Använd 02 02 2021].

Mariestad, 2021. *Projekt Kronoparkens förskola*. [Online]

Available at: <https://mariestad.se/Mariestads-kommun/Foretag--naringsliv/ElectriVillage-Mariestad/Projekt-Kronoparkens-forskola>

[Använd 24 02 2021].

Nationalencyklopedin, 2021. *Knallgas*. [Online]

Available at: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/knallgas>

[Använd 24 02 2021].

Nationalencyklopedin, 2021. *Väte*. [Online]

Available at: <https://www-ne-se.ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/väte>
[Använd 27 01 2021].

Naturskyddsföreningen, 2020. *En miljard människor i energifattigdom*. [Online]

Available at: <https://www.naturskyddsforeningen.se/nyheter/en-miljard-manniskor-i-energifattigdom#:~:text=I%20dag%20är%202%2C8,helt%20utan%20tillgång%20till%20elektricitet.&text=Utan%20tillgång%20till%20elektricitet%20är,hålla%20mat%20nedkyld%20eller%20fryst>
[Använd 20 11 2020].

Naturskyddsföreningen, 2020. *Faktablad: Solceller och solfångare*. [Online]

Available at: https://www.naturskyddsforeningen.se/skola/energifallet/faktablad-solceller-och-solfangare?gclid=Cj0KCCQiA7qP9BRCLARIsABDaZzjJZKg6N7YTe9ptyEzUrJKjyA8z_iiXSO3FktjsNfPqICZ31SUCA78aAnReEALw_wcB
[Använd 02 12 2020].

Naturskyddsföreningen, 2020. *Ny lagstiftning för vattenkraften är här!*. [Online]

Available at: <https://www.naturskyddsforeningen.se/vad-vi-gor/hav/vattenlagstiftning>
[Använd 03 12 2020].

Naturvårdsverket, 2013. *2050 Ett koldioxid neutralt Sverige*, u.o.: u.n.

Naturvårdsverket, 2021. *Klimatklivet - beräkna utsläppsminskning för publika laddningsstationer*. [Online]

Available at: <https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/bidrag-och-ersattning/bidrag/klimatklivet/klimatvardering-av-publika-laddningsstationer-20210115.pdf>
[Använd 10 02 2021].

Nel Hydrogen, 2019. *Status and Q&A regarding the Kjørbo incident*. [Online]

Available at: <https://nelhydrogen.com/status-and-qa-regarding-the-kjorbo-incident/>
[Använd 02 03 2021].

Nel Hydrogen, 2021. *Capital Markets Day 2021*. [Online]

Available at: <https://nelhydrogen.com/cmd/>
[Använd 23 02 2021].

NIBE, 2020. *Bergvärme*. [Online]

Available at: <https://www.nibe.eu/sv-se/kunskapsbank/sa-fungerar-det/bergvarme>
[Använd 26 11 2020].

Nilsson Energy, 2021. Intervju

Nord Pool, 2021. *Day-ahead prices*. [Online]

Available at: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table>
[Använd 01 03 2021].

Northvolt, 2021. *Northvolt*. [Online]
Available at: <https://northvolt.com/solutions>
[Använd 20 01 2021].

Ny Teknik, 2019. *Nedlagda gruvan blir energilager med tryckluft*. [Online]
Available at: <https://www.nyteknik.se/energi/nedlagda-gruvan-blir-energilager-med-tryckluft-6948775>
[Använd 25 11 2020].

Ny teknik, 2019. *Tiotalet nya aktörer vill återvinna litumbatterier*. [Online]
Available at: <https://www.nyteknik.se/energi/tiotalet-nya-aktorer-vill-atervinna-litumbatterier-6965674>
[Använd 20 01 2020].

Passivhuscentrum, 2020. *Vad är ett U-värde?*. [Online]
Available at: <https://www.passivhuscentrum.se/u-varde/#:~:text=Ett%20nybyggt%20hus%20av%20traditionellt,v%C3%A4rde%20inte%20f%C3%A5r%20%C3%B6verstiga%200.6>
[Använd 15 12 2020].

Polarpumpen, 2016. *Så fungerar en värmepump*. [Online]
Available at: <https://www.polarpumpen.se/blogg/sa-fungerar-en-varmepump/>
[Använd 20 11 2020].

Polarpumpen, 2020. *FRÅNLUFTSVENTILATION MED VÄRMEÅTERVINNING (FX)*. [Online]
Available at:
<https://www.polarpumpen.se/ventilation/kunskapsbank/ventilationsteknik/mekanisk-franluft-med-varmeatervinning-fx>
[Använd 18 12 2020].

Polarpumpen, 2020. *MEKANISK TILL- OCH FRÅNLUFTSVENTILATION (FT)*. [Online]
Available at: <https://www.polarpumpen.se/ventilation/kunskapsbank/ventilation-sa-fungerar-det/ventilationsteknik/mekanisk-till-och-franluft-ft>
[Använd 18 12 2020].

Polarpumpen, 2020. *MEKANISK TILL- OCH FRÅNLUFTSVENTILATION MED VÄRMEÅTERVINNING (FTX)*. [Online]
Available at:
<https://www.polarpumpen.se/ventilation/kunskapsbank/ventilationsteknik/mekanisk-till-och-franluft-med-varmeatervinning-ftx>
[Använd 18 12 2020].

Power Circle, 2020. *Lokal energilagring eller traditionella nätförstärkningar?*. [Online]

Available at: <https://powercircle.org/wp-content/uploads/2020/06/Slutrapport.pdf>
[Använd 20 01 2020].

Power Circle, 2021. *Elbilsstatistik*. [Online]
Available at: <https://www.elbilsstatistik.se/elbilsstatistik>
[Använd 18 02 2021].

Power Circle, 2021. *Kunskap*. [Online]
Available at: <https://powercircle.org/kunskap/>
[Använd 18 02 2020].

PowerCell, 2021. *Hur fungerar bränsleceller?*. [Online]
Available at: <https://powercell.se/sv/hur-fungerar-braensleceller>
[Använd 02 03 2021].

PowerCell, 2021. *Products and solutions*. [Online]
Available at: <https://powercellution.com/products-and-solutions/>
[Använd 25 02 2021].

Roxbergh, K., 2020. *Vattenfall, Container hos Boliden Bergsöe* [Intervju] (18 12 2020).

SaltX, 2019. *SaltX pilotanläggning i Berlin är igång*. [Online]
Available at: <https://saltxtechnology.com/saltx-pilotanlaggning-i-berlin-ar-igang/>
[Använd 02 12 2020].

SCB, 2020. *Priser på el för hushållskunder 2007–*. [Online]
Available at: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/prisutvecklingen-inom-energiomradet/energipriser-pa-naturgas-och-el/pong/tabell-och-diagram/genomsnittspriser-per-halvar-2007/priser-pa-el-for-hushallskunder-2007/>
[Använd 10 02 2021].

SGU, 2018. *Kobolt – en konfliktfylld metall*. [Online]
Available at: <https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2018/januari/kobolt--en-konfliktfylld-metall/>
[Använd 20 01 2021].

SGU, 2020. *Kartvisare brunna*. [Online]
Available at: <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>
[Använd 15 12 2020].

Sjöbohem, 2020. *Vi minskar klimatpåverkan på riktigt - unikt vätgasprojekt byggs av AB Sjöbohem*. [Online]
Available at: <https://www.sjobo.se/arkiv/nyhetsarkiv/nyheter/2020-10-15-vi-minskar-klimatpaverkan-pa-riktigt---unikt-vatgasprojekt-byggs-av-ab-sjobohem.html>
[Använd 23 02 2021].

Skatteverket, 2014. *Beskattnings av gasblandningar som levereras via rörledning och av vissa gaser för vilka inga skattesatser fastställts*. [Online]
Available at: <https://www4.skatteverket.se/rattsligvagledning/323561.html?date=2014-01-30&q=vätgas>
[Använd 03 03 2021].

Skatteverket, 2021. *Beskattnings av vätgas som förbrukas i motordrivna fordon, fartyg eller luftfartyg*. [Online]
Available at:
<https://www4.skatteverket.se/rattsligvagledning/390294.html?fbclid=IwAR1Oov7Y7qVkt8y6U-nVPp15Mg78CN5VsPxu3lhacdC9le3dyNO9JUif39Y>
[Använd 01 03 2021].

Solör Bioenergi, 2020. *Biobränsle & bioenergi – vad är det och hur funkar det?*. [Online]
Available at: <https://solorbioenergi.se/biobransle-och-bioenergi-vad-ar-det/>
[Använd 08 12 2020].

Solör Bioenergi, 2020. *Fjärrvärme – för och nackdelar*. [Online]
Available at: <https://solorbioenergi.se/fjarrvarme-for-och-nackdelar/>
[Använd 28 11 2020].

Solkompaniet, 2020. *Vad består solceller av?*. [Online]
Available at: <https://solkompaniet.se/fragor-och-svar-solel/vad-betar-solceller-av/>
[Använd 02 12 2020].

SP fönster, 2020. *LT & G-VÄRDE FÖR VÅRA GLASKOMBINATIONER*. [Online]
Available at: <https://spfonster.se/wp-content/uploads/2020/09/glasvarden-190820.pdf>
[Använd 15 12 2020].

SP fönster, 2020. *Två eller treglasfönster?*. [Online]
Available at: <https://spfonster.se/inspiration/2-glasfonster-vs-3-glasfonster/>
[Använd 15 12 2020].

Sundén, B., 2019. *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*. u.o.:u.n.

SVEBY, 2009. *Brukarindata för energiberäkningar i bostäder*. [Online]
Available at: http://www.sveby.org/wp-content/uploads/2011/06/brukarindata_bostader.pdf
[Använd 18 12 2020].

Sweden Green Building Council, 2020. *Certifiera med Miljöbyggnad*. [Online]
Available at: <https://www.sgbc.se/certifiering/miljobyggnad/certifiera-med-miljobyggnad/>
[Använd 15 12 2020].

Svenska Kraftnät, 2019. *Drift och elmarknad*. [Online]
Available at: <https://www.svk.se/drift-av-transmissionsnätet/drift-och-elmarknad/>
[Använd 20 11 2020].

Svenska miljöinstitutet, 2020. *Ny rapport om elbilsbatteriers klimatpåverkan*. [Online]
Available at: <https://www.ivl.se/toppmeny/press/pressmeddelanden-och-nyheter/pressmeddelanden/2019-11-28-ny-rapport-om-elbilsbatteriers-klimatpaverkan.html>
[Använd 20 01 2021].

Tesla, 2021. *Powerpack*. [Online]
Available at: https://www.tesla.com/sv_SE/powerpack?redirect=no
[Använd 20 01 2021].

Tidningen Energi, 2020. *Batteripaket i vattenkraftverk stödjer elnätet*. [Online]
Available at: <https://www.energi.se/artiklar/batteripaket-i-vattenkraftverk-stodjer-elnatet/>
[Använd 20 01 2021].

UNDP, 2020. *Om globala målen*. [Online]
Available at: <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>
[Använd 09 10 2020].

Uniper, 2020. *Elbristen i södra Sverige är en väckarklocka*. [Online]
Available at: <https://www.uniper.energy/sverige/nyheter/elbristen-i-soedra-sverige-aer-en-vaeckarklocka/>
[Använd 16 11 2020].

Värmevärden, 2020. *Bergrum blev "jättetermos"*. [Online]
Available at: <https://varmevarden.se/story/bergrum-blev-jattetermosar/>
[Använd 02 12 2020].

Västra Götalandsregionen, 2017. *Energi & teknik*. [Online]
Available at: <https://www.vgregion.se/regional-utveckling/verksamhetsomraden/miljo/power-vast/fakta-om-vindkraft/energi--teknik/?vgrform=1>
[Använd 25 11 2020].

Vätgas Sverige, 2020. *Bränslecellen – så funkar den!*. [Online]
Available at:
<https://www.vatgas.se/faktabank/bransleceller/#:~:text=En%20bränslecell%20är%20en%20energiomvandlare,vätgasens%20kemiska%20energi%20till%20elektricitet.&text=Verkningsgraden%20hos%20en%20bränslecell%20är,som%20uppstår%20då%20vätgasen%20tillverkas>
[Använd 15 12 2020].

Vattenfall, 2019. *Så fungerar vindkraft*. [Online]

Available at: <https://www.vattenfall.se/fokus/hallbarhet/hur-fungerar-vindkraft/>
[Använd 23 11 2020].

Vattenfall, 2019. *Förnybar och fossilfri energi – vad är skillnaden?*. [Online]

Available at: <https://www.vattenfall.se/fokus/hallbarhet/fornybar-eller-fossilfri-energi/>
[Använd 10 12 2020].

Vattenfall, 2020. *Kommer elen att räcka till alla elbilar?*. [Online]

Available at: <https://www.vattenfall.se/fokus/eldrivna-transporter/racker-elen-till-elbilarna/#:~:text=En%20bil%20kör%20i%20snitt,i%20snitt%20%20kWh%2F%20mil>
[Använd 18 02 2021].

Vattenfall, 2020. *Passivhus och lågenergihus - framtidens boende är redan här*. [Online]

Available at: <https://www.vattenfall.se/fokus/trender-och-innovation/passivhus/>
[Använd 18 12 2020].

Vattenfall, 2020. *Pilotprojekt använder salt för energilagring*. [Online]

Available at: <https://group.vattenfall.com/se/nyheter-och-press/nyheter/2017/pilotprojekt-anvander-salt-for-energilagring#:~:text=Så%20här%20fungerar%20det&text=Energin%20lagras%20kemiskt%20genom%20att,kan%20upprepas%20några%20få%20gångar>
[Använd 02 12 2020].

Vattenfall, 2020. *Solenergi*. [Online]

Available at: <https://www.vattenfall.se/solceller/hur-fungerar-solceller/solenergi/>
[Använd 03 12 2020].

Ventilation.se, 2020. *Om ventilation*. [Online]

Available at: <https://ventilation.se/om-ventilation>
[Använd 18 12 2020].

WindEn, 2020. *Definition av gårdsverk*. [Online]

Available at: <http://www.winden.se/steg-foer-steg/definition-av-gaardsverk.html>
[Använd 06 12 2020].

WWF, 2020. *Vad är biobränslen?*. [Online]

Available at: <https://www.wwf.se/skog/varlden/vad-ar-biobransle/>
[Använd 07 12 2020].

Yellon, 2020. *Så fungerar Vätterhem YEAH*. [Online]

Available at: <https://yellon.se/blog/yeah/>
[Använd 20 02 2021].

ZeroSun, 2021. *Zerosun*. [Online]
Available at: <https://www.zerosun.se>
[Använd 22 02 2021].