



Bergvärme i kombination med solceller hos Skolfastigheter

Adam Dufvenmark Wolf, Elsa Snöbohm Hartzell, Christoffer Segerstedt, Cornelia Enbacka, Amanda Albrecht, Vera Beckius, Anton Silier

Självständigt arbete i energisystem • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2023:17 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2023



Bergvärme i kombination med solceller hos Skolfastigheter

Geothermal heat in combination with solar cells on school properties

Adam Dufvenmark Mark, Elsa Snöbohm Hartzell, Christoffer Segerstedt,
Cornelia Enbacka, Amanda Albrecht, Vera Beckius, Anton Silier

Handledare: Gunnar Larsson, SLU, institutionen för energi och teknik
Examinator: David Ljungberg, SLU, institutionen för energi och teknik

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E
Kurstitel: Självständigt arbete i energisystem
Kurskod: EX0946
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2023
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2023:17
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: *VRF-batteri, LFP-batteri, vätgaslagring, energioptimering, energikalkyl*

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

The purpose of this essay is to examine the dimensioning of sustainable energy systems for two properties in Uppsala, Länna school and Funbo preschool. This essay's main focus is on the implementation of solar cells in combination with geothermal heat on the two mentioned buildings. In addition to the combination, storage options will also be investigated. The goal is to optimize the energy systems for the schools from both an energy and financial perspective and this will be viewed from the company Skolfastigheter AB's perspective. Data from the schools containing energy use and energy demand along with hourly solar radiation are used in the method to create four different models that will be implemented on the properties. All models were created in the program MatLab, while the financial calculation was designed in Microsoft Office Excel.

The result presents the monthly heat production from the geothermal heat pump for Länna school together with the electrical power demand for the year 2022. The essay only takes the implementation of solar cells and energy storage into account for Funbo, since they already have an existing geothermal heat pump. Länna school's solar cell system had a total installed power of 19,0 kW, while Funbo preschool had 88,4 kW. The excess production from the solar cell system for Länna school and Funbo preschool was 5 550 kWh and 31 300 kWh respectively for the year 2022. The payback period for the main system for Länna school was 5,22 years and for Funbo preschool 9,63 years. The result is presented in graphs together with a financial estimate for each model and system where installation costs and operating costs were calculated. The conclusions are that geothermal energy in combination with solar cells is considered to be more energy efficient and environmentally advantageous compared to the current energy system for both schools. The main system together with hydrogen storage and battery storage is considered to be the most energy efficient dimensioning for the schools. From a financial perspective, the main system is considered the most profitable for Funbo preschool. For Länna school, the main system together with battery storage is considered as the best option, even though only the main system is most economically viable.

Sammanfattning

Syftet med denna uppsats är att undersöka dimensionering av hållbara energisystem för två fastigheter i Uppsala, Länna skola och Funbo FSK. Undersökningen fokuserar främst på implementering av solceller i kombination med bergvärme på dessa byggnader. Tillsammans med kombinationen kommer dessutom lagringsalternativ att undersökas. Målet är att optimera systemen för skolorna från både ett energi- och ekonomiperspektiv och detta undersöks från företaget Skolfastigheter ABs perspektiv. Data från skolorna med energianvändning och energibehov tillsammans med timvis solinstrålning används i metoden för att skapa fyra olika modeller att implementera på fastigheterna. Samtliga modeller skapades i programmet MatLab, medan den ekonomiska kalkylen utformades i Microsoft Office Excel.

Resultatet presenterar månadsvis värmeproduktion från bergvärmepumpen för Länna skola tillsammans med elbehovet för år 2022. Funbo FSK hade sedan tidigare redan en installerad bergvärmepump så för Funbo undersöktes endast tillägget av solceller och lagringsalternativ. Länna skolans solcellssystem hade sammanlagd installerad effekt på 19,0 kW medan Funbo FSK hade 88,4 kW. Överproduktionen från solcellssystemet för Länna skola och Funbo FSK var 5 550 kWh respektive 31 300 kWh på ett år. Återbetalningstiden för grundsystemet för Länna skola var 5,22 år och för Funbo FSK 9,63 år. Resultatet presenteras i grafer tillsammans med en ekonomisk uppskattning för varje modell och system där installationskostnader och driftkostnader beräknades. Slutsatserna som drogs var att bergvärme i kombination med solceller anses vara energimässigt och miljömässigt fördelaktigt jämfört med nuvarande energisystem för bägge skolor. Grundsystemet tillsammans med vätgaslagring och batterilagring anses vara den mest energieffektiva dimensioneringen för skolorna. Från ett ekonomiskt perspektiv anses grundsystemet vara mest lönsamt för Funbo FSK. För Länna skola anses grundsystemet tillsammans med batterilagring som bästa alternativ, däremot är endast grundsystemet mest ekonomiskt.

Innehåll

1	Inledning	4
1.1	Syfte	4
1.2	Frågeställningar	4
1.3	Avgränsningar och antaganden	4
2	Bakgrundsteori	5
2.1	Solceller	5
2.2	Bergvärme	6
2.2.1	Dimensionering	6
2.3	Lagring	7
2.3.1	Vanadium redox flödesbatterier (VRF-batteri)	7
2.3.2	Vätgas	7
2.3.3	Ferroamp-systemet	7
2.4	Säkerhet	8
2.5	Skolfastigheter	8
2.5.1	Länna skola	8
2.5.2	Funbo förskola	8
3	Metod	9
3.1	Dimensionering av bergvärmen	9
3.2	Dimensionering av solcellerna	9
3.3	Dimensionering av lagringsalternativen	10
3.4	Ekonomisk kalkyl	10
4	Resultat	11
4.1	Länna skola	11
4.1.1	Modell 1, grundsystemet	11
4.1.2	Modell 2, grundsystemet med VRF-batteri som lagring	12
4.1.3	Modell 3, grundsystemet med VRF-batteri i kombination med vätgas	13
4.1.4	Modell 4, Ferroamp-systemet	13
4.2	Funbo förskola	14
4.2.1	Modell 1, grundsystemet	14
4.2.2	Modell 2, grundsystemet med VRF-batterilagring	15
4.2.3	Modell 3, grundsystemet med batterilagring i kombination med vätgas	15
4.2.4	Modell 4, Ferroamp-systemet	15
4.3	Ekonomisk uppskattning	17
4.3.1	Länna skola	17
4.3.2	Funbo FSK	17
5	Diskussion	17
6	Slutsatser	19

1 Inledning

I dagens samhälle har det blivit klart att den användning av fossila bränslen som sker idag inte är hållbar och behöver fasas ut. Samtidigt är samhället präglad av de höga elpriserna och det ökade energibehovet. Flera miljövänligare alternativ har därför blivit allt mer intressanta både för att fasa ut fossila bränslen men även för att bli mer självförsörjande (Naturskyddsföreningen, 2023). I Sverige finns potential för flera olika energikällor där solceller fortfarande är en relativt outnyttjad resurs. En anledning är att solenergi i jämförelse med andra förnybara energikällor ofta har högre kostnad per kWh (Ekonomifakta, 2023). Implementering av solceller kan vara intressant för skolor då de har sin primära energianvändning under dagtid när solcellerna producerar som mest elkraft.

Skolors största energibehov ligger i uppvärmingen (Naturskyddsföreningen, 2022). Därför är system där solceller dels driver en värmepump för skolans värmebehov och samtidigt täcker elektricitetsbehovet intressanta. Uppsala har underlag för flera värmesystem, där bergvärme anses vara bra för större anläggningar med större energibehov än en privat bostad (Energimyndigheten, 2022). I följande projekt undersöks hur solceller i kombination med bergvärme påverkar två skolors energikostnader samt om det är möjligt att implementera och i sådant fall lönsamt. Skolorna som undersöks är Länna skola och Funbo förskola i Uppsala. Skolornas energianvändning används för att undersöka om de är väl anpassade för solceller i kombination med bergvärme.

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete är att omforma nya hållbara energisystem för Funbo och Länna skola. Detta genom att byta värmesystem för Länna skola samt implementera solceller och dimensionera lagringsalternativ för båda skolorna. Målet med arbetet är att utvärdera energimässiga och ekonomiska konsekvenser för de olika alternativen presenterade i arbetet.

1.2 Frågeställningar

- Hur ska skolornas utökade energisystem dimensioneras och vad ska det innehålla ur ett energieffektivt perspektiv?
- Vilket system är mest lönsamt, det vill säga vilket system har kortast återbetalningstid?
- Vilka miljö- samt säkerhetsaspekter bör beaktas?

1.3 Avgränsningar och antaganden

I detta arbete prioriteras ett energiperspektiv. Ett ekonomiskt perspektiv beaktas men är inte i störst fokus. För implementering av solceller antas taket vara bärande och behöver därmed inte renoveras. Vidare antas solinstrålningen vara samma i Uppsala som i Stockholm. De fåtal fall då temperaturen överskrider 24,0 °C påverkas solcellernas verkningsgrad men detta uppskattas vara försumbart i arbetets modeller. Gällande implementation av bergvärme antas berggrunden vara densamma som en allmän uppskattning i Uppsala. Mer specifika lokala förutsättningar för respektive skola undersöks ej. Det vattenburna systemet antas hålla vid implementeringen av bergvärmen. Vid omställningen från högtempererat system till lågtempererat system antogs även de nuvarande radiatorerna att hålla. Vid energieffektivisering av uppvärmningssystemet är det även viktigt att energieffektivisera byggnaden för att minska uppvärmningsbehovet, men detta kommer inte undersökas i denna rapport. De lagringsmetoder som undersöks är endast vätgaslagring och två typer av batterilagring. Lagringskapaciteten för systemet samt produktionen av elkraft kommer studeras timvis, mer specifika värden tas ej med i beräkning. I simuleringen laddas lagringsmetoderna upp till dess respektive kapacitet och laddas sedan ur vid behov.

2 Bakgrundsteori

På en skola i Uppsala kan bergvärme vara ett effektivt och miljövänligt alternativ för uppvärmning. Bergvärme är en hållbar lösning som kan bidra till att en skola minskar sitt koldioxidavtryck och samtidigt, på lång sikt, sparar pengar på energianvändning. Till skillnad från markvärme, som utnyttjar markens lagrade solenergi, utnyttjar bergvärme berggrundens lagrade solenergi. Bergvärme kan effektivt anpassas till en byggnads värmebehov samt varmvattenbehov. Man kan således säkerställa att byggnaden har tillräckligt med uppvärmning under hela året, oavsett utetemperatur och värmebehov (Lundberg, 2015).

En möjlig kombination är att installera solceller på taket och använda den producerade elkraften för att delvis driva en värmepump som utnyttjar bergvärmens. Solcellerna genererar elkraft under dagen när solen skiner och överskottet kan användas direkt till bergvärmens, lagras i batterier eller säljas till elnätet (Finspåns Brunnsborrning AB, 2022).

2.1 Solceller

De vanligaste typerna av solceller som förekommer på svenska marknaden idag är poly- och monokristallina solceller. Polykristallina (multi-Si) består av flera sammansmälta, oorganiserade kiselkristaller som resulterar i en blåaktig färg på panelerna. Verkningsgraden är ca 15,0-17,0% och passar bra för en större yta. Den andra är monokristallina (mono-Si) som består av en kiselkristall som ligger i samma riktning som panelen och kännetecknas av sin svarta färg. Resultatet blir en högre verkningsgrad på 15,0-22,0%. Eftersom monokristallina solcellspaneler har en högre effekt per kvadratmeter rekommenderas de vid installation av takpaneler (Beckius och Enbacka, 2023).

För att undvika effektförluster vid skugga, används bypass-dioder som identifierar spänningsskillnader mellan celler och jämnar ut dem. Solcellernas producerade energi beräknas enligt nedanstående formel, där S är solinstrålningen i kWh/m², A är arean i m² samt η står för verkningsgraden (Beckius och Enbacka, 2023)

$$E = S * \eta * A \quad (1)$$

Vid uppbyggnad av ett solcellssystem på en fastighet krävs ett antal viktiga komponenter. Dels krävs själva solcellsmodulerna, växelriktare, elcentral, elmätare, kablage och slutligen monteringsutrustning. Växelriktaren väljs efter hur mycket el som systemet kan producera och är en viktig komponent med två huvuduppgifter. Den omvandlar likströmmen som solcellerna genererar till växelström som finns i vanliga eluttag och ser till att solcellerna är optimalt belastade. Det vill säga att man får ut mest effekt vid olika solinstrålning. Verkningsgraden på en växelriktare baseras på hur effektivt omvandlingen från likström till växelström sker samt hur väl en växelriktare bibehåller optimal belastning på solcellerna. Verkningsgraden för en växelriktare är cirka 95,0% (Beckius och Enbacka, 2023).

Systemförluster uppstår hos solcellsanläggningar på grund av dess olika komponenter och kopplingarna däremellan. De totala systemförlusterna från solcellerna till eluttagen är ungefär 14,0%. För ett system med energilagring i form av batterier tillkommer ytterligare förluster till följd av transformering mellan växelström och likström. Ett sådant system har systemförluster på ungefär 20,0%. Dessa systemförluster inkluderar alla komponenter (Beckius och Enbacka, 2023).

Ur ett miljöperspektiv är tillverkningen av solceller det som påverkar miljön mest då det generellt används fossila bränslen. Processen att utvinna och rena kisel är väldigt energikrävande. Även då en solcell endast består av cirka 3,00% kisel står reningsprocessen för cirka 70,0% av det totala utsläppen vid framställningen. Ungefär 70,0% av världens solceller är producerade i Kina som ständigt undersöks för inhumana arbetsförhållanden. Solcellerna fraktas sedan till Sverige för att implementeras som en del av det förnybara energisystemet (Beckius och Enbacka, 2023).

2.2 Bergvärme

Bergvärme är en teknik som använder energi som naturligt lagras i berggrunden för att värma upp byggnader. Därav är bergvärmens en stabil och konstant värmekälla som kan användas året runt. Vid installation av bergvärme borras hål på 100-200 meter ner i berggrunden för att utvinna den naturligt lagrade solenergin. Enligt lagstiftning behöver borrhålen vara 20 meter ifrån varandra för att inte påverka varandras uppvärmningsförmåga, samt tio meter från tomtgränsen. Vid installation av bergvärme i Uppsala kommun behövs ett skriftligt beslut från kommunen, granskat av Uppsala vatten. Om installationen ska ske inom kommunens skyddsområde för vattentäkt behöver man söka tillstånd, i övriga fall krävs endast anmälan. Om fastigheten är en större anläggning krävs även dispens från länsstyrelsen (Uppsala kommun, 2023).

Geografiska förutsättningar syftar främst på vilken bergart som finns i området där bergvärme ska implementeras. Optimalt är urberg med hög kvartshalt såsom gnejs och gnejsgranit där Uppsala primärt består av granitoider vilket är lämpligt för bergvärme (SGU, 2023). Därför behöver man nödvändigtvis inte borra så djupt för att utvinna värmen. Även jorddjup är en viktig faktor för installation av bergvärme. Ett längre djup från markytan till berggrunden kan medföra större investeringskostnader (SGU, 2017).

För att använda bergvärme behöver man borra en eller flera energibrunnar i marken. Genom dessa brunnar pumpas en kylvätska som cirkulerar i ett slutet system. Vätskan absorberar berggrundens värme som sedan utvinns med hjälp av kompressorteknik och distribueras via vatten i byggnadens radiatorer. Kylvätskans värme överförs till ett köldmedie som förångas. Ångan går genom en kompressor där trycket och temperaturen ökar för att därefter gå via en kondensator ut i husets vattensystem. Sist kyls köldmediet återigen i en expansionsventil (Björk m. fl., 2013). Effektiviteten av bergvärmesystemet bestäms av bergvärmepumpens coefficient of performance (COP-värde), eller det årliga motsvarande medelvärdet, SCOP värdet. COP beskriver relationen mellan värmeförlust från pumpen och den elkraft som krävs för att producera värmen enligt ekvationen 2 och kan variera årligen.

$$E = Q/COP \quad (2)$$

Där E är elenergin i kWh som krävs för att producera Q mängd värme i kWh till byggnaden (Björk m. fl., 2013).

2.2.1 Dimensionering

Vid dimensionering av bergvärme behöver ett flertal parametrar fastställas. För maximal energibesparing är det lönsamt att använda en varvtalsstyrd bergvärmepump med en teoretisk effekttäckning på omkring 60,0%, vilket motsvarar en total energitäckning på 98,0%. Effekttäckning är den mängd effekt bergvärmepumpen täcker vid den kallaste tidpunkten på året. Vidare är det lönsamt att implementera en elpatron som täcker det övriga effektbehovet vid dagar med stort värmebehov (Björk m. fl., 2013). Genom rådgivning från experter inom bergvärme upptäcktes risker som dimensioneringen kan medföra. Exempelvis kan potentiell urlakning av värme i berget uppstå. Om temperaturen i berggrunden minskar så minskar även effektupptaget. Därför överdimensioneras systemet utifrån en energikalkyl till en effekttäckningsgrad på 84,0% (IVT, 2023).

Elpatronen används som tillsatsvärme men även som säkerhetsskydd för driftstörningar. Elpatronen respektive bergvärmepumpen har olika verkningsgrad och därför beaktas elpatronens elanvändning i beräkningar (Björk m. fl., 2013). Vidare har elpatronen en årlig passiv elförbrukning runt 100-150 kWh (Fasth, 2021). Den mängd aktiva borrhålsmeter beräknas då den installerade effekten är fastställd. Enligt IVT:s projekteringsanvisning uppskattas bergets värmeledningsförmåga vara omkring 52,0 W/m (IVT, 2023).

Investeringskostnaden för bergvärme kan uppskattas vara linjär efter en viss startkostnad. Detta beräknas med hjälp av den installerade effekten enligt ekvation 3. Investeringskostnaden innefattar bergvärmepump, borrhål, kollektorslang, medföljande isolering samt investeringskostnad (Björk m. fl., 2013).

$$I = 53 \cdot P^{0,4574} \quad (3)$$

I står för investeringskostnaden i kronor och P är effekten i watt.

Den årliga servicekostnaden kan uppskattas vara 1% av den beräknade investeringskostnaden. Livslängden för en bergvärmepump är runt 20,0 år och det anslutna borrhåls systemet 60,0 år (Björk m. fl., 2013).

2.3 Lagring

Vid olika tillfällen, exempelvis under sommarmånaderna, kommer solcellerna att producera mer elkraft än det som konsumeras. Lagrad elenergi kan ge besparingar ekonomiskt samtidigt som det kan kapa de effekttoppar som uppstår på elnätet under dagen och på vintern. Därav kommer en säsongsbaserad vätgaslagring undersökas samt två dygnsbaserade lagringsalternativ i form av olika sorters batterier som lagrar elenergi under dagen för att sedan använda den under natten och morgonen därpå (Albrecht, 2023).

2.3.1 Vanadium redox flödesbatterier (VRF-batteri)

VRF-batteri är en typ av flödesbatterier som ofta används för att lagra energi från solpaneler, vindkraftverk och andra förnybara energikällor. VRF-batteri genererar elkraft genom en elektrokemisk reaktion, vilket är två elektrolyter som innehåller vanadiumjoner i olika oxidationstillstånd. Dessa elektrolyter skiljs åt utav ett membran som släpper igenom joner, men inte elektroner. Vid uppladdning skickas elektroner till ena elektrolyten så att laddningen på vanadiumjonerna ändras. Motsatt effekt sker i andra elektrolyten. När vanadium går igenom membranet och reagerar med varandra, släpps elektroner ut till lasten. Motsatta reaktioner sker i elektrolyterna för att batteriet ska bibehålla sin laddning. Några av fördelarna med VRF-batterier är att de är skalbara, flexibla, har relativt hög effektivitet, lång hållbarhet samt att de fungerar för både små- och storskaliga system. Ytterligare en fördel med VRF-batteri är att det kan laddas och urladdas samtidigt, vilket gör dem användbara för att reglera elnätet och hantera effekttoppar. Flödesbatterier passar bra att implementera tillsammans med ett solcellssystem, då de har en snabb upp- och urladdningsförmåga samt har en bättre temperaturreglering till skillnad från statiska batterier (Albrecht, 2023).

2.3.2 Vätgas

Vätgas är en ytterligare teknik för att lagra energi. Genom elektrolys som innebär att vatten spjälkas till syrgas och vätgas med hjälp av elkraft kan vätgas lagras. Se ekvation 4.



Vätgasen kan lagras under högt tryck för att vid ett senare skede tas ut och användas som bränsle i en bränslecell för grön producerad elenergi. Vätgas är ett rent bränsle vid produktion från vatten och när det används i bränsleceller, producerar det endast vattenånga och värme som restprodukter. En av de största utmaningarna är att vätgas är en lätt gas som kräver högt tryck eller låg temperatur för att lagras effektivt. Dessutom behövs en elektrolysör, kompressor, samt en tank för att systemet ska kunna fungera (Albrecht, 2023).

För att producera ett kilo vätgas krävs 48,0 kWh och medan energiinnehållet av ett kilo vätgas är 33,3 kWh. Vid vidare återelektrifiering är verkningsgraden endast 50,0%, så en stor del av energin går förlorad under processen (Albrecht, 2023).

2.3.3 Ferroamp-systemet

Ferroamp är ett svenskt green-tech företag som fokuserar på energi- och effektoptimering i byggnader. Ferroamp-systemet kopplar ihop solpaneler, elbils-laddning och energilagring för att sedan maximera deras fördelar genom att koppla ihop alla komponenter i ett likströmsnät som går att kontrollera och styra digitalt. Energilagringen är en typ av litiumbatteri, litium-järnfosfat, LFP-batteri. Ett LFP-batteri fungerar genom kemiska reaktioner som sker när batteriet laddas. Batteriet består av anod av grafit, katod av

lithiumjärnfosfat och en elektrolyt av en saltlösning. Vid uppladdning förflyttas lithiumjoner från anoden till katoden och motsatt reaktion sker vid urladdning (Albrecht, 2023).

I ett Ferroamp-system ingår följande komponenter: EnergyHub (växelriktare), SSOer (solsträngsoptimerare), fasbalanserare, lagring i form av LFP-batteri, DC-nät (likströmsnät), elbilsladdare (som inte tas hänsyn till) och EnergyCloud (digitala datainsamlaren). Komponenterna integreras i samma växelriktare istället för att styras separat. Ferroamps EnergyHub fungerar som en växelriktare för både solcellerna och LFP-batteriet. Likströmmen från solcellerna går direkt in i LFP-batteriet utan att transformeras för att undvika omvandlingsförluster. Ferroamps EnergyHub tillsammans med ovannämnda systemkomponenter resulterar i att systemförlusterna på ett solcellssystem med lagringskomponenter kan minska från 20% till 2% då omvandling av strömmen och styrningen av nätet sker på samma ställe i systemet (Albrecht, 2023).

2.4 Säkerhet

Elektriska anslutningar skapar en risk för brand, ofta orsakad av felaktig installation eller bristfälligt underhåll. Problem för solcellsanläggningar uppstår oftast i brytare, lösa kablar och fränkiljare. Risken för räddningspersonal vid brand ökar då byggnaden har solceller. Ett problem är att solcellspaneler producerar el även om de är bortkopplade från elnätet. Så ur ett brandsäkerhetsperspektiv finns det ytterligare aspekter att se över (Albrecht och Silier, 2023).

Vid installation av bergvärme behöver hål borrar i marken, vilket kan påverka grundvattennivåerna och leda till föroreningar. Om systemet inte är korrekt installerat och underhållet kan det uppstå läckage som kan orsaka hälsoproblem eller skador på fastigheten. För att få tillstånd för vätgaslagring krävs kunskap om riskerna och krav på hur installationen ser ut samt mängden vätgas installerad. Riskerna innefattar läckage, brand, högt och lågt tryck samt mycket låga temperaturer som kan orsaka kylrelaterade skador (Albrecht och Silier, 2023).

Ferroamps EnergyHub-system hanterar höga spänningar och kräver därför kraftiga kablar för att hålla systemet säkert. Generellt ska allt material som används för likspänningsnätet vara godkända för DC och erforderlig märkspänning. Annars följer systemet säkerhetsaspekterna för batterier att de ska hanteras med försiktighet. Slutligen undersöks byggnadens säkerhetsaspekter där takets skick och material samt det befintliga elsystemet i byggnaden är de främsta aspekterna som betraktas. När det kommer till bergvärme till byggnader finns inga större krav, det rekommenderas endast att byggnaden har högt energibehov och att berggrunden klarar av borrhålen (Albrecht och Silier, 2023).

2.5 Skolfastigheter

2.5.1 Länna skola

Länna skola är en kommunal grundskola i Uppsala kommun med årskurs 1-3 på. Skolan har ett årligt uppvärmningsbehov på 133 MWh, årligt elektricitetsbehov på 82,1 MWh och har en takarea på 270 m² (Vattenfall, 2023). Fastigheten har tre plan och byggdes år 1956 och har enligt Boverket energiklass G, vilket innebär att energianvändningen är hög (Boverket, 2023; Skolfastigheter AB, u.å.[b]). Byggnaden är alltså inte särskilt energieffektiv och uppvärmningsbehovet hade kunnat minskats betydligt. I dagsläget har Länna skola ett uppvärmningssystem i form av en oljepanna och vill övergå till ett fossilfritt alternativ såsom bergvärme.

2.5.2 Funbo förskola

Funbo förskola är en kommunal förskola i Uppsala kommun med ett årligt elektricitetsbehov på 207 MWh och en takarea på omkring 1300 m² (Vattenfall, 2023). Fastigheten har ett plan, byggdes år 2005 och har en nyimplementerad bergvärmepump (Skolfastigheter AB, u.å.[a]). Därav krävs endast modellering för solcellerna

samt eventuell lagring. Dessutom har byggnaden energiklass C, enligt Robert Hansson från Skolfastigheter AB.

3 Metod

I detta arbete utformades fyra olika modeller för de två skolorna. I modell 1 dimensioneras grundsystemet med bergvärme i kombination med solceller. Vidare kommer lagringsalternativ att undersökas i modell 2, 3 och 4. Samtliga modeller utformades och beräknades med hjälp av programmeringsverktyget MatLab och baseras på data från år 2022. Där existerande data angående elbehov och solinstrålning importerades som färdiga vektorer. Alla modeller skapades i ett och samma script i MatLab för båda skolorna.

3.1 Dimensionering av bergvärmen

För att dimensionera uppvärmningssystemet för Länna skola har en energikalkyl använts som baserades på Länna skolas energideklaration (Boverket, 2023). Energikalkylen utfördes av värmepumpsföretaget IVT och beräknade bergvärmepumpens och elpatronens drivenergi, bergvärmepumpens maximala effektbehov, tillsattsvärmens maximala effektbehov samt totalt aktivt borrhål. På grund av brist på data angående dagligt värmebehov gjordes även en uppskattning av datan samt vidare beräkningar av IVT. Beräkningarna tog i beaktning Länna skolas nuvarande uppvärmningsmetod, energiklass, byggnadsår, byggnadens läge samt värmebehov. Mer specifikt användes ett effektupptag på 52 W/m och markförhållandet uppskattades vara av klass "normalt berg" enligt IVT. Bergvärmepumpens installerade effekt dimensionerades att täcka 84% av effektbehovet den kallaste dagen, som hade en utetemperatur på -18 grader celsius. I kontrast till den årliga medeltemperaturen på 6,7 grader celsius. Elpatronens installerade effekt dimensionerades för att täcka resten av effektbehovet de dagar då värmebehovet överskrider bergvärmepumpens installerade effekt. De aktiva borrhålet beräknades av IVT utifrån bergvärmepumpens dimensioner, de dagliga värmebehoven samt markens energiledarförmåga. Det föreslogs även från IVT att fördela dessa aktiva meter på minst fem borrhål. Vidare föreslogs Pem 40 som slangtyp och etanol som kylmedie med en minimivolym på 388 liter. Elkraften som krävs för att driva värmeproducenterna beräknades utifrån deras SCOP-värden. Bergvärmepumpens och elpatronens SCOP är omkring 3,5 respektive 2,2. Den framräknade dagliga drivenergin för systemet adderades till Länna skolas nuvarande elektricitetsbehov. Datat användes vidare för dimensionering av solceller i Matlab.

3.2 Dimensionering av solcellerna

I samma script som bergvärmemodellen lades solcellsmodellen till för Länna skola, då elbehovet från värmepumpen också ska täckas av solcellernas energiproduktion, om möjligt. Funbo FSK har redan bergvärme installerad därmed inkluderas det redan i elbehovet. Vid implementeringen på både Länna skola samt Funbo FSK användes endast den takarean som ligger i ett gynnsamt läge, vilket innebär mellan sydost till sydväst. Funbo FSK har runt 1300 m² takarean som togs fram med hjälp av Google Maps, men endast hälften av denna kan användas (Google, 2023). Utöver detta tillkommer en faktor på 0,8 då det inte är möjligt att lägga solceller över hela taket (Hemming, 2022b). Detta innebär att Funbo FSK har en aktiv takarean på 492 m². Länna skola har en total takarean på runt 270 m² varav 128 m² ligger i sydostläge och enligt Skolfastigheter ABs solkartläggning är användbart för solceller (Skolfastigheter AB, 2020). Då solcellerna som implementeras på Länna skolas tak inte ligger i optimalt söderläge samt inte har optimal lutning på 40° utan på 22°, tillkommer en förlust på 10,0% (Hemming, 2022a; Skolfastigheter AB, 1986).

De installerade solcellerna som används är monokristallina och har en verkningsgrad på 20,5 % (Ahlsell, 2023b). För att beräkna den timvisa energin som solcellerna kan producera användes ekvation 1. SMHI:s solinstrålningsdata importerades in i MatLab. Strålningsdatan var för Stockholm (Stockholm sol), station 98735, där det antogs att solinstrålningen för Uppsala är jämförbar med den i Stockholm (SMHI, 2023).

Utöver solcellernas verkningsgrad på 20,5% tillkommer inre systemförluster på 14,0% för grundsystemet som också multiplicerades med ekvation 1 för varje timme under ett år (Solcellskollen, 2021). Den producerade energin som solcellerna kunde tillverka jämfördes sedan med timvisa förbrukningen för att sedan beräkna differensen och identifiera timvisa överskotten under ett år.

3.3 Dimensionering av lagringsalternativen

Modellen för lagringsalternativen lades också till i samma script som tidigare nämnda modeller. Det som undersöks för lagring är att kunna lagra det överskott som produceras under ett år. Tre lagringsalternativ undersöks, nämligen VRF-batteri, vätgas samt LFP-batteri. För VRF-batteri och LFP-batteri undersöks daglig lagring medan för vätgas undersöks säsongsbaserad lagring under ett år.

Vid dimensionering av batterilagret anpassades storleken av flödesbatteriets lagringskapacitet till förbrukningen under en sommardag med låg energiförbrukning. Detta innebär att VRF-batteriet kan täcka elbehovet under exempelvis en molnig sommardag. Utifrån detta och Vattenfalls data för energiförbrukningen vid skolorna valdes ett flödesbatteri med lagringskapacitet på 25,5 kWh för Länna skola och ett på 106 kWh för Funbo FSK (Vattenfall, 2023). Ett VRF-batteri på 25,5 kWh lagringskapacitet motsvarar ungefär 0,50 m³ i volym och ett på 106 kWh ungefär 1,75 m³. Flödesbatterierna har en verkningsgrad på 85,0% för hela cykeln. (Zimmerman, 2014).

När flödesbatteriet är uppladdat kan resterande överskott användas till produktion av vätgas. Flödesbatteriet laddas ur så fort elbehovet inte täcks av solcellerna längre, vilket innebär en dagsbaserad lagring medan vätgasen kan användas kommande vinter som säsongsbaserad lagring. Enligt Prof. Werner Antweiler krävs det 48,0 kWh elenergi att producera 1 kg vätgas när det produceras genom elektrolys från vatten och 1 kg vätgas innehåller 33,3 kWh (Antweiler, 2020; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, u.å.). Dock tillkommer en verkningsgrad på 50,0% när man återelektrifierar vätgas till elkraft (American clean power, 2023). Detta motsvarar alltså en total verkningsgrad för hela cykeln på 34,4%.

För Ferroamp-systemet användes samma metod som tidigare nämnda batteri-lagringsalternativet. Dock ändrades urladdningsverkningsgraden på batteriet då Ferroamp-systemets batteri är av en annan typ, LFP-batteri. Urladdningsverkningsgraden för LFP-batteriet är på 93,0% (Ahlseil, 2023a). Systemförlusterna ändrades också då ingen omvandling mellan växelström och likström sker till i växelriktaren mellan solsträngsoptimeraren och LFP-batteriet. För denna modell antogs systemförlusterna vara 2,00% istället för 20,0% då det betraktas som ett rent likströmsnät (Ferroamp, 2021).

3.4 Ekonomisk kalkyl

För att beräkna kostnaderna vid implementeringen av solcellsanläggning på både Länna skola och Funbo FSK användes en solcellskalkyl från företaget Elkedjan. I kalkylen valdes den bestämda typen monokristallina solceller, specifika takyta, vädersträck samt lutningsvinkeln på taket och genererar därefter en approximativ kostnad för solceller, växelriktare och montering som en klumpsumma (Elkedjan, 2023). Solceller kräver normalt ingen service under dess livslängd och garantier täcker kostnader för produktfel. Däremot kan växelriktare behövas bytas efter 10-15 år som kostar kring 20 000 kr, denna kostnad läggs till som driftkostnad för solcellerna (SolcellsOfferter, 2023). Investeringskostnaden för bergvärmepumpen på Länna skola beräknas med hjälp av ekvation 3 där den årliga servicekostnaden antogs vara 1% av denna kostnad. Investeringskostnader för VRF-batteri har uppskattats till 2850 kr/kWh lagringskapacitet (Rodby m. fl., 2020). För vätgasanläggningarna har investeringskostnaden beräknas utifrån den installerade effekten solceller. Vardera komponent i vätgasanläggningarna dimensionerades för denna effekt samt vätgastankarna ska rymma all vätgas som kan produceras av det elektriska överskottet. Detta motsvarar 54,8 kg för Länna skola och 292 kg för Funbo FSK. Priserna för vardera komponent togs från Nilsson och Larsson (2020). Investeringskostnader för ferroampsystemet har tagits från företagets grossister (Ahlseil, 2023a).

Skolorna har Vattenfall som elbolag med ett fast elpris på 1,06 kr/kWh för Länna skola och 1,03 kr/kWh för Funbo FSK. Dessa värden användes för att beräkna de nuvarande driftskostnader för att täcka värme- samt elbehovet för skolorna. Samt hur mycket pengar som sparas då solcellsproduktionen tillkommer (Vattenfall, 2023). Säljpriset till vattenfall uppskattades av Micael Östlund från Skolfastigheter AB till att vara 0,45 kr (Östlund, 2023). Då Länna har en produktionseffekt av solenergi under 43,5 kWp, klassas skolan som en mikroproducent och därav tillkommer inga extraavgifter. Funbo FSK överskrider dock effekten på 43,5 kWp som gör skolan till en småskalig solenergiproducent och därav tillkommer en avgift på 0,04 kr per såld kWh. Skolorna har överskottsproduktion som är lägre än 30 000 kWh samtidigt som de producerar mer än de säljer, vilket gör att båda skolorna har rätt till en skattereduktion på 0,60 kr per såld kWh (Skatteverket, u.å.). Vätgasproduktionen har även en driftkostnad på 60 kr/kg (Nilsson och Larsson, 2020). Alla ekonomiska beräkningar utfördes i Microsoft Office Excel och återbetalningstiden beräknas med ekvation 5:

$$t = \frac{C_{invest}}{C_{drift} - C_{ny,drift}} \quad (5)$$

Där t är återbetalningstiden i år, C_{invest} är totala investeringskostnaden i kr för modellen, C_{drift} och $C_{ny,drift}$ motsvarar den gamla respektive nya driftkostnaderna i kr/år.

4 Resultat

4.1 Länna skola

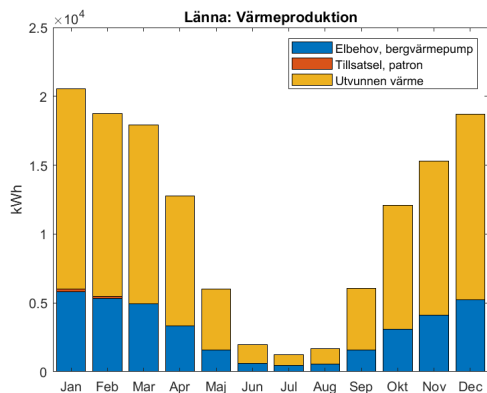
4.1.1 Modell 1, grundsystemet

Modell 1 består av grundsystemet, det vill säga solceller i kombination med bergvärme utan någon lagringsmetod. Utifrån Länna skolas nuvarande förutsättningar föreslås implementation av bergvärmepumpen IVT Geo 208 enligt IVTs energikalkyl. Den installerade effekten på bergvärmepumpen beräknades vara 39,0 kW samt 7,40 kW för elpatronen. Den årliga drivenergin för bergvärmepumpen uppskattas vara 36 600 kWh, respektive 320 kWh för elpatronen. Totalt aktivt borrhål beräknas vara 796 meter uppdelat på minst fem borrhål, enligt IVTs energikalkyl. På Länna skolas tak beräknas 128 m² monokristallina solceller kunna implementeras med en installerad effekt på 19,0 kW.

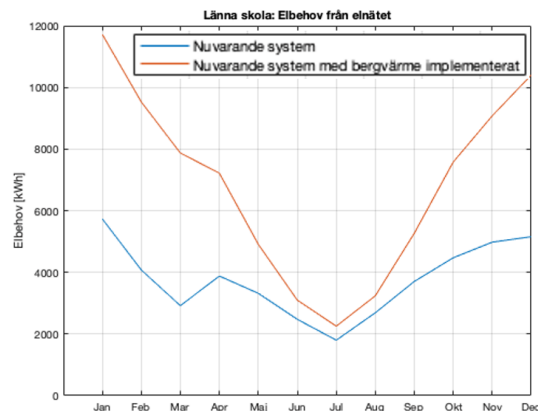
För Länna skola tillkommer en elförbrukning för att driva bergvärmepumpen, samt en tillsats-el till elpatronen. Denna beror på det månadsvisa värmebehovet och redovisas i figur 1 nedan. Det månadsvisa värmeproduktionen från bergvärmepumpen samt elpatronen tillsammans med det respektive elbehovet för att driva systemet redovisas i även figur 1 nedan. Behovet av inköpt elkraft innan och efter implementationen av bergvärmepumpen visas i figur 2

I figur 3 redovisas den totala elproduktionen från solcellerna på Länna skola timvis över ett år. Den totala elproduktionen var 20 100 kWh. Dock kan inte hela elproduktionen tas tillvara, då solcellerna producerar mer än energibehovet vid vissa tillfällen och producerar mindre vid andra. Detta behandlas i modell 2, 3 och 4 som implementerar lagring.

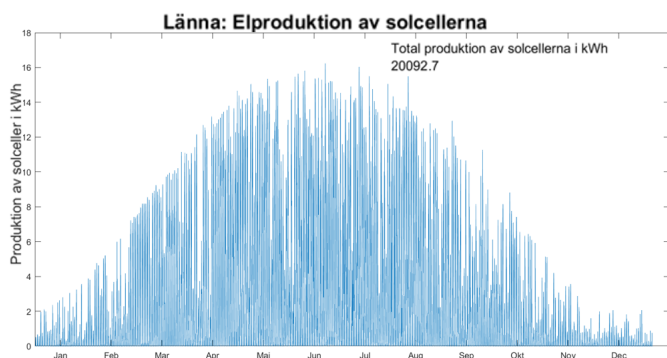
I figur 4 redovisas dagliga under- respektive överskottsproduktion av elkraft, alltså den producerade elkraften från solcellerna jämfört med fastighetens elektricitetsbehov. Drivenergin för bergvärmepumpen samt tillsattsvärmen inkluderas i elektricitetsbehovet. Den årliga totala överproduktionen samt underskott av elkraft beräknades vara 5 550 kWh respektive 66 100 kWh. Mängden som kan användas är 15 400 kWh vilket minskar den elkraft som behöver köpas in med 18,7 %, se figur 6.



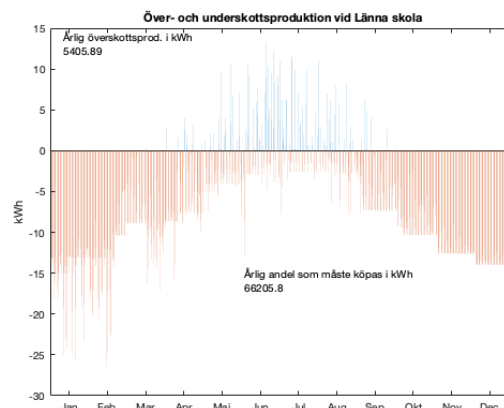
Figur 1: Illustrerar den månadsvisa värmeproduktionen från värmepumpen samt elpatronen samt de respektive elbehovet för detta.



Figur 2: Behov av inköpt elkraft innan (blå) och efter (röd) implementation av bergvärmepumpen.



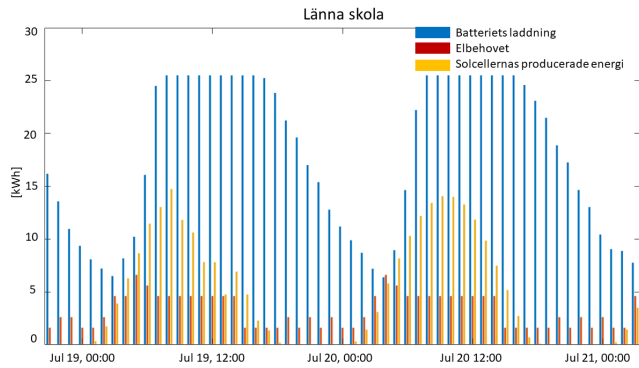
Figur 3: Elproduktion av solceller vid Länna skola.



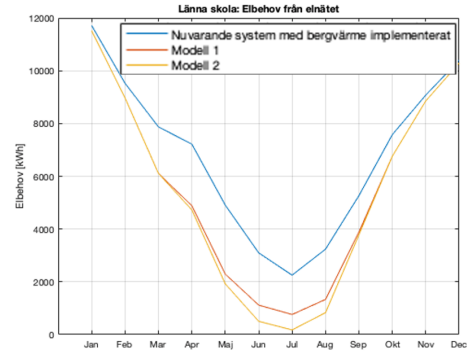
Figur 4: Över- och underskottsproduktion av elkraft, Länna skola år 2022.

4.1.2 Modell 2, grundsystemet med VRF-batteri som lagring

I modell 2 undersöktes grundsystemet, modell 1, i kombination med batterilagring. Batterierna som undersöktes är Vanadium redox flödesbatterier. I figur 6 redovisas nuvarande elbehov (blå) för Länna skola i jämförelse med modell 1 innan implementationen av VRF-batterier (röd), samt efter (gul). VRF-batteriet kunde lagra totalt 2 330 kWh under ett år, vilket resulterar i att behovet av inköpt elkraft minskade med 4,5%. Modell 2 kan spara 21,5% jämfört med tidigare elbehov. För Länna skola används en lagringskapacitet på 25,5 kWh vilket motsvarar ett batteri på totalt 0,5 m³. Denna lagringskapacitet kan avläsas i figur 5 då mängden elkraft kapas av där. Den överblivna överskottselkraften säljs till nätet, vilket motsvarar totalt 2 630 kWh. Figur 5 redovisar upp- och urladdning av VRF-batteriet (blå), den producerade solenergin (gul) jämfört med det timvisa elbehovet (röd) för Länna skola under två dygn i juli. Detta för att förtydliga att flödesbatteriet laddas upp till dess fulla kapacitet vid överskott, för att sedan laddas ur vid behov. Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 17 700 kWh för modell 2.



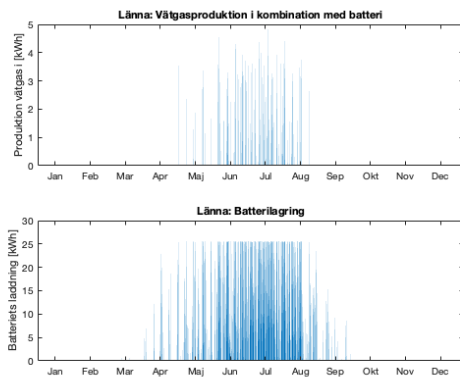
Figur 5: Uppladdning av VRF-batteri (blå), producerad solenergi (gul) och elbehovet (röd), för två dygn i juli timvis.



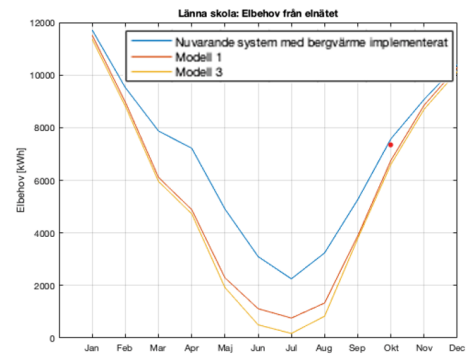
Figur 6: Behov av inköpt elkraft för modell 2 jämfört med nuvarande system och modell 1.

4.1.3 Modell 3, grundsystemet med VRF-batteri i kombination med vätgas

I modell 3 implementeras även säsongsbaserad lagring i form av vätgas. De tillfällen då flödesbatteriet är fulladdat lagras den överblivna överskottselkraften i form av vätgas. I undre delen i figur 7 redovisas återigen batterilagringen. I övre delen redovisas den överblivna överskottselkraften som lagras i form av vätgas. Vätgaslagringen lagrar 912 kWh användbar elenergi vilket motsvarar 54,8 kg vätgas. I figur 8 redovisas behovet av inköpt elkraft innan och efter implementationen av lagring i form av VRF-batteri och vätgas. Behovet minskade med 4,9%, vilket motsvarar 3 240 kWh. Modell 3 sparar 22,7% jämfört med tidigare elbehov. Vätgasen användes under vintermånaderna oktober till mars. Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 18 600 kWh för modell 3.



Figur 7: VRF-batterilagring och vätgaslagring vid Länna skola.

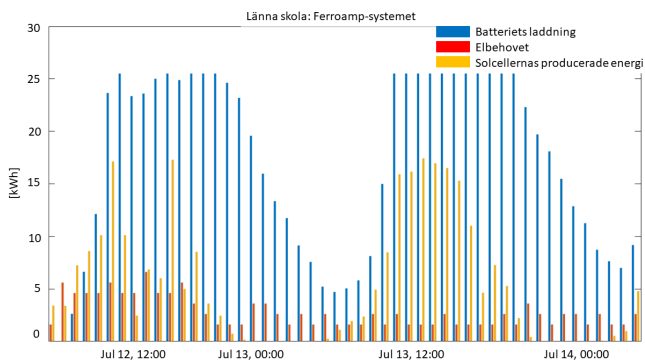


Figur 8: Behov av inköpt elkraft för modell 3 jämfört med modell 1 och nuvarande systemet med bergvärme implementerat.

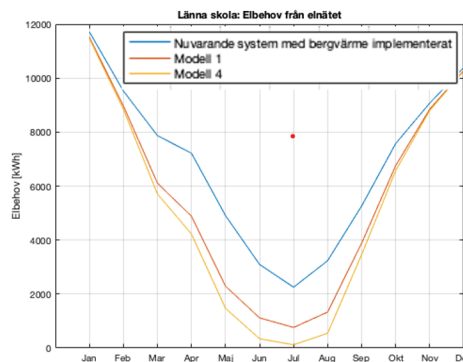
4.1.4 Modell 4, Ferroamp-systemet

I modell 4 undersöktes grundsystemet med ett tillägg av lagring i form av Ferroamp-systemet. Detta system har andra verkningsgrader samt annan kapacitet än modell 1. Figur 9 visar upp- och urladdning av LFP-batteriet under två dygn i juli. Figur 10 illustrerar hur mycket elkraft som behövs köpas in från nätet innan och efter implementationen av Ferroamp-systemet. Behovet minskade med 4,7%, vilket motsvarar 3 049 kWh.

Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 18 400 kWh för modell 4. Modell 4 sänker elbehovet med 22,4% jämfört med nuvarande system med implementerad bergvärmepump.



Figur 9: Upp- och urladdning av LFP-batteriet (blå), produktionen av solenergi (gul) och elbehovet (röd) för Länna skolan med modell 4 under två dygn under juli.

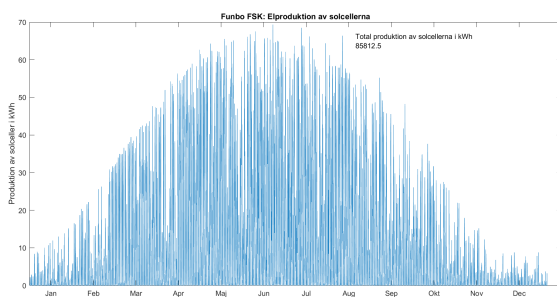


Figur 10: Behov av inköpt elkraft för modell 4 jämfört med modell 1 och nuvarande systemet med bergvärme implementerat.

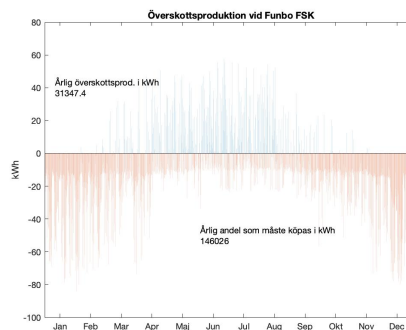
4.2 Funbo förskola

4.2.1 Modell 1, grundsystemet

Funbo förskolas nuvarande energisystem innehåller redan en bergvärmepump därmed innefattar implementationen av grundsystemet endast solcellsystemet. Utifrån fastighetens nuvarande förutsättningar dimensioneras arean för de monokrystallina solcellerna till 490 m² med en installerad effekt på 88,4 kW. I figur 11 redovisas elproduktionen från solcellerna på Funbo FSK timvis över ett år. Den totala elproduktionen är 85 800 kWh. Hela elproduktionen kan dock inte användas då solcellerna producerar mer än energibehovet vid vissa tillfällen och producerar mindre vid andra. Detta åtgärdas i modell 2, 3 och 4 med hjälp av lagring. I figur 12 redovisas förskolans dagliga under- samt överskottsproduktion av elkraft. Den sammanlagda över-skottsproduktionen år 2022 beräknas vara 31 300 kWh och den sammanlagda underskottet på elenergin beräknas vara 146 000 kWh. Underskottet på elenergi behöver därmed köpas in medan överskottelkraften säljs på nätet. Med denna produktion kan den inköpta elenergin minskas med 28,5 % vilket motsvarar 58 900 kWh se figur 14.



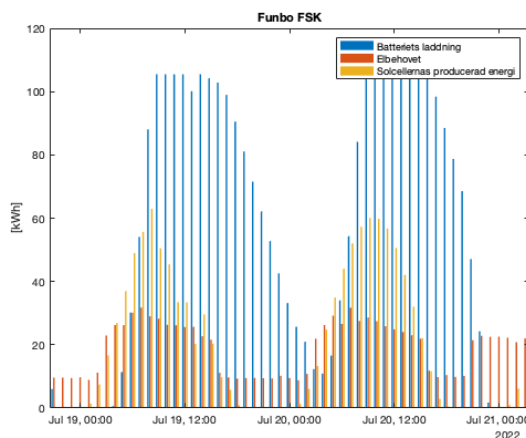
Figur 11: Elproduktion av solceller vid Funbo FSK



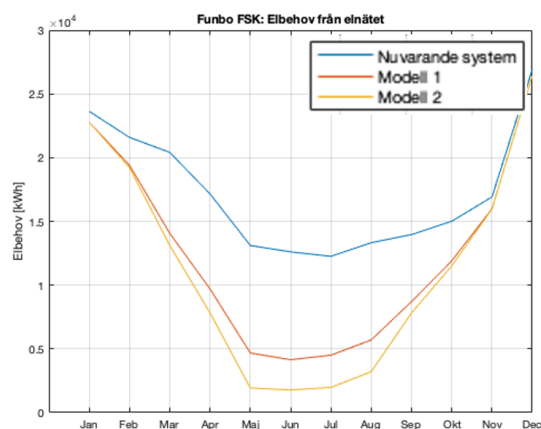
Figur 12: Över- och underskottsproduktion vid Funbo FSK

4.2.2 Modell 2, grundsystemet med VRF-batterilagring

I modell 2 påbyggs grundsystemet med lagring i form av vanadium redoxbatterier. I figur 13 redovisas upp- och urladdningen av VRF-batteriet (blå), den producerade solenergin (gul) samt elbehovet (röd) under två dygn i juli. I figur 14 redovisas elbehovet för Funbo FSK innan (röd graf) och efter (gul graf) implementationen av VRF-batterier. Den årliga lagrade elenergin motsvarar 14 400 kWh och med denna modell minskar mängden elkraft som behövs köpas in med 9,8%. Kombinationen av solceller och VRF-batterier sparar 35,6% jämfört med deras nuvarande elbehov. För Funbo FSK är den implementerade lagringskapacitet 106 kWh vilket motsvarar 1,75 m³ batterivolym, vilket kan avläsas i figur 14 där lagringen ej överstiger denna kapacitet. Den mängd överproducerad elenergi som inte lagras i batteri är 14 000 kWh, vilket säljs till nätet. Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 73 300 kWh för modell 2.



Figur 13: Uppladdning av VRF-batteri för två dygn i juli (blå), producerad solenergi (gul) och timvisa elbehovet (röd).



Figur 14: Behov av inköpt elkraft för modell 2 jämfört med modell 1 och nuvarande systemet.

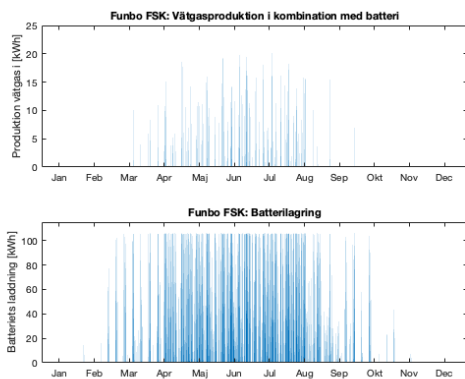
4.2.3 Modell 3, grundsystemet med batterilagring i kombination med vätgas

I modell 3 utvecklas grundsystemet ytterligare. Vätgaslagring adderas till modell 2 genom att överskottselektriciteten efter batterilagringen lagras i form av vätgas på en säsongsbasis. I den undre delen i figur 15 redovisas återigen den mängd elkraft som laddas upp i batteriet, medan den övre delen i figur 15 redovisar mängden elkraft som lagras i form av vätgas. Den årliga totala mängden energi som lagras i form av vätgas är 4 870 kWh, vilket motsvarar 292 kg vätgas. Behovet minskade med 13,1%, vilket motsvarar 19 300 kWh. Kombinationen av solceller, VRF-batterier och vätgas sparar 38% jämfört med deras nuvarande elbehov. Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 78 200 kWh för modell 3. Vätgasen användes under vinterhalvåret, oktober till mars.

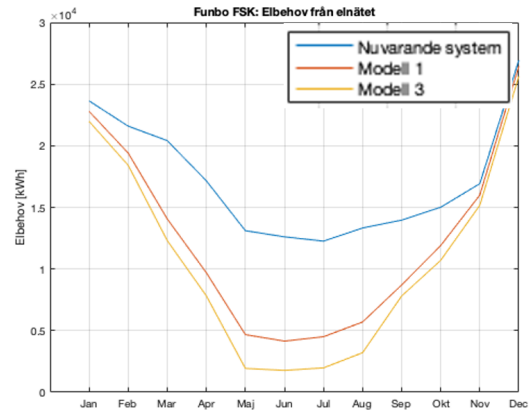
4.2.4 Modell 4, Ferroamp-systemet

Modell 4 undersökte originalet, modell 1, tillsammans med lagring i form av ett Ferroamp-system. Figur 18 illustrerar hur mycket elektricitet som behövs köpas in före och efter implementation av Ferroamp-systemet under ett år. Detta motsvarar 16 800 kWh eller 11,8%. Ferroamp-systemet med solceller och LFP-batterier sparar 36,8% jämfört med tidigare elbehov. Den sammanlagda producerade energin som konsumerades under ett år var 75 700 kWh för modell 4.

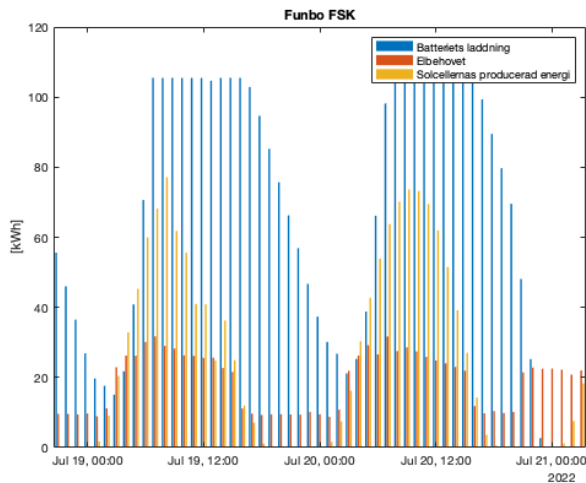
I tabell 1 nedan sammanställs huvudresultaten för båda skolorna och alla undersökta modeller.



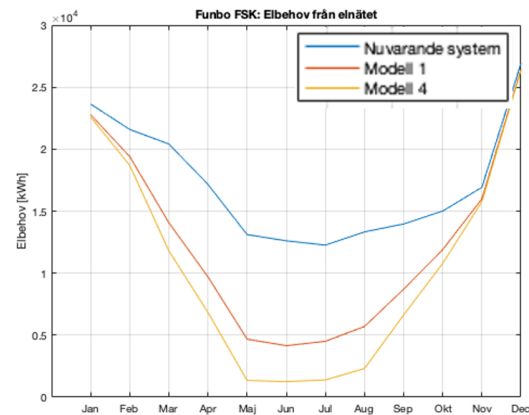
Figur 15: Batteri- och vätgaslagring vid Funbo FSK.



Figur 16: Behov av inköpt elkraft för modell 3 jämfört med modell 1 och det nuvarande systemet.



Figur 17: Upp- och urladdning av LFP-batteriet (blå), produktionen av solenergi (gul) och elbehovet (röd) för Funbo FSK med Ferroamp-systemet under två dygn under juli.



Figur 18: Behov av inköpt elkraft för modell 4 jämfört med modell 1 och nuvarande systemet.

Tabell 1: Jämförelse av modellerna med avseende på mängden egenproducerad energi fastigheterna kan använda samt den procentuella minskningen av inköpt elkraft jämfört med nuvarande system, för Länna skola är elbehovet för bergvärmepumpen inräknad.

	Länna skola (kWh)	Funbo förskola (kWh)	Länna skola	Funbo förskola
Modell 1	15 372	58 888	18,7%	28,5%
Modell 2	17 702	73 326	21,5%	35,6%
Modell 3	18 615	78 200	22,7%	38,0%
Modell 4	18 421	75 720	22,4%	36,8%

4.3 Ekonomisk uppskattning

Total investeringskostnaderna för de olika system som implementeras visas i tabell 2.

Tabell 2: Investeringskostnader (kr).

	Bergvärmeanläggning	Solcellsanläggning	VRF-batteri	Vätgasanläggning	Ferroamp system
Länna	299 000	245 000	72 700	922 000	311 000
Funbo FSK	–	913 000	301 000	4 420 000	1 340 000

4.3.1 Länna skola

Ekonomiska resultat och återbetalningstid för vardera undersökt modell på Länna skola presenteras i tabell 3. Återbetalningstiden beräknas utifrån driftkostnaderna som skolorna har i dagsläget jämfört med de uppskattade driftkostnaderna de 4 modellerna kommer generera. Investeringskostnaderna dividerat med differensen mellan nuvarande och modellens driftkostnaderna ger återbetalningstiden. Länna skola har i dagsläget en driftkostnad på 168 000 kr för uppvärmning och electricitetsbehov.

Tabell 3: Ekonomisk jämförelse av de olika modellerna för Länna skola.

	Investeringskostnader (kr)	Driftkostnader (kr/år)	Återbetalningstid (år)
Modell 1	544 000	64 000	5,22
Modell 2	617 000	65 800	6,03
Modell 3	1 718 000	70 300	17,54
Modell 4	856 000	60 900	7,97

4.3.2 Funbo FSK

Ekonomiska resultat och återbetalningstiden för vardera undersökt modell på Funbo FSK presenteras i tabell 4. Återbetalningstiden beräknas som för Länna skola och Funbo FSK har i dagsläget en driftkostnad på 220 000 kr.

Tabell 4: Ekonomisk jämförelse av de olika modellerna för Funbo FSK.

	Investeringskostnader (kr)	Driftkostnader (kr/år)	Återbetalningstid (år)
Modell 1	913 000	97 800	9,63
Modell 2	1 210 000	131 900	13,80
Modell 3	6 456 000	155 200	100,00
Modell 4	2 250 000	111 300	20,77

5 Diskussion

Med modell 1 kan mängden elkraft som behövs köpas minskas. För Länna skola blir denna minskning 26,1% och för Funbo FSK 43,6%. De årliga överproduktionerna på 5 550 kWh respektive 313 000 kWh säljs till elnätet. I modell 2 adderas lagring med ett VRF-batteri. Systemet innehåller lagring på dagsbasis där den sparade elkraften används när solenergin inte täcker elbehovet. För Länna skola kan 2 330 kWh lagras med VRF-batterierna och för Funbo FSK 14 000 kWh. Skillnaden mellan skolornas olika värden kan förklaras med solcellsanläggningens storlek där Funbo FSK har större takarea, samtidigt som byggnaden är nyare och mer energieffektiv. I modell 3 adderas vätagaslagring till modell 2 i syfte att uppnå en kompletterande

säsongsbaserad lagring till den dagliga. Detta då det mesta av överproduktionen sker under sommaren när minst elkraft används. För Länna skola motsvarar det 912 kWh och för Funbo FSK 4 870 kWh årligen. I jämförelse med skolornas energibehov är detta inte särskilt mycket, och i dagsläget är kostnaderna för vätgasanläggningar så höga att implementeringen inte är försvarbar. I modell 4 ändrades grundsystemet till ett Ferroamp-system. Då användes LFP-batteri istället där verkningsgraden är högre än för VRF-batteri. Med den högre verkningsgraden kan 3 049 kWh lagras under ett år på Länna skola och på Funbo FSK 16 800 kWh. Dock är Ferroamp-systemet en relativt ny teknik med höga investeringskostnader.

Ur ett energiperspektiv är alla modeller fördelaktiga för båda fastigheterna då det försäkras en grön elproduktion samt värmeproduktion. En konsekvens med dessa system är att konsumtionen av elkraft ökar vilket är en högkvalitativ energibärare. Dock innebär systemen en total minskning av energianvändningen samt förnybar energi- och värmeproduktion för skolorna, vilket kan argumenteras väga tyngre. Modell 1 bidrar till att avlasta kommunens elnät samt ger en mer förnybar elmix, då allt överskott säljs vidare till elnätet. För modell 2, 3, 4 krävs en avvägning om vad som är mest lönsamt, lagra på nätet eller lagra i fastigheten. Med lagring blir systemet mer självförsörjande och skapar ett mer konstant flöde som inte är lika beroende av elnätet. I dagsläget har skolorna fasta elpriser. Hade de istället haft rörliga elpriser, som ofta går upp på vintern, hade resultaten sett annorlunda ut och nyttan för lagringen hade varit större. Då behövs inte lika mycket elkraft köpas när den är som dyrast. Modell 3 medför att skolorna använder mest egenproducerad grön el samt har möjlighet att kapa flest effektoppar. Därmed kan denna modell anses vara mest gynnsam ur ett energieffektivt perspektiv.

Återbetalningstiden för grundsystemet är 5,22 år för Länna skola och 9,63 år för Funbo FSK. Skillnaden beror främst på att Länna skolas värmedrift med oljepannan är så dyr och att bergvärme är ett billigare alternativ vilket redovisas i tabell 3 och 4. För modell 2 är återbetalningstiden 6,03 år för Länna skola och 13,8 år för Funbo FSK. För Länna skola är det ingen större skillnad mot modell 1, på grund av den dyra driften för oljepannan och att batterilagringen är så pass småskalig. När även vätgaslagring implementeras i modell 3 blir återbetalningstiden 17,5 år för Länna skola och 100 år för Funbo FSK. I framtiden kan vätgaslagring komma att vara en viktig energilagringmetod, men i dagsläget är det för dyrt för skolor av denna storlek. I modell 4 med Ferroamp-systemet är investeringskostnaderna högre än för VRF-batteri, vilket resulterar i längre återbetalningstid, se tabell 3 och 4. Återigen har Länna skola en kortare återbetalningstid på 8,0 år jämfört med Funbo FSKs 20,8 år. För Länna skola kan det hävdas att modell 2 är en fördelaktig investering. Eftersom återbetalningstiden för denna modell är i princip densamma som för grundsystemet kan den extra energilagringen vara ett intressant tillägg. För Funbo FSK är grundsystemet gynnsamt. Skulle man vidare vara intresserad av lagring skulle det vara för att minska effektopparna, då lagringalternativen inte kan motiveras ekonomiskt. Däremot om man har ett elavtal med effekttariff kommer månadskostnaderna minska om effektopparna kapas.

Skolornas elproduktion är tillräckligt små för att erhålla en skattereduktion på den sålda elkraften, och till följd av detta är priset på såld elkraft högre än inköpt. På grund av detta kan det ur ett ekonomiskt perspektiv argumenteras att batterilagring inte är lika fördelaktigt som att sälja elkraftens överskott. Hade skolorna haft rörliga elpriser hade överskottet kunnat lagras och sedan säljas när elpriserna är högt vilket hade kunnat öka lönsamheten. System med lagringalternativ kan därmed vara mer gynnsamt på fastigheter med större elproduktion, där priset på såld elkraft inte större än priset på inköpt.

För implementering av bergvärme kommer antagligen extra kostnader att tillkomma på grund av utbyte av exempelvis rörsystem och radiatorer vilket inte är medräknat i den ekonomiska kalkylen. Vidare har den ekonomiska kalkylen inte tagit hänsyn till ränta och variationer i elpriser. Skolorna har fasta elavtal, och detta kan komma att vara av betydelse när dessa upphört. Ytterligare en felkälla är att månadsvisa värden för Länna skolas bergvärmepumps elbehov omvandlades till dagvisa värden då beräkningar för elproduktionen på dagsbasis genomfördes. Att använda medelvärden kan medföra mindre exakta resultat samt att nyttan av lagringmetoden underskattas då uppvärmningsbehovet är mindre på dagen och då hade kunnat

lagras till natten. Vidare felkällor beror på antaganden och avgränsningar som gjorts. Exempelvis kan val av solcellernas verkningsgrad påverka resultaten för elproduktionen.

För implementering av ett system med solceller i kombination med bergvärme är inte alla skolor lämpliga. Skolan behöver ha ett fungerande vattenburet system, och ha lämplig berggrund. Vidare behövs ett robust och gärna stort tak, som håller minst lika länge som solcellerna. Energiförbehovet ska inte vara för lågt, då systemet inte blir ekonomiskt gynnsamt.

För solceller är brand en stor fråga där växelriktare och nödavsstängningsknapp är viktigt för att kunna bryta strömmen vid behov. Bergvärmens viktigaste säkerhetsaspekt är att närliggande vattendrag eller grundvatten inte kontamineras. För att förebygga miljöpåverkan vid eventuella läckage används bioetanol utan denatureringsmedel, men det är generellt fördelaktigt att ha en plan för eventuellt spill eller föroreningar. När det gäller vätgas är det viktigt att ha ämnets brandfarlighet i åtanke, främst vid eventuella läckage. Vidare är det viktigt att vätgasen lagras så att den vid ett läckage sprids, och inte blir kvar i ett slutet utrymme där koncentrationen kan förbli brandfarlig. För att undvika dessa risker är det viktigt att använda säkerhetsutrustning och säkerhetsprotokoll.

Ur ett hållbarhetsperspektiv är råvarorna i solceller och batteriers giftiga och väldigt energikrävande att utvinna. De tillverkas ofta i Kina så transportsträckan behöver beaktas. Utöver miljöperspektivet skapar användandet av solceller och batterier ett etiskt perspektiv. Ett stort problem ligger i den problematiska utvinningen av de sällsynta materialen, som ofta utförs med löner som inte tillåter en acceptabel levnadsstandard. När det gäller bergvärme och vätgaslagring är det under installation och drift de största riskerna för miljön finns. Det gäller bland annat läckage och kontaminering av luft och närliggande vattendrag. Här är det beställaren som ska se till att de lagar och regler för vätgaslagring och bergvärme följs. Utförs allt korrekt minskar riskerna betydligt och systemen kan användas på ett säkert sätt, utan att påverka närliggande miljö.

6 Slutsatser

Bergvärme i kombination med solceller, det vill säga modell 1, är energimässigt gynnsamt för både Länna skola och Funbo förskola. Dels för att det bidrar till en elproduktion från förnybara energikällor, dels för att skolornas egenproducerade elkraft täcker upp för en stor del av elektricitetsbehovet inkluderat bergvärmens drivenergi. Resultaten visar att Funbo förskola producerar större andel elenergi i förhållande till dess elbehov än Länna skola. Därmed kan slutsatsen dras att systemet är mer gynnsamt för Funbo förskola. Detta kan dels bero på att Funbo förskola är mer energieffektiv men även att den har större takarea i förhållande till boyta, vilket bidrar till större solesproduktion. Vidare kompletteringar med lagring på grundsystemet kan anses vara betydelsefull då solesproduktionen är så pass fluktuerande, däremot är det i dagsläget relativt dyrt.

För att besvara arbetets frågeställningar drogs slutsatsen att modell 3 anses vara optimal ur ett endast energimässigt perspektiv. Detta då systemet har möjlighet att kapa mest effekttoppar samt bidrar till störst användning av egenproducerad elkraft som kommer från förnybara energikällor. Modell 1 har för både Länna skola samt Funbo förskola lägst återbetalningstid och anses därmed mest lönsam ekonomiskt. Däremot kan modell 2 motiveras vara lönsam för Länna skola då återbetalningstiden för modell 1 och 2 har en liten skillnad. Den energimässiga fördelen med lagring kan då väga upp för detta. Implementationen av samtliga modeller resulterar i en ökad produktion av elkraft från förnybara energikällor och en minskad användning av fossila bränslen. Däremot bör vidare miljöpåverkan såsom materialutvinning och transport beaktas. Dessutom finns en risk vid inkorrekt installation för läckage till grundvatten gällande bergvärme. Implementationen av systemet medför några säkerhetsrisker som brandrisk för vätgas samt solceller.

Referenser

- Ahlsell (2023a). "Ahlsell". I: *Länk*.
- (2023b). "Solpanel Eurener 450W svart". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Albrecht, Amanda (2023). "Underrapport om lagring". I.
- Albrecht, Amanda och Anton Silier (2023). "Underrapport om säkerhet". I.
- American clean power (2023). "How Hydrogen Energy Storage Works". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Antweiler, Werner (2020). "What role does hydrogen have in the future of electric mobility?" I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Beckius, Vera och Cornelia Enbacka (2023). "Underrapport om solceller". I.
- Björk, Erik, José Acuña, Eric Granryd, Palne Mogensen, Jan-Erik Nowacki, Björn Palm och Kenneth Weber (2013). "Bergvärme på djupet". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Boverket (2023). "Energideklaration". I: *Länk*.
- Ekonomifakta (2023). "Elproduktion". I: *Länk*. (Hämtad 2023-03-08).
- Elkedjan (2023). "Solcellskalkylator". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Energimyndigheten (2022). "Välj rätt värmepump". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-08).
- Fasth, Eva-Maria (2021). "Är trött på förståsigpåares råd att stänga av elpatronen". I.
- Ferroamp (2021). "Pylontech Energy Storage". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Finspångs Brunnsborrning AB (2022). *Bergvärme tillsammans med solceller*. FBB. (Hämtad 2023-05-08).
- Google (2023). "Google maps". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Hemming, Sara (2022a). "Optimal placering av solceller Både väderstreck och lutning". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- (2022b). "Solceller på taket". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- IVT (2023). "Energikalkyl Länna skola". I.
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (u.å.). "Hydrogen data". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Lundberg, Daniel (2015). "Bergvärme och solenergi i flerbostadshus". I: *Länk*.
- Naturskyddsföreningen (2022). "Energianvändning i skolan, hemmet och samhället". I: *Länk*. (Hämtad 2023-03-08).
- (2023). "Miljöpåverkan från el- och värmeproduktionen". I: *Länk*.
- Nilsson, Henrik och Christoffer Larsson (2020). "Ekonomiska förutsättningar för vätgasproduktion som stöd till vindkraft." I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-11).
- Rodby, Kara E., Thomas J. Carney, Yasser Ashraf Gandomi, John L. Barton, Robert M. Darling och Fikile R. Brushett (2020). "Assessing the levelized cost of vanadium redox flow batteries with capacity fade and rebalancing". I: *Länk*.
- SGU (2017). "Vägledning för att borra brunn". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- (2023). I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Skatteverket (u.å.). "Mikroproduktion av förnybar el – näringsfastighet". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Skolfastigheter AB (1986). "Ritningar Länna skola". I.
- (2020). "Solkartläggning". I.
- (u.å.[a]). "Funbo förskola". I: *Länk*.
- (u.å.[b]). "Länna skola". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- SMHI (2023). "Ladda ner meteorologiska observationer". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Solcellskollen (2021). "Hur fungerar Solcellskollens beräkningar?" I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- SolcellsOfferter (2023). "SolcellsOfferter". I: *Länk*.
- Uppsala kommun (2023). "Installera värmepump – tillstånd och anmälan". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-09).
- Vattenfall (2023). "Vattenfall inloggning". I: *Länk*.
- Zimmerman, Nathan (2014). "Vanadium Redox Flow Battery: Sizing of VRB in electrified heavy construction equipment". I: *Länk*. (Hämtad 2023-05-10).
- Östlund, Micael (2023). "Teknisk förvaltare el/tele Skolfastigheter AB". I.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal [här](#):

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

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

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