

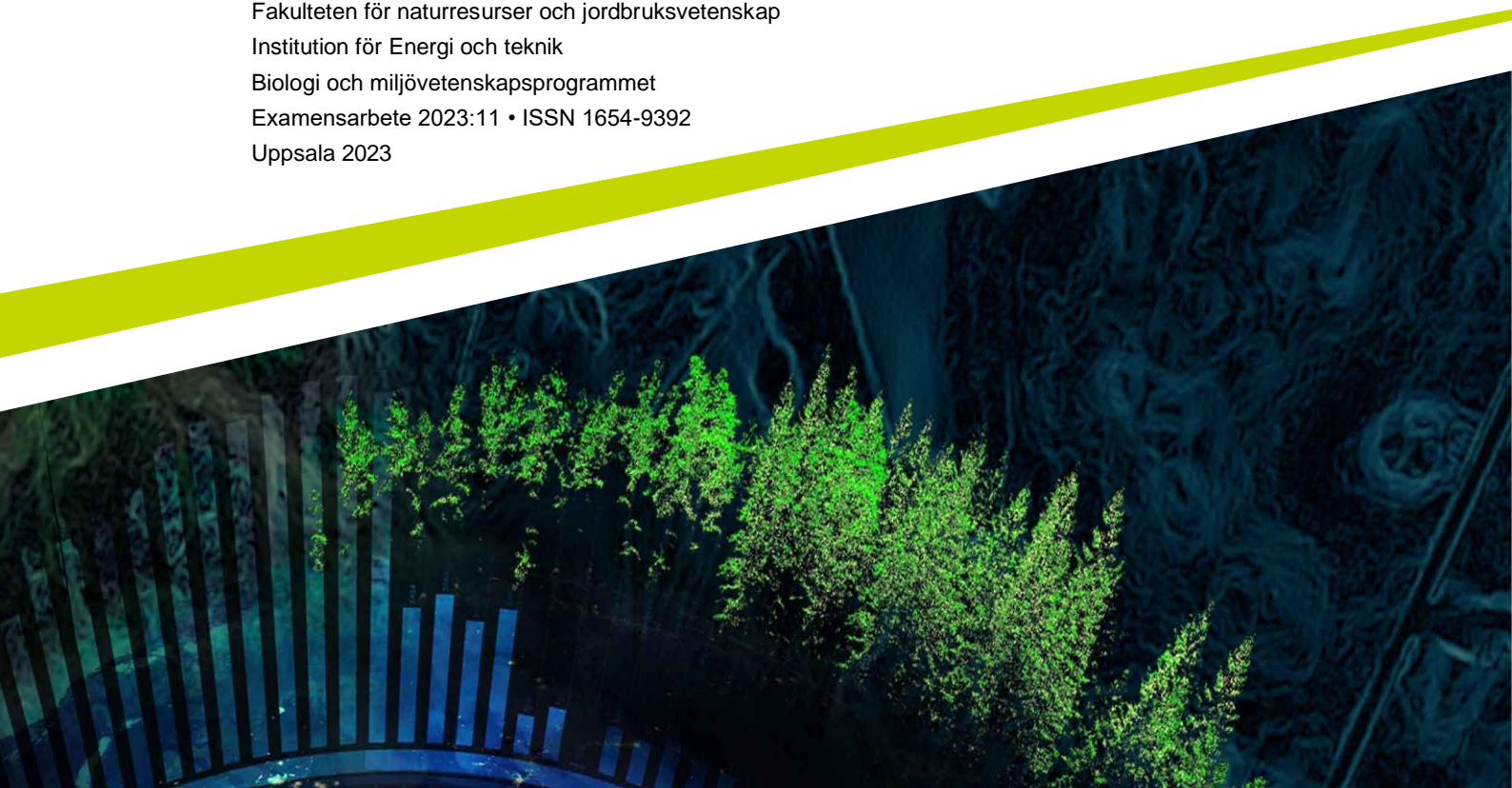


Alternativa energikällor för att driva Uppsalas bubbelbarriär

Multikriterieanalys – en jämförande studie

Tilda Andersson

Självständigt arbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institution för Energi och teknik
Biologi och miljövetenskapsprogrammet
Examensarbete 2023:11 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2023



Alternativa energikällor för att driva Uppsalas bubbelbarriär. Multikriterieanalys – en jämförande studie

Alternative energy sources to power Uppsala's bubble barrier. Multi-criteria analysis – a comparative study

Tilda Andersson

Handledare: Gunnar Larsson, SLU, Energi och teknik
Extern handledare: David Berg, Stadsbyggnadsförvaltningen Uppsala Kommun
Examinator: Åke Nordberg, SLU, Energi och teknik

Omfattning: 15 hp
Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E
Kurstitel: Självständigt arbete
Kurskod: EX0896
Program/utbildning: Biologi och miljövetenskap - kandidatprogram
Kursansvarig inst.: Institution för Vatten och miljö

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2023
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2023:11
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: Multikriterieanalys (MKA), elproduktion, koldioxidutsläpp, säkerhet, solenergi, vätgaslagring, stationära cyklar, energibehov, kompressor.

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institution för Energi och teknik

Sammanfattning

Syftet med studien är att undersöka och bedöma olika energikällor för att driva Uppsala bubbelbarriär – en metod för att fånga in skräp i Fyrisån. En multikriterieanalysmetod tillämpas för bedömning och jämförelse av olika energikällor. I de fall då bubbelbarriärens energibehov inte kan fyllas av en individuell energikälla, utvecklas alternativ där de kombineras med varandra eller elnätet. Därefter betygsätts de och rangordnas utefter ett antal kriterier.

Ett flertal energikällor utvärderades, både tak- och väggmonterad solenergi, energi genererad från stationära cyklar samt vätagaslagring medan biogas och en vattendriven kompressor utslöts i tidigt skede. Energitillförsällorna bedöms utifrån kriterierna hög elproduktion, låga koldioxidutsläpp samt hög säkerhet. Kriterier, graden av säkerhet samt subjektiva viktningsvärden av kriterier framtoqs i samarbete med handledare på Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) och behovsägare på Uppsala kommun. Generella beräkningar har genomförts för att få en övergripande uppfattning om vilket energisystem som är mest lämpad utefter de givna kriterierna.

Resultatet visade hur ingen energikälla kunde fylla bubbelbarriärens energibehov på egen hand. Därför framtoqs alternativ där de kombinerades med varandra eller med elnätet. De mest lämpade alternativet blev takmonterade solceller på läge D i kombination med elnätet (A₂). Därefter blev de stationära cyklarna i kombination med elnätet (A₄) mest lämpade, nära följt av väggmonterad solenergi läge B i kombination med elnätet (A₃). Alternativen på andra och tredje placering var de enda energisystemen som alternerade i dess rangordning beroende på val av parametrar i känslighetsanalys. Det var även små marginal emellan A₃ och A₄, vilket indikerar att de båda är relativt lika i dess lämplighetsbedömning. Resultatet visade hur takmonterade solceller på läge D i kombination med vätagaslagring (A₁) blev det minst lämpade alternativet.

Slutsatsen är att ingen av de undersökta energitillförsällorna ensamt kan skapa en energisjälvförsörjning utan att kombineras med varandra eller elnätet. Alternativen är inte redo för omedelbar implementation på grund av detaljnivån utifrån studiens tidsram och omfattning, men de ger en värdefull vägledning och ett beslutsunderlag för framtida arbete och implementation.

Nyckelord: Multikriterieanalys (MKA), elproduktion, koldioxidutsläpp, säkerhet, solenergi, vätagaslagring, stationära cyklar, energibehov, kompressor.

Abstract

The purpose of this study is to investigate and assess different energy sources for powering Uppsala's Bubble Barrier – a method for capturing waste in the River called "Fyrisån". A multi-criteria analysis method is used to evaluate and compare different energy sources. In situations where the bubble barrier's energy needs cannot be met by an individual energy source, alternatives are developed where they are combined with each other or the power grid. They are later graded and ranked based on a set of criteria.

Several energy sources were evaluated, including roof- and wall-mounted solar panels, energy generated from stationary bicycles, and hydrogen storage, while biogas and a water-driven compressor were excluded at an early stage. The energy sources are assessed based on high electricity production, low carbon dioxide emissions, and high safety criteria. The criteria, level of safety, and subjective weighting values of the criteria were developed in collaboration with a supervisor from the Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) and a stakeholder from Uppsala municipality. General calculations have been conducted to gain an overall understanding of which energy system is most suitable according to the given criteria.

The result showed how no energy source could meet the bubble barrier's energy needs on its own. Therefore, alternatives were developed where they were combined with each other or with the electricity grid. The most suitable alternative was roof-mounted solar panels on location D in combination with the electricity grid (A₂). Next in line were the stationary bicycles in combination with the power grid (A₄), closely followed by wall-mounted solar energy on location B in combination with the power grid (A₃). These alternatives in the second and third positions were the only energy systems that alternated in their ranking depending on the choice of parameters in the sensitivity analysis. There were also small margins between them, indicating their similarity in terms of the suitability assessment. The results showed that roof-mounted solar panels on location D in combination with hydrogen storage (A₁) was the least suitable alternative.

The conclusion is that none of the examined local energy sources alone can achieve energy self-sufficiency without being combined with each other or the power grid. The alternatives are not ready for immediate implementation due to the level of detail within the study's timeframe and scope, but they provide valuable guidance and decision basis for future work and implementation.

Keywords: Multi-criteria analysis (MCA), electricity production, carbon dioxide emissions, safety, solar energy, hydrogen storage, stationary bicycles, energy demand, compressor

Innehållsförteckning

Tabellförteckning.....	7
Figurförteckning.....	8
1. Introduktion.....	10
1.1 Syfte	11
1.1.1 Frågeställning.....	11
Bakgrund.....	12
1.2 Information kring Uppsalas Bubbelsbarriär	12
1.3 Förutsättningar.....	14
1.3.1 Omgivningen.....	14
1.3.2 Kompressorn.....	16
1.3.3 När är kompressorn och bubbelsbarriären i drift?.....	17
1.4 Förslag på alternativa energikällor.....	18
1.4.1 Solenergi	18
1.4.2 Energi genererad från stationära cyklar	18
1.4.3 Biogas	19
1.4.4 Vattendriven kompressor.....	19
1.4.5 Vätgaslagring	20
1.4.6 Relaterat arbete.....	20
1.5 Multikriterieanalys	21
2. Metod	22
2.1 Kriterier	22
2.1.1 Elproduktion	22
2.1.2 Koldioxidutsläpp	23
2.1.3 Säkerhet	24
2.2 Avgränsningar	25
2.3 Alternativa energikällor	26
2.3.1 Solenergi	27
2.3.2 Energi genererad från stationära cyklar	30
2.3.3 Vätgaslagring	32
2.3.4 Exkluderade alternativ.....	34
2.4 Viktning.....	34
2.5 Betygsättning av kriterium.....	34

2.6	Känslighetsanalys	36
2.7	Multikriterieanalysmall	36
3.	Resultat	37
3.1	Respektive energikälla	37
3.1.1	Elproduktion	37
3.1.2	Koldioxidutsläpp	40
3.2	Alternativ för att driva kompressorn	40
3.2.1	Koldioxidutsläpp	41
3.2.2	Säkerhet	42
3.3	Viktning av kriterier.....	44
3.4	Multikriterieanalys	45
3.5	Känslighetsanalys	46
3.5.1	Ändring av drifttid.....	46
3.5.2	Minskning av kompressorns effektbehov	46
3.5.3	Resultat med samma viktningvärden.....	46
4.	Diskussion	47
4.1	Diskussion av resultat.....	47
4.1.1	Känslighetsanalys.....	48
4.2	Osäkerheter.....	49
4.2.1	Multikriterieanalys som metod	50
4.3	Framtida arbete	50
5.	Slutsats	52
6.	Referenser	53
Tack	58
Publicering och arkivering	59

Tabellförteckning

Tabell 1: Kompressorns egenskaper.....	16
Tabell 2. Standardavvikelsen, den genomsnittliga variationen från år till år av bestrålning för de specifika koordinaterna. Data från 2005-2020 från EU kommissionens PV GIS verktyg.....	28
Tabell 3: Dödstalen per producerad TWh elektricitet år 2021 (Our World in Data u.å.)...	29
Tabell 4: Vikt på olika cykeldelar tillverkade av kolfiber.....	31
Tabell 5. Modifierade parametrar i känslighetsanalysen.....	36
Tabell 6: Multikriterieanalys med poäng och slutbedömning av respektive alternativ.....	36
Tabell 7: Poängsättning av social aspekt kring respektive alternativ	43
Tabell 8. Multikriterieanalysmatrisen med slutpoäng och rangordning av de olika alternativen.	45

Figurförteckning

Figur 1. Illustration kring hur bubbelbarriären fungerar, erhållen från Uppsala kommun, renhållning. 1. Skräp flyter längst Fyrisån. 2. Perforerad slang frigör luftbubblor som lyfter skräp mot ytan. 3. Skräp ansamlas på ena sidan av ån. 4. Fiskar passerar luftbubblorna.	12
Figur 2. Bubbelbarriären i drift, erhållen från Uppsala kommun, renhållning.	13
Figur 3. Karta över området och till vilken plats läge A-E är placerade. Uppsala. Kungsängen 1:2 © Lantmäteriet. Redigerad i Microsoft Whiteboard.	14
Figur 4. Läge A – Container. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.	15
Figur 5. Läge B – Skeppselevatorn. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.	15
Figur 6. Läge C – Gräsplätt. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.	15
Figur 7. Läge D – Dansbanan. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.	16
Figur 8. Kompressorn - Storm 8-8-270 ES 10.0Hk 8Bar 270l/tank 1250l/min med kyltork. Illustration är fotograferad av Tilda Andersson.	17
Figur 9. Beskrivning och tillvägagångssätt kring framtagning av energikällor och möjliga alternativ för att driva kompressorn. Figur skapad av Tilda Andersson via Canva.	26
Figur 10. Energitkällor som utvärderas med deras respektive lägen. Figur skapad av Tilda Andersson via Canva.	26
Figur 11. Exempel på poängsättningsdiagram för elproduktion med konstruerade värden för olika energitkällor.	35
Figur 12. Elproduktion per månad under ett år.	37
Figur 13. Över- och underproduktion under 25 år för respektive energitkälla.	38
Figur 14. Exempel på hur solstrålningsenergin varierar för A ₂ under Juni 2010. Data från 2005-2030 från EU kommissionens PV GIS verktyg.	39
Figur 15. Exempel på hur solstrålningsenergin varierar för A ₂ under November 2010. Data från EU kommissionens PV GIS verktyg.	39
Figur 16. Emissionsfaktorn under 25 år för energitkällorna.	40

Figur 17. Emissionsfaktorn under 25 år för de olika alternativen med kombinerade energikällor.	41
Figur 18. Betygsättning och poäng av säkerhet.....	43
Figur 19. Viktning av kriterier.	44
Figur 20. Slutpoäng och rangordning av de olika alternativen.	45

1. Introduktion

Energien som absorberas i atmosfären är en grundförutsättning för liv på jorden, och människan har i många år nyttjat energi i form av elektricitet för att driva sina hem, fordon och industrier. Det är dock klimatet som betalar priset för människors energikonsumtion (Ghosh & Ghosh 2020). Energifrågan är idag en av världens stora utmaningar i strävan mot en hållbarare utveckling. Globalt är energianvändningen en av de största källorna till växthusgasutsläpp som hotar både livsmiljöer och ekosystem (Clerici & Alimonti 2014). För att begränsa klimatpåverkan krävs en förändrad infrastruktur inom energisektorn med fler moderna, förnyelsebara eller renare bränslen (Regeringskansliet 2020:20).

Uppsala kommun (u.å.) arbetar aktivt kring klimatfrågan och strävar efter klimatneutralitet till år 2030. Ett av kommunens projekt är Uppsala bubbelbarriär, en innovativ metod för att samla in avfall i Fyrisån med hjälp av luftbubblor. Metoden är unik och det finns endast ett fåtal liknande, bland annat i Nederländerna (Berg 2023). Projektet hjälper till att förbättra vattenkvaliteten, gynna biologisk mångfald och öka allmänhetens medvetenhet om nedskräpningsproblemet. Denna miljövänliga metod kräver el för att driva kompressorn som skapar bubblorna, som idag hämtas från Uppsalas elnät (Berg 2023).

Uppsalas bubbelbarriärsprojekt har som nästa steg att förbättra processens hållbarhet genom att hitta en alternativ energikälla för att driva kompressorn. Målet är att implementera en eller flera energikällor samtidigt som metodens effektivitet bibehålls. Detta väcker frågan om vilken eller vilka alternativa energikällor som är mest lämpade för detta projekt utefter den givna platsens förutsättningar.

Valet av den mest lämpade energikällan för en viss plats bemöts ofta av en rad tekniska, miljömässiga och sociala aspekter. En energikälla med minskade växthusgasutsläpp kan ha en låg elproduktion eller vice versa. Genom att jämföra de olika energikällorna utefter olika kriterier med hjälp av en multikriterieanalys kan dessa konflikter hanteras och förenkla valet vilket alternativ som är lämpligast för Uppsala bubbelbarriärprojekt.

1.1 Syfte

Syftet med studien är att hitta och jämföra alternativa energikällor för att driva barriären. Avsikten med studien är även att betygsätta och rangordna de mest lämpade energisystemen med utgångspunkt från att de ska vara säkra och producera energi på den plats som finns tillgänglig i närheten av bubbelbarriären. Om ingen energikälla ensam kan ersätta elnätet kommer alternativ tas fram där energikällorna kombineras med varandra eller elnätet och därefter betygsätts utifrån tre olika kriterier.

Ambitionen med studien är även att bidra med information och förslag till Uppsala kommun. Bland annat med att undersöka potentiella alternativ och belysa relevanta energikällor. Målet är att studien skall agera som beslutsunderlag för Uppsala kommun och på lång sikt bidra till en decentraliserad elproduktion i kommunen. Vidare kan studien i ett större perspektiv utgöra ett hjälpmedel i Uppsalas strävan att få en hållbar energiförsörjning, bli klimatneutralt till 2030 samt belysa bubbelbarriären och dess syfte (Uppsala Kommun u.å.b).

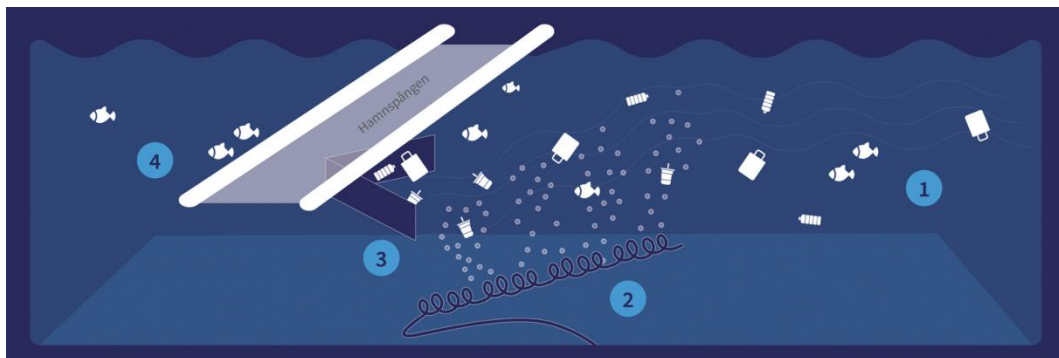
1.1.1 Frågeställning

- Kan de alternativa energikällorna skapa en självförsörjning på energi?
- Vilken eller vilka av de analyserade energikällorna är mest lämpad att driva bubbelbarriären utifrån valda kriterier?

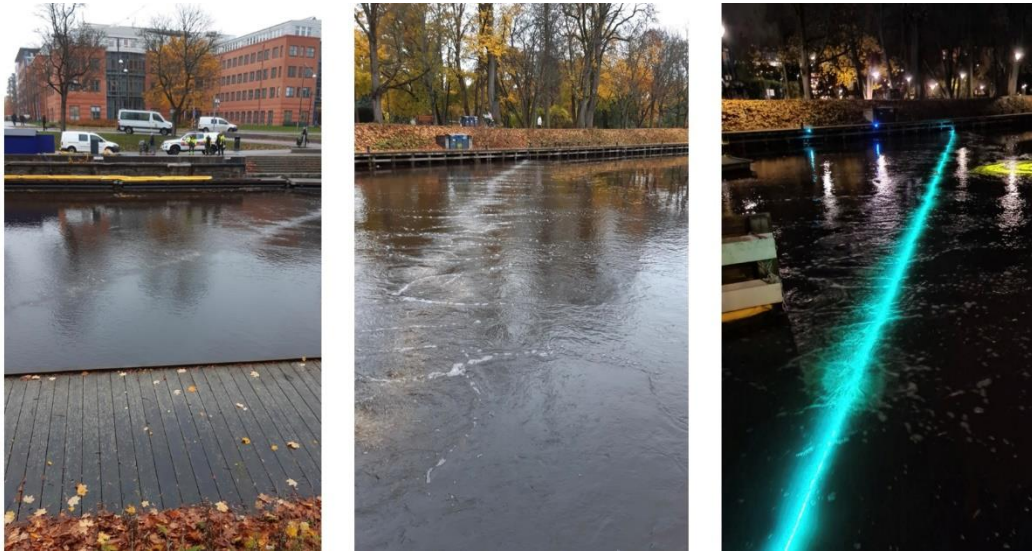
Bakgrund

1.2 Information kring Uppsalas Bubbelbarriär

Längst botten på Fyrisån finns en slang med perforerade hål (Uppsala Kommun 2022). Med hjälp av en kompressor trycks luft in i slangen vilket skapar luftbubblor som stiger från hålen. Detta bildar en sorts vägg av luftbubblor som stiger mot ytan och som lyfter upp skräp som flyter längst ån. Skräpet ansamlas därefter på östra sidan av ån och töms regelbundet (Uppsala Kommun 2022). Skräpansamlingen skapas naturligt av en virvelström med hjälp av bubbelströmmen (Berg 2023). Illustration kring hur bubbelbarriären fungerar, se figur 1 och 2.



Figur 1. Illustration kring hur bubbelbarriären fungerar, erhållen från Uppsala kommun, renhållning. 1. Skräp flyter längst Fyrisån. 2. Perforerad slang frigör luftbubblor som lyfter skräp mot ytan. 3. Skräp ansamlas på ena sidan av ån. 4. Fiskar passerar luftbubblorna.



Figur 2. Bubbelbarriären i drift, erhållen från Uppsala kommun, renhållning.

Eftersom barriären är förankrad längst botten kan trafik längs Fyrisån såsom båtar korsa utan att påverkas (Berg 2023). Fiskar kan lätt simma igenom bubblorna och det finns även bubbelfria öppningar längst sidorna för de organismer som inte vill korsa bubblorna (Uppsala Kommun 2022). Tillförsel av syre från barriären till vattnet minskar fosforhalter vilket i sin tur motverkar övergödning och algbloomning (Uppsala Kommun 2022). Ingen vidare utredning har genomförts kring barriärens inverkan utan kommunen undersöker kontinuerligt upp arbetet kring installationen och om den bör ligga kvar. Detta befintliga system drivs idag från elektricitet från Uppsalas elnät (Berg 2023).

Skräpet som lyfts upp påverkar främst den estetiska aspekten, men det lyfter samtidigt upp problemet kring nedskräpning i ån. Bubbelbarriären spelar en viktig roll i att förhindra skräp i ån och fungerar också som en symbol för att uppmärksamma problemet. Uppsala Kommun uttrycker önskan att sträva mot en hållbarare energikälla som förhoppningsvis också kan ge ytterligare ljus på nedskräpningsproblemet och vikten av bubbelbarriärens syfte (Berg 2023).

1.3 Förutsättningar

1.3.1 Omgivningen

Genom att placera energikällorna lokalt, nära platsen energin används, kan de potentiellt öka medvetenheten om nedskräpningsproblemet och barriärens syfte. De områden som uppskattas vara tillämpbara för respektive energikälla har markerats ut som läge A-D, se figur 3. Bubbelsbarriären sträcker sig diagonalt mellan läge A och C, se blå streck i figur 3.

- Läge A – Container, se figur 4.
- Läge B – Skeppselevatoren, se figur 5.
- Läge C – Gräsplätt se figur 6.
- Läge D – Dansbanan, se figur 7.



Figur 3. Karta över området och till vilken plats läge A-E är placerade. Uppsala. Kungsängen 1:2
© Lantmäteriet. Redigerad i Microsoft Whiteboard.



Figur 4. Läge A – Container. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.



Figur 5. Läge B – Skeppslevatorn. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.



Figur 6. Läge C – Gräsplätt. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.



Figur 7. Läge D – Dansbanan. Illustrationerna är fotograferade av Tilda Andersson.

1.3.2 Kompressorn

Information kring kompressorn och dess drift är erhållen från David Berg, projektledare Uppsala kommun. Bubbelsbarriären drivs med hjälp av skruvkompressor med både tank och kyltork, se figur 8 och egenskaper i tabell 1. Modellen kallas *Storm 8-8-270 ES* och den har ett maximalt arbetstryck på 8 bar (Näsström Maskin u.å.). Motoreffekten ligger på 7,5 kW, men för att driva barriären krävs en effekt på cirka 50-75% av detta beroende på vattenflödet.

Tabell 1. Kompressorns egenskaper.

Storm 8-8-270 ES 10.0Hk 8Bar 270l/tank 1250l/min med kyltork		
Max arb. Tryck	8	Bar
Fri avg. luft	1250	l/min
Motoreffekt	7,5	kW (10hk)
Ljudnivå 4m	68	dB(A)
El anslutning	400	V
Säkring (trög)	25	A
Tankstorlek	270	l
Anslutning	3/4	“
Mått LxBxH	1550x700x1510	mm
Vikt	343	kg



Figur 8. Kompressorn - Storm 8-8-270 ES 10.0Hk 8Bar 270l/tank 1250l/min med kyltork. Illustration är fotograferad av Tilda Andersson.

1.3.3 När är kompressorn och bubbelbarriären i drift?

Tid och datum som kompressorn och barriären är igång finns inget exakt svar på eftersom verksamheten är intermittent. Väl i drift är verksamheten på dygnet runt, men drifttiden beror bland annat på väderförhållanden, aspens lekvandring och värme i kompressorhuset (Berg 2023).

På vinterhalvåret när det bildas is i vattnet styrs luftbubblorna i spridda riktningar vilket förhindrar väggen av luftbubblor från att bildas och fånga in skräp (Berg 2023). Kompressorn kan därför vid vintermånaderna december, januari och februari förväntas vara avstängd (Berg 2023). Desamma gäller halva april och maj då aspen leker i några veckor och verksamheten stängs av. Utöver detta slår kompressorn stundtals av när det blivit för varmt i kompressorhuset. Med hjälp av kylande fläktar och förbättrade system kommer förhoppningsvis detta kunna förebyggas i framtiden (Berg 2023).

1.4 Förslag på alternativa energikällor

Solenergi, energi genererad från stationära cyklar, biogas, en vattendriven kompressor samt vätgaslagring är alla förslag på energikällor för att driva kompressorerna.

1.4.1 Solenergi

Solenergi är en förnyelsebar energikälla, som vid placering på byggnader varken kommer i konflikt med den biologiska mångfalden eller natur- och stadsområden. Det är fördelaktigt då de kräver låg areal och kan tillämpas på redan befintliga ytor. Det har en hög allmän acceptans samt potential att producera en stor mängd energi (Singh et al. 2010). Uppsala kommun har en positiv syn på solceller på byggnader, där plan- och byggnadsnämnden för Uppsala vill att så många byggnader som möjligt ska ha solceller (Uppsala Kommun 2021b). Solpaneler är kopplade till en växelriktare som omvandlar dess producerade likström till växelström, vilket kan nyttja för att driva kompressorerna eller levereras till elnätet (Kristoffersson et al. u.å.).

Anpassning efter väderstrecken leder till maximerat utnyttjandet av solenergin (Kim et al. 2023). Optimal energiproduktion sker när solcellerna är placerade i sydlig riktning, men även öst- och väst är lämpligt (Kim et al. 2023). Solenergi är dock en intermittent energikälla vilket innebär att den är väderberoende (Chen et al. 2023). Elproduktionen kan följaktligen variera från månad till månad och från natt och dag beroende på mängden solinstrålning.

1.4.2 Energi genererad från stationära cyklar

Genom att koppla en generator till en spinning cykel kan användarens rörelseenergi omvandlas till elektricitet (Amaya u.å.). Uppsala kommun är positiva till detta, då det kräver lågt underhåll och anses vara en innovativ metod för att generera elektricitet (Berg 2023). Enligt Uppsala Kommun (2021a) är även cykel en rekommenderad fysisk aktivitet. Naturkontakt och fysisk aktivitet ökar både hälsa och välbefinnande (Folkhälsomyndigheten u.å.).

Att beräkna mängden elektricitet som går att erhålla från en cykel är komplicerat (Amaya u.å.). Det beror bland annat på generatorns effektivitet, längden och intensiteten på cyklingen samt systemets motstånd (Amaya u.å.). En individs effekt beror bland annat på faktorer såsom hjärtfrekvens och hastighet användaren cyklar (Buško 2005). Kinnunens & Ljungemyrs (u.å.) studie visar hur effektbehovet i

genomsnitt ligger på 110 W för att bibehålla en hastighet på 22 km/h för en genomsnittlig vuxen. Detta innebär en energiåtgång på 110 J/s.

En navmotor kan förslagsvis användas som generator som kan monteras på cykelns nav (Bäcknert & Rydén 2009). Dessa typer av generatorer är tysta och de fungerar genom att omvandla den mekaniska energin som skapas genom att cykla till elektrisk energi (Bäcknert & Rydén 2009).

1.4.3 Biogas

Biogas är en förnyelsebar energikälla som framställs av biomassa med hjälp av anaerob nedbrytning (Asam et al. 2011). Dess energiinnehåll är direkt relaterat till halten metan, vilket utgör majoriteten av innehållet i biogasen. Användning av biogas kan minska problem kring avfallshantering, energisäkerhet samt global uppvärmning (Asam et al. 2011).

Uppsala Vatten (2023) har en biogasanläggning nära bubbelbarriären, vid Kungsängens gård. Biogasen skulle teoretiskt sätt kunna lagras i gasflaskor från biogasanläggningen som därefter omvandlas direkt till el med hjälp av en bränslecell eller förbränningsmotor.

1.4.4 Vattendriven kompressor

En vattendriven luftkompressor (trompe) skulle teoretiskt sätt kunna utnyttja vattenflödet i Fyrisån för att skapa ett lufttryck och tillföra slangen med luftbubblor. Den kräver lite underhåll och då vatten är den primära energikällan bidrar den till en ren energiproduktion (Bosch & Fuses Navarra u.å.).

Konstruktionen är relativt enkel då trompen främst består av vertikala rör. Vatten faller genom ett vertikalt rör, där det finns en extern port. Här sugas luft in vilket skapar lufttillförsel. Detta resulterar i att bubblor skapas i röret som stiger till en separationskammare. Där kan bubblorna med hjälp av ett tryckluftsuttagsrör användas till bubbelbarriären (Bosch & Fuses Navarra u.å.).

1.4.5 Vätgaslagring

Vätgaslagring är en effektiv energilagringsslagring. Det möjliggör transport av elektricitet, och om den framställs med endast förnyelsebar energi är den fri från koldioxidutsläpp (Tang et al. 2023). Vätgasen kan lagra överskottsenergi och leverera el när intermittenta energikällor såsom sol- eller vindkraft inte kan producera tillräckligt med energi (Tang et al. 2023). Den lagrade energin innehåller också mer energi per kg än batterier (Naturskyddsföreningen u.å.a).

Vätgas (H_2) produceras genom att dela vattenmolekyler med hjälp av el, en process som kallas elektrolys (Energimyndigheten u.å.e). På så vis lagras elektriciteten i form av vätgas, som därefter kan omvandlas tillbaka till el med hjälp av en bränslecell (Energimyndigheten u.å.e).

Uppsala Vatten har tillsammans med Vattenfall beviljats bygga en laddningsstation för vätgas av Energimyndigheten (Miljöfordonsverige u.å.). På sikt är även målet att skapa en egen vätgasanläggning för produktion av vätgas i Uppsala. Laddningsstationen kommer vara klar från sista september 2023 (Miljöfordonsverige u.å.). Genom att hämta vätgascylindrar från laddningsstation och sen koppla de till en bränslecell kan vätgas potentiellt driva bubbelbarriären.

1.4.6 Relaterat arbete

En tidigare studie har utförts av fyra studenter från Sveriges Lantbruksuniversitet där de undersökt om ett vattenkraftverk i Fyrisån. Studien kallas "En självrenande Fyriså" som utforskar om energitillgången i Fyrisåns vattenflöde är tillräckligt för att kunna driva kompressorn. Resultatet visade på att kompressorn kan drivas med hjälp av vattenkraft. År 2010 nekade dock miljödomstolen akademiförvaltningens planer på ett kraftverk vid kvarnfallet i Fyrisån för att driva lokaler i Uppsala (Ekholm u.å.). Länsstyrelsen nekade ansökan med belägg kring de negativa miljökonsekvenserna (Ekholm u.å.). Att driva kompressorn och barriären med vattenkraft förutsätter således att vattenkraftverket godkänns av myndigheter att åter sättas i bruk.

1.5 Multikriterieanalys

På grund av komplexiteten kring att fastställa vilka alternativ som är mer framgångsrika än andra på både ett objektiva och transparent vis kan ett betygssystem vara fördelaktigt att tillämpa. I denna studie används en multikriterieanalys (MKA) för att på ett strukturerat tillvägagångssätt bedöma och jämföra olika alternativ (Eskandari et al. 2012). Att använda en MKA i beslutsprocessen bidrar med en tydlig överblick och en transparent demonstrering av framgången för respektive alternativ (Refsgaard 2006).

En MKA bedömer de olika alternativen gentemot varandra med hjälp av en uppsättning kriterier som verkställs mellan beslutsfattare och intressenter (Dodgson J, Spackman M 2000). Respektive alternativ värderas och poängsätts utefter dessa kriterier, vilka kan vara mer eller mindre kvantifierbara. Dessa sammanställs i en tabell vilket skapar en konkretiserad bild över hur respektive alternativ påverkas av alla kriterier. En MKA skapar således en tydlig överblick över decentraliserad information (Dodgson J, Spackman M 2000). Resultat från MKA kommer bero på vilka kriterier alternativen bedöms utifrån, betygssystemet samt viktningsvärden de tilldelas (Troldborg et al. 2014).

Viktning är vanligt förekommande i en multikriterieanalys, men det är inte obligatoriskt (Dodgson J, Spackman M 2000). Viktning innebär att de olika kriterierna tilldelas vikter baserat på hur viktiga de är för beslutsfattaren (Dodgson J, Spackman M 2000).

En känslighetsanalys är ett verktyg som tillämpas i en MKA som bidrar med ökad förståelse kring hur det slutgiltiga resultatet påverkas beroende på val av variabler (Kindbom & Gustafsson 2017). Val av kriterium, viktning och parametrar är alla exempel på variabler som kan modifiera resultatet och dess stabilitet. En känslighetsanalys bör styras utifrån studiens syfte (Kindbom & Gustafsson 2017), det vill säga att finna en eller flera hållbara och säkra energikällor.

2. Metod

2.1 Kriterier

Kriterier valdes i mån om att undersöka både en teknisk, miljömässig samt social aspekt. Detta genomfördes tillsammans med handledarna G. Larsson, SLU och D. Berg, Uppsala kommun. Mängden kriterier valdes utefter omfattning och tidsplan. Utvalda kriterier benämns följande:

- K_1 – Hög elproduktion.
- K_2 – Låga koldioxidutsläpp.
- K_3 – Hög säkerhet för omgivningen.

2.1.1 Elproduktion

Elproduktionen klassas som kvantitativ data, vilket är den data som ges i siffror. Högst poäng tillges den energikälla som producerar mest el utifrån given yta, med enheten kilowatt per timme (kWh). Elproduktionen kommer jämföras med elnätet – det befintliga systemet som återspeglar energibehovet för att driva barriären.

Det årliga energibehovet beräknas utifrån att kompressorn är igång mars, halva april/maj och från juni till november, se ekvation 1-2. Dessa månader är kompressorn i drift dygnet runt. Tillfälliga avbrott i kompressorns drift på grund av värme i kompressorhuset bortses från i beräkningarna, då elproduktionen bör vara tillräcklig utifall inga driftförluster sker. Om en energikälla sedan producerar energi under övriga månader skapas en överproduktion som kan säljas alternativt lagras.

$$E_{månad} [Ws] = P_{behov} [W] \cdot t_{månad} [s] \quad (1)$$

Där 1 Wh = 3 600 Ws.

$$E_{månad} [kWh] = \frac{E_{månad} [Ws]}{3600 \cdot 1000} \quad (2)$$

Effektbehovet (P) som krävs för att driva barriären kommer beräknas utifrån att dess användningseffekt är på 75 %, se ekvation 3.

$$P_{behov} [W] = \frac{P_{Motor} [W] \cdot P_{användning} [\%]}{100} \quad (3)$$

Samtliga energikällor utvärderas utifrån förutsättningen att de är i kontinuerlig drift dessa månader under en period om 25 år. Om energikällan producerar en mindre energimängd än det som krävs för att ersätta elnätet kan energikällan behöva kombineras med andra energikällor, alternativt vara ett komplement till elnätet. Den totala elproduktionen över denna period är relativ till den areal som finns tillgänglig. Förenklat, så beror energikällornas förmåga att producera el på hur många moduler som får plats på den befintliga ytan, se ekvation 4. Ytan varierar från läge till läge, vilket således skapar olika förutsättningar för respektive alternativ.

$$E_{25 \text{ år}} = 25 \sum_{k=1}^n E_{månad} \left[\frac{kWh}{m^2} \right] \cdot A [m^2] \quad (4)$$

Där n = antal månader i bruk och A= area.

2.1.2 Koldioxidutsläpp

Vid beräkningar av koldioxidutsläpp finns flera aspekter att beakta. Utsläpp beror dels på tillverkningsprocess, material mängd som krävs samt koldioxidutsläpp i bruk (Vanky 2018). Koldioxidutsläpp klassas som kvantitativ data och dess storlek kommer uppskattas med en emissionsfaktor med enhet g CO₂ ekvivalenter/kWh. Koldioxidekvivalenter (e) är ett mått på olika växthusgasers utsläpp utifrån deras globala uppvärmningspotential (NE u.å.). Emissionsfaktorn baseras på beräkningar från dess utsläpp vid tillverkning samt utsläpp i bruk i förhållande till dess energiproduktion under 25 år, se ekvation 5 och 6.

$$U [kg CO_2 e] = U_{tillverkning} [kg CO_2 e] + U_{bruk} [kg CO_2 e] \quad (5)$$

Där U = Utsläpp.

$$EF \left[\frac{g CO_2}{kWh} \right] = \frac{U_{25 \text{ år}} [g CO_2 e]}{E_{25 \text{ år}} [kWh]} \quad (6)$$

Där EF = Emissionsfaktorn.

Alternativen kommer jämföras med uppskattat värde på elnätets emissionsfaktor. SMED (*Svenska Miljö Emissions Data* u.å.) utförde på uppdrag av Naturvårdsverket en utredning för klimatpåverkan för nordisk elmix mellan 2016-2018. Resultatet visade en genomsnittlig emissionsfaktor på 90,4 g CO₂e/kWh som representerar användningen av nordisk elmix och dess växthusgasutsläpp, vilket kommer antas gälla för Uppsala elnät (u.å.). Elnätets tillverknings- och driftsutsläpp har således inte analyserats, utan direkt uppskattas med en emissionsfaktor.

2.1.3 Säkerhet

I utvärdering av säkerhet ligger fokus i att identifiera potentiella risker och fördelar kring respektive alternativ. Detta avser risker kring skador på människor, egendom eller miljö och där risker bör minimeras eller åtgärdas. De säkerhetsrisker som analyseras är brandrisk, elektriska risker samt hälsorisker.

Säkerhet är ett exempel på kvalitativ data, där information samlas snarare än beräknas. Detta kommer bidra med detaljer för att förstå säkerhetsrisker från respektive alternativ och för att kunna betygsätta de därefter. Poängsättning av säkerhetsgraden genomförs under ett möte tillsammans med behovsägare samt extern handledare David Berg, projektledare på Uppsala Kommun och intern handledare Gunnar Larsson, forskare vid Institutionen för energi och teknik på Sveriges Lantbruksuniversitet.

2.2 Avgränsningar

Den geografiska avgränsningen är definierad utifrån Uppsala kommun och den tillgängliga ytan i närheten av kompressorn och bubbelbarriären. Detta skapar förutsättningar för att lokalisera adekvata områden utefter omgivande rörelse och stadslivet samt ökar ljuset på nedskräpningsproblemet och bubbelbarriären.

Ett flertal energikällor har undersökts på efterfrågan av Uppsala kommun för att bidra med ett flertal idéer. Generella beräkningar har utförts i Excel för att möjliggöra en bred analys av flera olika energikällor i förhållande till studiens omfattning och tidsplan. Det innebär att allmänna metoder och antaganden har tillämpats istället för att använda specifik detaljerad data eller modeller för en given komponent. Generella parametrar har således tillämpats för att få en övergripande uppfattning och bedömning av resultatet. Denna avgränsning motiverades av den betydande omfattningen av data som skulle krävas för att undersöka dessa komponenter i mer detalj utifrån tidsramen.

På grund av den begränsade omfattningen kommer vissa energikällor uteslutas direkt utifrån potential och om den är implementerbar utefter omgivningens förutsättningar. För ett mer precist resultat har studien även begränsats till tre kriterier. Framtagna alternativ för att fylla kompressorn energibehov året om har också valts utifrån studiens omfattning och tidsplan.

Studien fokuserar på att undersöka elproduktionen för varje månad, ej per dag. Denna avgränsning görs på grund av tiden som skulle krävas för att samla in och analysera data för flera energikällor på en högre frekvens utifrån tidsramen. Resultatet förväntas ge tillräcklig information för att utvärdera energikällornas lämplighet som alternativ till att driva och skapa en större självförsörjning på energi till kompressorn.

För koldioxidutsläpp har hänsyn tagits till utsläpp i samband med tillverkning av material samt utsläpp i bruk. Några av de faktorer som inte har beaktats i studien innefattar utsläpp via transport, var tillverkningen sker samt den elmix som användes vid tillverkning av material. Ekonomiska aspekter tas inte heller i beaktning i studien.

2.3 Alternativa energikällor

Arbetet inleddes med en brainstorming för att ta fram idéer kring vad för typ av energikällor som skulle kunna driva kompressorn med utgångspunkt kring vad som är utförbart på platsen och eventuellt hållbarare energiproduktion. Detta utfördes tillsammans med handledare G. Larsson, SLU och behovsägare D. Berg, Uppsala kommun.

Inledningsvis utvärderades ett flertal energikällor individuellt, bland annat solenergi, energi från stationära cyklar, vätgas, biogas samt en vattendriven kompressor. Både biogas och den vattendrivna kompressorn exkluderas dock i tidigt skede utifrån dess potential och omgivningens förutsättningar. Utifrån de utvärderade energikällornas elproduktion tas därefter fyra möjliga alternativ fram, där de energikällor som inte kan förse bubbelbarriären med energi året om kombineras med elnätet eller en annan energikälla, se figur 9.



Figur 9. Beskrivning och tillvägagångssätt kring framtagning av energikällor och möjliga alternativ för att driva kompressorn. Figur skapad av Tilda Andersson via Canva.

De energikällor som valdes att utvärderas vidare, se figur 10, jämfördes med det befintliga systemet, elnätet (E_0). Antalet valda energikällor benämns [E_1, E_2, E_3, E_4].



Figur 10. Energikällor som utvärderas med deras respektive lägen. Figur skapad av Tilda Andersson via Canva.

2.3.1 Solenergi

Elproduktion

Solpanelerna kan alternativt placeras vertikalt på läge B (E_1) på skeppselevatorns sydliga, västliga och östliga vägg. Genom att placera solcellerna på väggar kan solljus reflekteras från marken och ansamling av tex. snö, löv och liknande minimeras. Areal för de väggmonterade solpanelerna på skeppselevatorn har mätts så noggrant som möjligt och uppskattas ta upp en areal på totalt 62,6 m².

Ett ytterligare alternativ är att placera solpaneler på läge D, på dansbanas tak (E_2). Taket är indelat i tolv triangelformade rutor, för att utnyttja hela takets yta används både kvadratiska och trekantiga paneler så alla hörn täcks och elproduktionen kan maximeras (sunnytek u.å.). Den totala ytan som går att nyttja på taket uppskattas till 306,3 m² baserat på mätningar av området.

Studien utgår från svenska förhållanden med avseende på solstrålning och från monokristallina solceller. Mängden solenergi som kan generas har erhållits med hjälp av EU kommissionens PV GIS verktyg där koordinater från läge B och D har tillämpats för att erhålla den genomsnittliga mängden solinstrålning per månad och kvadratmeter för de specifika platserna mellan 2005-2020 (European Commission u.å.). För att skapa en transparent bild över hur detta påverkar resultatets tillförlighet har standardavvikelsen, variationen av solinstrålning från år till år bifogats, se tabell 2. Variation av solinstrålning per dygn kommer även utredas för A_2 i illustrativt syfte, för att belysa osäkerheter kring energitillförlitligheten för solceller.

Tabell 2. Standardavvikelsen, den genomsnittliga variationen från år till år av bestrålning för de specifika koordinaterna. Data från 2005-2020 från EU kommissionens PV GIS verktyg.

Azimut – vinkeln för solpanelerna	Standardavvikelsen 2005-2020
-90 ° är öst, 0° är syd, 90° är väst.	
Solenergi läge B (skeppslevatorn)	
0°	6,61
90°	4,54
-90°	6,55
Solenergi läge D (dansbanan)	
0°	7,85
30°	7,05
60°	6,12
90°	5,01
120°	3,67
150°	2,23
180°	2,23
-150°	3,61
-120°	5,51
-90°	7,17
-60°	8,11
-30°	8,29

Verkningsgraden på solpanelerna antas ligga på 20% vid användning av monokristallina solpaneler, eftersom de generellt har en verkningsgrad på 18-22 % (Energimyndigheten u.å.b). Arean per solpanel antas vara 1,82 kvadratmeter, vilket motsvarar den vanligaste solpanelsstorleken (HemSol 2022).

Växelriktaren antas kopplas till elnätet, då energi kan säljas vid potentiell överproduktion och kompletteras av elnätet när/om solcellerna inte producerar tillräckligt med energi för att driva kompressorn. Överskottsproduktion kan även lagras och tillämpas vid underproduktion.

Koldioxidutsläpp

Tillverkning av solceller är det som främst skapar koldioxidutsläpp (Energimyndigheten u.å.d). Väl i drift antas utsläpp från solceller vara försumbart. Enligt Engholms & Johanssons (2021) utredning om solceller som fasadmateriäl utifrån en miljömässig synvinkel är utsläppen 63 kg CO₂e/m² för solceller av monokristallin struktur under en driftperiod på 25 år.

Säkerhet

Solcellsinstallationer klassas som starkströmsanläggningar (Energimyndigheten u.å.c). Vid felaktig installation eller bristfälligt underhåll kan en brand- eller stötrisk uppstå. Brytare, löshängande kablar, kopplingslådor eller elmaterial som inte är vattenskyddade är exempel på aspekter som kan skapa problem (Brandskyddsföreningen u.å.a). Vid olyckor såsom brand kan panelerna frigöra giftiga ämnen som kan spridas i luften och skada bland annat grödor (Naturskyddsföreningen u.å.b). Anläggningar för energiproduktion prövas normalt i Sverige kring dess miljöpåverkan enligt regleringar i miljöbalken, men solceller kräver normalt ingen prövning (Kamm u.å).

Solinstallationer på högre höjder skapar även en fallrisk vid installation eller underhållning (The Hartford 2021). Panelerna i sig är tunga och kan skapa ryggsador eller muskeldrag. Our World in Data (u.å.) har utrett säkerheten kring de nio mest tillämpade energikällorna i världen, och konstaterat att dödstalen per TWh elektricitet är lägst för solceller, se tabell 3.

Tabell 3. Dödstalen per producerad TWh elektricitet år 2021 (Our World in Data u.å.)

Energikälla	Dödstalen per producerad TWh elektricitet 2021
Biomassa	4,63
Brun kol	32,72
Kol	24,62
Gas	2,82
Vattenkraft	1,30
Kärnkraft	0,03
Olja	18,43
Sol	0,02
Vind	0,04

2.3.2 Energi genererad från stationära cyklar

Elproduktion

Stationära cyklar utredas som alternativ för att generera elektricitet (E_3) vid läge C. Utifrån mätningar och given yta uppskattas fem cyklar kunna implementeras. Energimängden förväntas vara proportionell mot effekt av individ som cyklar samt effektiviteten hos generatoren, se ekvation 7 och 2.

$$E_{månad} [Ws] = \sum_{k=1}^n P_{Ut} [W] \cdot \eta_{generator} \cdot t [s/månad] \quad (7)$$

Där n = antal cyklar och η = verkningsgrad.

Uppskattningar är bland annat baserade på Kinnunen & Ljungemyr (u.å.) studie kring energiåtgång vid cykling. Den genomsnittliga hastigheten varierar beroende på individ som cyklar och dess fysiska förutsättningar, men en genomsnittlig hastighet har uppskattats till 22 km/h utan lutning (Kinnunen & Ljungemyr u.å.).

Uteffekten är förutsatt att ingen energi försvinner via värmeförluster. Varvtalsområdet antas ligga mellan 0-400 varv/min och verkningsgraden för generatoren är ungefär 70% (Bäcknert & Rydén 2009).

Hur mycket cyklarna kommer tillämpas är svårt att förutspå. Antaganden kommer således göras, vilket kommer påverka resultatet. Uppskattningsvis kommer cyklarna att tillämpas mer på sommaren än på vintern och i regnperioder. Varje cykel uppskattas användas 2 timmar om dagen från maj till augusti och 30 minuter om dagen från september till april. Dessa antaganden är utifrån idealiska förhållanden dels kring användning, effektmängd och väderförhållande. Både användningsmängd och väderförhållanden kan variera och det är viktigt att beakta att detta endast är grova uppskattningar.

Koldioxidutsläpp

Utsläppen från cyklarna beror dels på materialanvändningen och tillverkningsprocessen. Väl i drift antas cyklarna i sig inte bidra med utsläpp. Användning av cyklarna kommer dock ge ett ökat kaloriintag av användaren, som krävs för att förbränna energi vid cykelturen. Detta kan leda till en indirekt ökning av koldioxidutsläpp, vilket inte kommer att beaktas i studien.

Energimängden som krävs för att tillverka en cykel är 184 kWh och cykeln antas produceras i fabrik med nordisk elmix (Energimyndigheten u.å.a). Uppskattningsvis är cykels ram, drev, gaffel och hjul gjorda av kolfiber där utsläppen är 30,1 kg CO₂/kg kolfiber (Ghosh et al. 2021; Nilsson & Zemack 2022). Hjulet inkluderar själva däcket, slangen, bromsskiva, snabbblås och kassett (Jansson 2009). Utsläppen vid tillverkning av motorn uppskattas vara ca 16,82 kg CO₂e per enhet (Zhu & Lu 2023). Övriga delar och dess utsläpp försummas då de antas vara små (Nilsson & Zemack 2022). Se vikt på de olika cykeldelarna tillverkade av kolfiber i tabell 4 (Jansson 2009; Nilsson & Zemack 2022). Produktion av kolfiber kan även inkludera utsläpp från användning av kemikalier eller lösningsmedel, vilket försummas i studien.

Tabell 4. Vikt på olika cykeldelar tillverkade av kolfiber.

Cykeldel	Vikt [g]
Cykelram	1158
Hjul	3010
Cykelgaffel	1494
Cykeldrev	111,7

Säkerhet

Cykling som aktivitet främjar hälsoaspekter. När människor är friskare och starkare tenderar de att ha bättre fysiska och kognitiva förmågor. Detta kan hjälpa människor i vardagen att utföra uppgifter säkrare med mindre sjukdoms- eller skaderisk (Hälsa 2019).

Risker kan däremot skapas kring cykelgeneratorsystemet. Utsatta elektriska anslutningar bör skyddas och generatoren bör klara det specifika lastintervallet (OSHA, Occupational Safety and Health Administration u.å.). Faktorer såsom regn, trasiga kablar eller överbelastning av generatoren kan skada systemet vilket leder till större säkerhetsrisker såsom brand eller elektriska stötar. Generatoren bör således vara ordentligt fastsatt till cykeln så kablar och system förblir intakt. Regelbundna inspektioner krävs för att säkerställa generatorns skick och en säker installation (OSHA u.å.).

2.3.3 Vätgaslagring

Elproduktion

Vätgaslagring kommer undersökas som kraftkälla för att driva kompressorn, (E_4), där vätgascylindrarna och bränslecellen potentiellt kan placeras inuti skeppsselevertorn, läge B.

För att uppskatta hur många vätgascylindrar som krävs för att driva kompressorn behövs information kring kapaciteten hos varje gasflaska samt bränslecellens effektivitet, se ekvation 8 (Vätgas Sverige u.å.b). Bränslecellen uppskattas ha en hög verkningsgrad på ungefär 60% (Vätgas Sverige u.å.a).

$$E_{\text{månad}} [kWh] = \sum_{k=1}^n H_{2 \text{ per cylinder}} [kg] \cdot E_{H_2} \left[\frac{kWh}{kg H_2} \right] \cdot \eta_{\text{bränslecell}} \quad (8)$$

Där n = antal vätgascylindrar och η = verkningsgrad.

Gas mäts ofta i normal kubikmeter (Energimarknadsbyrån u.å.). Rent generellt är energimängden 33,3 kWh per kilo vätgas (engineeringtoolbox u.å.). Om en 50 liters gasflaska med ett tryck på 350 bar används så rymmer den ungefär 1,15 kg vätgas per flaska enligt A. Abou-Taouk, en expert inom vätgas på Nilssons Energy AB (Abou-Taouk 2023).

Dimensioner och vikt för en sådan vätgascylinder är uppskattade från Linde Gas vätgascylindrar till en diameter på 230 mm, höjd 1775 mm samt vikt 69 kg (Kägu 2023). Vikten kan dock variera något beroende på trycket i flaskan. Byten och påfyllning av vätgascylindrarna antas utföras en gång per månad. Antalet cylindrar som får plats har uppskattats till en area på ungefär 8 m², baserat på mätningar på byggnaden samt antaganden kring hur stor areal trappa och arbetsyta upptar invändes.

Koldioxidutsläpp

Utsläpp beror på elmix som tillämpas vid produktion, materialanvändning samt vart gas och material skapas. Koldioxidutsläppen som skapas vid tillverkningen av vätgas (H_2), cylindrar och bränslecellen kommer således uppskattas. Den el som hämtas från laddningsstationen i Uppsala antas vara från solen, och produktionen av denna gröna vätgas uppskattas till 53,4 kWh/kg vätgas (Nordén 2020).

Enligt FN:s klimatpanel och deras rapport på utsläppsberäkningar för solceller år 2014 ger solel generellt upphov till 41 g CO₂/kWh vilket kommer antas för den solel som skapar vätgasen, se ekvation 9 (Energimyndigheten u.å.b).

$$U [kg CO_2 H_2produktion] = \sum_{k=1}^n 53,4 \left[\frac{kWh}{kg H_2} \right] \cdot 0,041 \left[\frac{kg CO_2}{kWh} \right] \cdot 1,15 kg \left[\frac{H_2}{cylinder} \right] \quad (9)$$

Där n = antal cylindrar.

Väl i drift kommer utsläppen från bränslecellen försummas då bränsleceller drivna av väte skapar rent vatten och är koldioxidfria (Floberg & Grundel Sörensson 2021), men tillverkningen av mängden vätgas som krävs per månad kommer inkluderas. Utsläppen per cylinder uppskattas till ungefär 1815,8 kg CO₂e/cylinder (Nordén 2020). Bränslecellen har ett effektbehov på 5,6 kW. Baserat på Dodds et al. (2015) studie kring vätgas- och bränslecellsteknologin är utsläppen för en bränslecell på 100 kW 25-100 ton CO₂ och dess livslängd är på 10 år.

Säkerhet

Brandskyddsföreningen (u.å.) har varit aktiv i frågan om säkerheten kring vätgas då gasen klassas som brandfarlig. Vid felhantering kan gasen vara explosiv, vilket följaktligen ställer höga krav på korrekta säkerhetsrutiner vid hantering och förvaring av vätgascylindrarna. Förvaringsutrymmet bör vara välventilerat och stabilt placerat för att förhindra ansamling av vätgas och minimera brandrisker (Rivkin et al. 2015). Anslutning mellan vätgascylindrar och bränslecell bör även vara täta och läck fria för att minimera brandrisk. En bränslecell i sig skapar inte en stötrisk, men även här finns brandrisk med den höga spänning som krävs för att driva en bränslecell (Rivkin et al. 2015). Då cylindrarna är tunga, 69 kg per enhet, finns en skaderisk vid installation samt vid regelbundna byten av cylindrarna. Hälsorisen här beror således på hur många cylindrar som används.

Förvaringsutrymmet bör innehålla säkerhetsutrustning, till exempel brandsläckare och skyddsglasögon. Anordningen bör regelbundet inspekteras för att säkerställa korrekt verksamhet och utbildning bör ges för de som hanteras vätgascylindrarna. Genom att följa dessa försiktighetsåtgärder kan elektricitet säkert och effektivt utvinnas (Rivkin et al. 2015).

2.3.4 Exkluderade alternativ

Biogas uteslöts i tidigt skede eftersom denna energikälla ansågs vara ogynnsam utifrån ett klimatperspektiv. Björn Isaksson, sakkunnig på BioDriv Öst konstaterar att klimatnyttan blir störst inom transportsektorn, eftersom klimatnyttan sjunker med omkring 80% om biogasen nyttjas inom el sektorn istället för att ersätta fossila bränslen. Enligt L. Nordin, sektionschef Biogas på Uppsala Vatten och Avfall AB, har Uppsala dessutom ett underskott på biogas vilket gör att de bör prioriteras inom transportsektorn. Nordin menar även på att småskaligheten i projektet gör det komplicerat.

En vattendriven luftkompressor (trompe) uteslöts även den i identifieringsfasen. Utifrån vidare undersökningar kring denna uppskattades ytan som krävs vara alldeles för stor för att erhålla tillräckligt med tryck utifrån höjd och bredd på Fyrisån. Dess klimatnytta hade också minskat utifrån givna området. Dessa två energikällor ansågs därför inte vara en prioritet att undersöka vidare kring i denna studie med avseende på studiens omfattning och energikällornas potential.

2.4 Viktning

En subjektiv viktningmetod tillämpades i mån om att spegla behovsägarens prioriteringar. Detta gjordes på ett möte tillsammans handledare och behovsägare, där vikter tilldelades baserat på behovsägarens subjektiva bedömningar av vad som är viktigast utifrån den givna situationen.

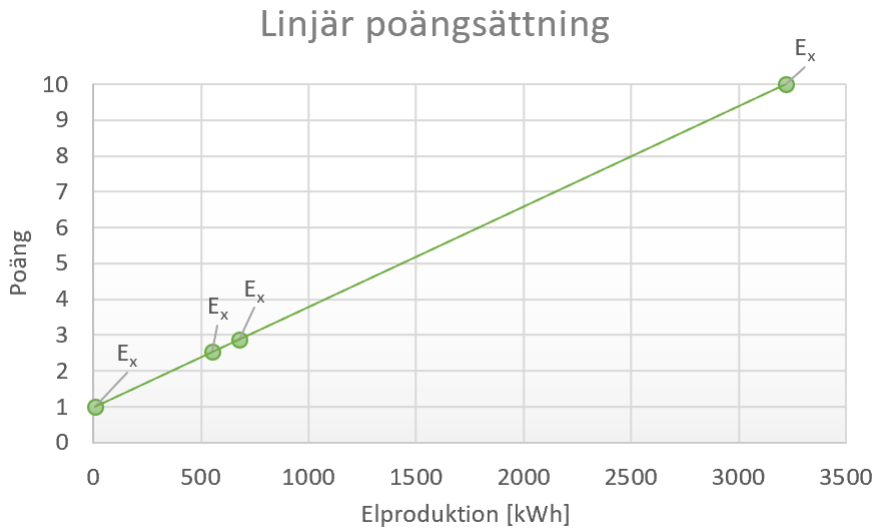
2.5 Betygsättning av kriterium

Varje bedömningskriterium poängsätts med en siffra mellan 1 till 10 och multipliceras därefter med överenskommen viktning. Mest lönsamt är det med högst nettovärde. Både kvantitativ- och kvalitativ data kommer betygsättas numeriskt och linjärt. Kvantitativ data anges direkt i siffror med hjälp av linjär betygsättning, medan kvalitativ data tilldelas en siffra. För att kunna tillämpa numerisk poängsättningen på kvalitativ data kommer beskrivningarna tilldelas en siffra mellan 1-10.

Den linjära poängsättningen kan beskrivas med ekvation 10 där V_{10} beskriver det högsta värdet, V_0 det minsta värdet och V_x det undersökta alternativets värde. Ekvation 10 tilldelar högst poäng till det högsta värdet, se resultat figur 11. Ekvation 11 tilldelar istället högst poäng till det lägsta värdet.

$$Poäng = 10 - 9 \cdot \frac{V_{10} - V_x}{V_{10} - V_0} \quad (10)$$

$$Poäng = 1 + 9 \cdot \frac{V_{10} - V_x}{V_{10} - V_0} \quad (11)$$



Figur 11. Exempel på poängsättningsdiagram för elproduktion med konstruerade värden för olika energikällor.

Poängen multipliceras därefter med viktningsvärdet. Slutligen sammanställs alla poäng och alternativen rangordnas utefter ekvation 12 där S_x beskriver slutpoängen. Det alternativ med högst sammanlagt poäng anses vara mest lämplig att ersätta eller komplettera kompressorn.

$$S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_x \quad (12)$$

2.6 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen kommer att undersöka hur resultatet påverkas vid förändrade parametrar, se tabell 5. De parametrar som ändras är systemets livslängd, effektbehovet samt viktningsvärdena.

Tabell 5. Modifierade parametrar i känslighetsanalysen.

Varierad parameter	Innan	Efter
Tidsaspekt [år]	25	10,20,30
Kompressorns effektbehov av 7,5 W [%]	75	50
Viktningvärden (K1, K2, K3) [%]	(x,y,z)	(x,x,x)

2.7 Multikriterieanalysmall

Mall för multikriterieanalysen, se tabell 6.

Tabell 6. Multikriterieanalys med poäng och slutbedömning av respektive alternativ.

Kriterier	Datotyp	Viktning	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Drifttid [år]						
25						

Teknisk

Elproduktion kWh/år Kvantitativ %

Miljömessig

Koldioxidutsläpp - Emissionsfaktorn Kvantitativ %
g CO₂ ekv/kWh

Social

Säkerhet Kvalitativ %

Slutpoäng

Rangordning

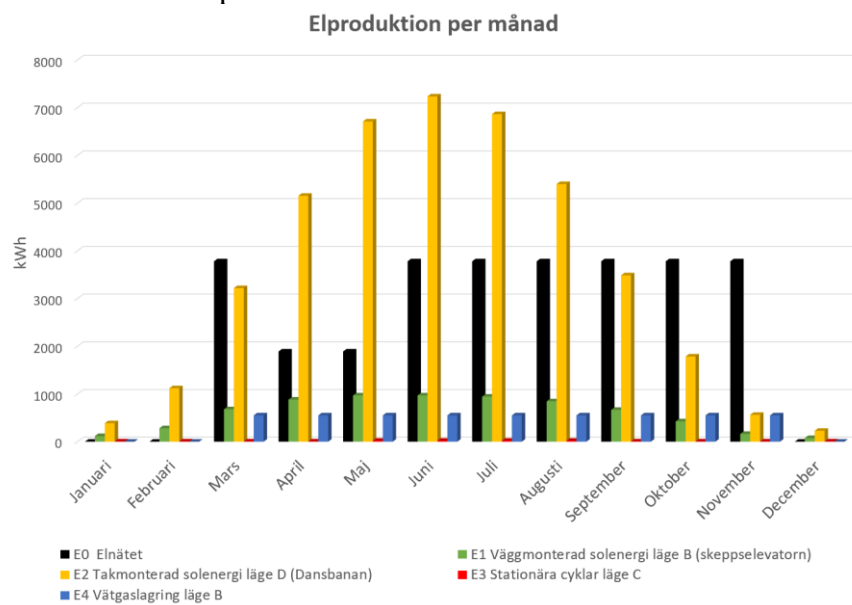
3. Resultat

3.1 Respektive energikälla

3.1.1 Elproduktion

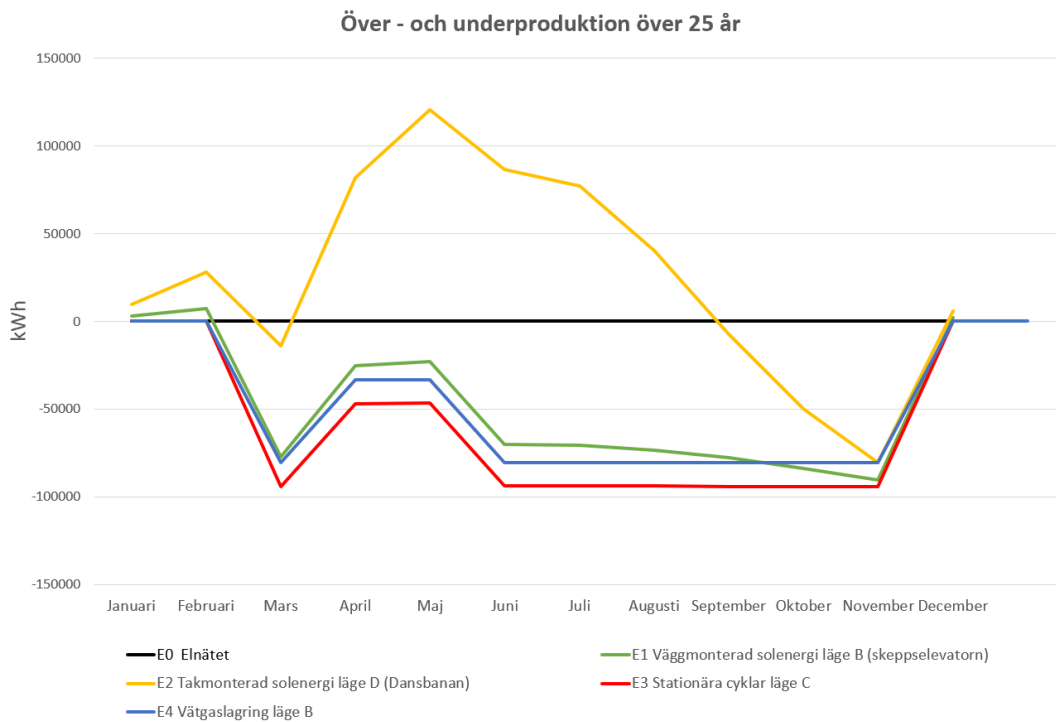
Elproduktionen för respektive energikälla under ett år visas i figur 12. De svarta staplarna representerar elnätet och elbehovet under olika delar av året. Januari, februari och december saknar svarta staplar, vilket betyder att bubbelbarriären är avstängd. Övriga staplar i dessa perioder representerar överproducerad elektricitet, såväl som de staplar som är högre än elnätets under hela tidsperioden. Under de månader kompressorn är igång observeras högst elproduktion för de gula staplarna vilket är de takmonterade solpanelerna (E_2). Lägst elproduktion observeras för de röda staplarna som representerar de stationära cyklarna (E_3).

Antalet vätgascylindrar som får plats på den befintliga ytan blev 24 stycken. Totala mängden vätgascylindrar blir således 48 stycken som alterneras och fylls på med ny vätgas varje månad. Mängden el som går att utvinna från dessa 24 cylindrar demonstreras i de blå staplarna.



Figur 12. Elproduktion per månad under ett år.

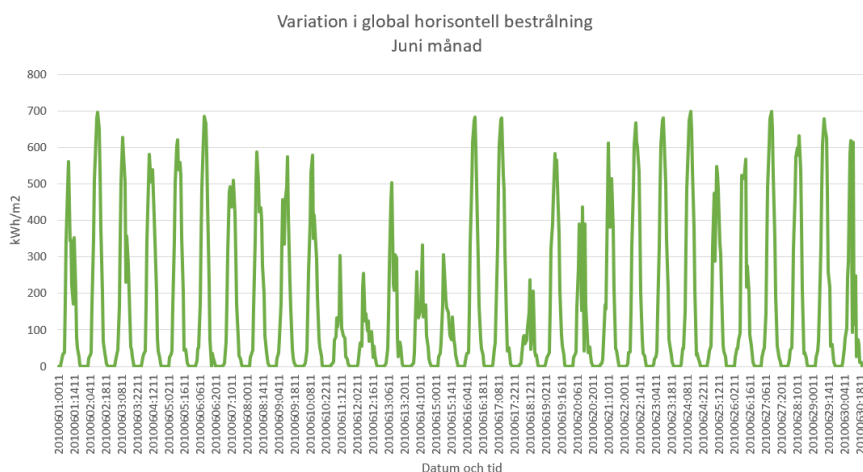
Figur 13 demonstrerar över- och underproduktionen av elektricitet över 25 år för alla energikällorna. Den svarta linjen representerar elnätet som varken skapar över- eller underproduktion av energi. Här går det att observera en underproduktion av energi för alla energikällorna under mars, september, oktober och november, som alla ligger under elnätets elproduktion i dessa tidsperioder.



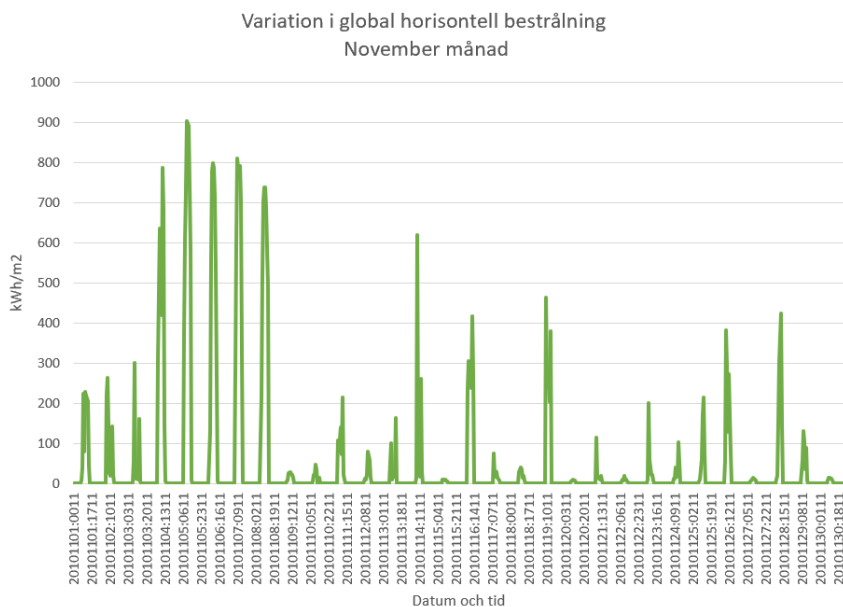
Figur 13. Över- och underproduktion under 25 år för respektive energikälla.

Variation av solinstrålning

Illustrationerna demonstrerar hur solstrålningsenergin som träffar en kvadratmeter av ett horisontellt plan varierar från natt och dag under både sommar och vinter, se figur 14 och 15. Data är utifrån de specifika koordinaterna för de takmonterade solpanelerna som är placerade i söderläge för A_2 .



Figur 14. Exempel på hur solstrålningsenergin varierar för A_2 under Juni 2010. Data från 2005-2030 från EU kommissionens PV GIS verktyg.

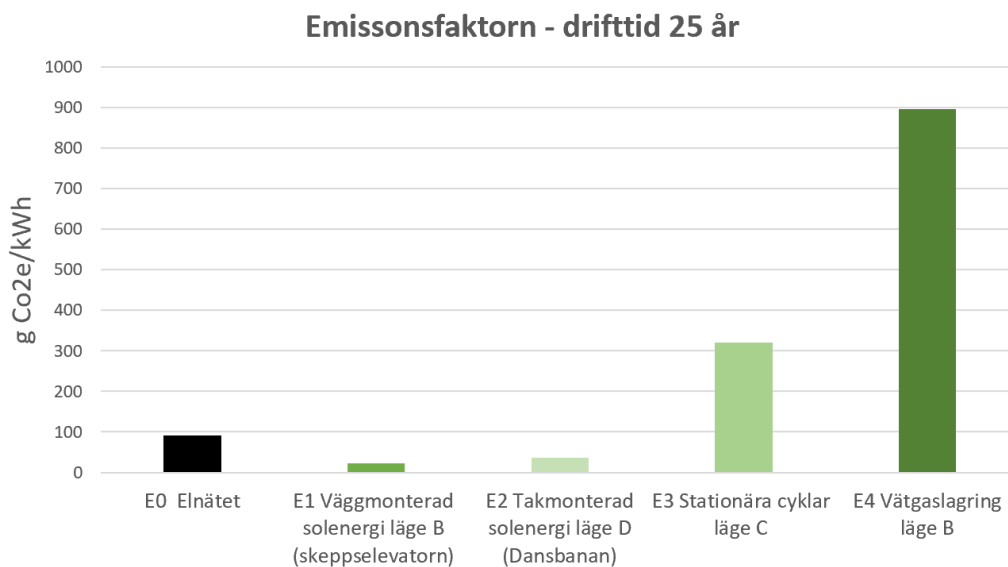


Figur 15. Exempel på hur solstrålningsenergin varierar för A_2 under November 2010. Data från EU kommissionens PV GIS verktyg.

3.1.2 Koldioxidutsläpp

Utsläppen för respektive energikällor sker främst vid tillverkning. Utsläpp i bruk är försumbara för alla energikällor förutom vid produktionen av vätgas, men även för vätgas är störst utsläpp vid tillverkning av material. Utsläppen i förhållande till dess elproduktion blev deras emissionsfaktor, se figur 16.

Högst emissionsfaktor fick vätgaslagringen (E₄) medan de väggmonterade solpanelerna på skeppselevatoren (E₁) fick lägst. I förhållande till elnätet blev E₁ och E₂ mindre medan E₃ och E₄ blev större.



Figur 16. Emissionsfaktorn under 25 år för energikällorna.

3.2 Alternativ för att driva kompressorn

Då elektricitet saknas under vissa månader för alla energikällorna togs fyra potentiella alternativ fram för att fylla bubbelbarriärens energibehov.

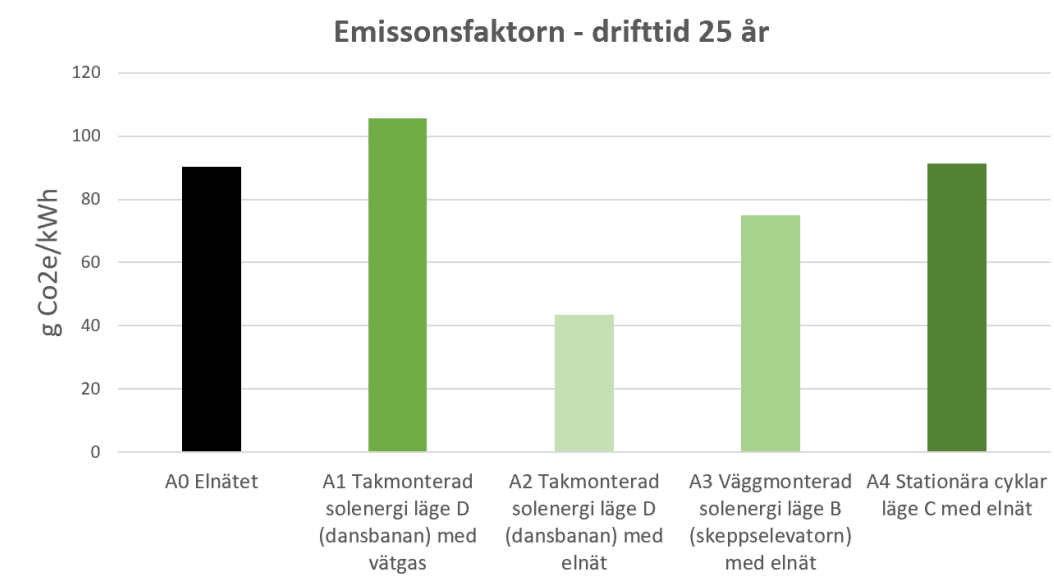
- A₁ – Takmonterad solenergi på dansbanan läge D i kombination med vätgas.
- A₂ – Takmonterad solenergi på dansbanan läge D i kombination med elnätet.
- A₃ – Vägghmonterad solenergi på skeppselevatoren läge B i kombination med elnätet.
- A₄ – Stationära cyklar läge C i kombination med elnätet.

Energikällorna kombineras med varandra eller med elnätet för att fylla kompressorns energibehov och komplettera de månader där en underproduktion av elektricitet finns.

För A₁ krävdes totalt tio vätgascylindrar för att komplettera elbristen från de takmonterade solcellerna på dansbanan. Det krävs två vätgascylindrar i mars, en i september, fyra i oktober och sex i november varje år. Resterande energikällor kompletteras med elektricitet från elnätet vid de tillfällen en underproduktion uppstod. Utifrån detta beräknades nya emissionsfaktorer för alla alternativen utifrån dess totala utsläpp i förhållande till dess nya elproduktion. Genom att potentiellt lagra den takmonterade solenergi från dansbanan som vätgas användes den beräknade emissionsfaktorn för E₂ i beräkningarna av vätgasens koldioxidutsläpp.

3.2.1 Koldioxidutsläpp

De totala utsläppen från de kombinerade energikällorna i förhållande till dess elproduktion blev deras nya emissionsfaktor, se figur 17. Högst emissionsvärde fick takmonterad solenergi i kombination med vätgas (A₁). Lägst emissionsvärde fick takmonterad solenergi i kombination med elnät (A₂). I förhållande till den svarta stapeln som är utsläpp från elnätet, är utsläppen mindre för A₂ och A₃ medan utsläppen är högre för A₁ och A₄. De stationära cyklarna (A₄) har en marginellt högre stapel än elnätets.



Figur 17. Emissionsfaktorn under 25 år för de olika alternativen med kombinerade energikällor.

3.2.2 Säkerhet

Resultat kring graden av säkerhet från respektive alternativ beslutades under ett möte i samarbete med handledarna G. Larsson, SLU och D. Berg, Uppsala kommun. Resonemanget led följande. Respektive kombination av energikällor utvärderas utifrån samlad data i bakgrundsdelen kring både brandrisk, elektriska risker samt hälsorisker.

Solceller på dansbanans tak i kombination med vätgas (A_1) bedömdes skapa störst säkerhetsrisker, främst på grund av den mängd vätgas som krävs för att lagra sol elen. Lagring av överproducerad solel hade krävt byten i mars, september, oktober och november. Regelbundna byten av de tunga cylindrarna, som väger 69 kg styck, hade skapat en stor brand- och explosionsrisk såväl som ergonomiska hälsorisker. Trots att elektricitet säkert kan utvinnas med hjälp av försiktighetsåtgärder är vätgasen i förhållande till solcellerna och de stationära cyklarna det alternativ med störst säkerhetsrisker.

Säkerheten kring solceller i kombination med elnät (A_2) bedömdes vara relativt hög, men inte riskfri. Då modulerna är placerade med en 33° lutning kan snö ansamlas och regn impregnera modulen vid kalla väderförhållanden. Detta skapar en risk för brand- och stötar. Störst risker kring hälsoaspekter bedömdes uppstå vid installation, men väl i drift vara relativt lindriga. Solceller har även den lägsta dödstalen per TWh elektricitet jämfört med andra vanligt förekommande energikällor och det kräver ingen prövning enligt miljöbalken för en installation.

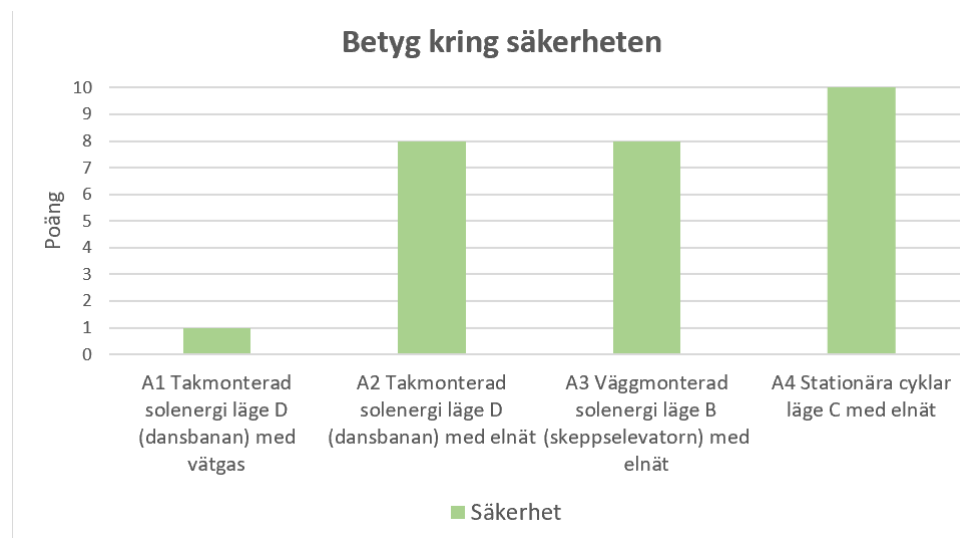
Liknande resonemang applicerades för de vertikala solcellerna på skeppselevatoren i kombination med elnätet, A_3 . Inget underlag hittades eller undersöktes vidare kring om faktumet att de är väggmonterade eller takmonterade påverkade säkerheten.

Säkerhetsrisker kring en cykel med generator (A_4) bedömdes vara låg. Störst risk ansågs uppstå om cyklarna installerades fel, vilket ansågs vara av låg risk. Då cyklarna är stationära försvinner hälsorisker kring fall och kollisioner.

De stationära cyklarna med elnätet (A₄) ansågs skapa minst säkerhetsrisker av alla alternativen. Säkerheten kring A₂ och A₃ bedömdes således i förhållande till de stationära cyklarna (A₄) med högst säkerhet och solcellerna med vätgas (A₁) med lägst säkerhet utefter brandrisk, elektriska risker samt hälsorisker, se tabell 7 och figur 18.

Tabell 7. Poängsättning av social aspekt kring respektive alternativ

Social	Säkerhet
A ₁	1
A ₂	8
A ₃	8
A ₄	10

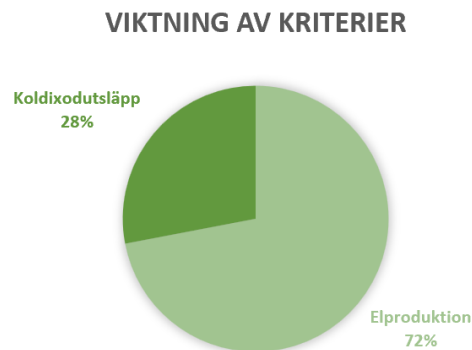


Figur 18. Betygsättning och poäng av säkerhet.

3.3 Viktning av kriterier

Säkerhet valdes att inte tilldelas ett viktningsvärde, då det anses vara en grund förutsättning. Övriga kriterier tilldelades följande viktningsvärden, se figur 19, med följande resonemang.

En energikälla E_x kan ha låga koldioxidutsläpp men simultant ha låg elproduktion. Att energikällan i sig har låga koldioxidutsläpp väger dock inte tungt om den inte kan fylla sin grundfunktion, att driva barriären. Detta eftersom den el som E_x inte producerar kommer ersättas med el från elnätet, vilket indirekt kan ge ännu mer koldioxidutsläpp.



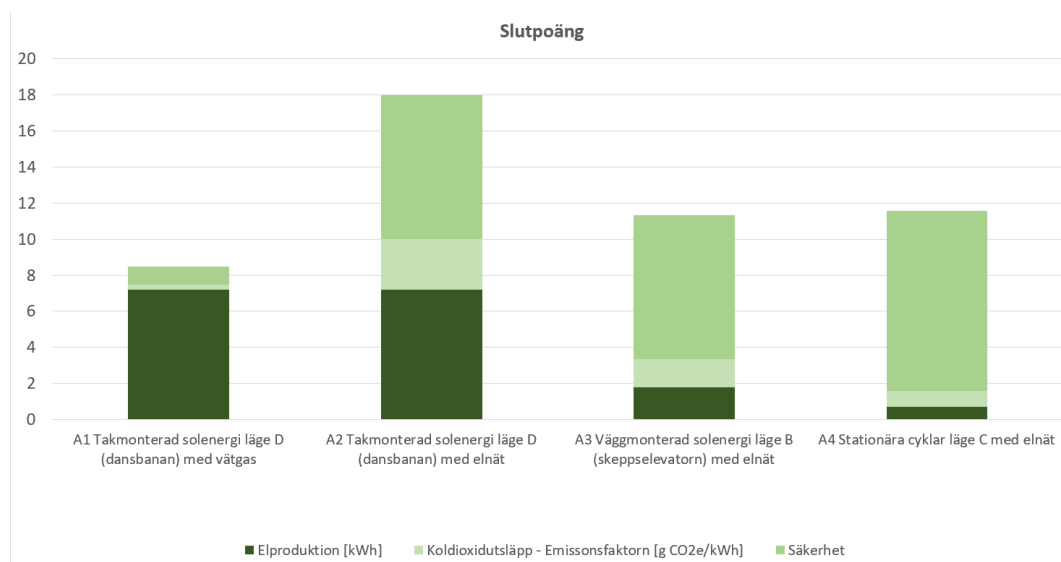
Figur 19. Viktning av kriterier.

3.4 Multikriterieanalys

Resultat med slutpoäng och rangordning från multikriterieanalysen, se tabell 8 och figur 20.

Tabell 8. Multikriterieanalysmatrisen med slutpoäng och rangordning av de olika alternativen.

Kriterier	Data typ	Viktning	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Drifttid [år]						
25						
Teknisk						
Elproduktion [kWh/år]	Kvantitativ	72%	10	10	2,5	1
Miljömessig						
Koldioxidutsläpp - Emissionsfaktorn [g CO ₂ e/kWh]	Kvantitativ	28%	1	10	5,5	3,1
Social						
Säkerhet	Kvalitativ		1	8	8	10
Slutpoäng			8,5	18,0	11,3	11,6
Rangordning			4	1	3	2



Figur 20. Slutpoäng och rangordning av de olika alternativen.

3.5 Känslighetsanalys

3.5.1 Ändring av drifttid

Resultaten är förutsatt att alternativen är i kontinuerlig drift under avsatta månader i 25 år. Rangordningen av den mest lämpade energikällan blev oförändrad med både minskad och ökad drifttid för alla alternativen.

Med minskad drifttid minskade elproduktionen medan emissionsfaktorerna ökade för alla alternativ. Med ökad drifttid ökade elproduktionen medan emissionsfaktorerna minskade. Vid 10 års drifttid var emissionsfaktorn lägre än elnätets för endast A₃. Vid 20 års drifttid var de lägre än elnätet för även A₂ och vid 30 år även för A₁. Trots att emissionsfaktorn även minskade för A₄, var detta de alternativ som inte fick lägre emissionsfaktor än elnätet inom detta tidsspektrum på 10-30.

Från 10-30 år minskade emissionsfaktorn mest för A₁ och minst för A₄.

3.5.2 Minskning av kompressorns effektbehov

Här blev rangordningen av den mest lämpade energikällan ändrat med ett minskat effektbehov för kompressorn. A₂ är fortfarande mest lämpad och A₁ är minst lämpad, men nu kom istället A₃ på andra plats och A₄ på tredje plats. Skillnaden i dess poäng är endast en decimal. Elbehovet minskade för att driva kompressorn, vilket resulterade i att mindre el behöver kompletteras från elnätet eller med vätgaslagring för alla alternativen. För A₁ och A₂ krävdes inte längre stöd från elnätet i mars och september månad. Utöver det krävs en total mängd på sex vätgascylindrar istället för det tidigare värdet på 10 för A₁, där två krävs i oktober och fyra i november. Det minskade effektbehovet för kompressorn skapade även en lite mindre emissionsfaktor för alla alternativen förutom A₄ som ökade med 0,49 g CO₂/kWh. Detta gjorde att de stationära cyklarna A₄ fick en decimal mindre poäng än A₃ i slutpoäng.

3.5.3 Resultat med samma viktningsvärden

Viktningen förändrar inte resultatets data i sig för de olika alternativen, men de påverkar dess slutpoäng och rangordningen. A₂ bibehöll sin första plats, men nu med större marginal. Detsamma gällde för A₁ som fortfarande fick minst poäng.

A₃ och A₄ bytte däremot plats. Nu blev de väggmonterade solcellerna på skeppselevatoren på andra plats medan de stationära cyklarna kom på tredje plats.

4. Diskussion

4.1 Diskussion av resultat

Resultatet visar hur ingen energikälla ensam har kapaciteten att skapa en självförsörjning av energi och driva bubbelbarriären året om, utan alla behöver kombineras med elnätet eller varandra. Resultatet visade både med och utan ändrade parametrar i känslighetsanalysen att solceller på dansbanans tak i kombination med elnätet (A_2) är det mest lämpade alternativet att driva bubbelbarriären utifrån de valda kriterierna. Det får lägst emissionsfaktor, högst elproduktion och en förhållandevis hög säkerhet. En ytterligare fördel för de takmonterade solcellerna på dansbanan är att de producerar en stor del överproducerad energi, vilket skapar en möjlighet att sälja överskottselen till Uppsala elnät. Solcellernas maximala produktion ligger även i linje med när barriären är i drift, och när produktionen är som lägst på vintern är även barriären avstängd.

Resultatet visar på hur de stationära cyklarna tillsammans med elnätet (A_4) är det andra mest lämpade alternativet. De stationära cyklarna i sig producerar minst elektricitet av samtliga energikällor, men då dess klimatavtryck är lågt och dess säkerhet hög får de i kombination med elnätet ett högt slutbetyg.

Tillämpning av en eller flera stationära cyklar kan utöver detta vara fördelaktig då det främjar fysisk aktivitet, kräver lågt underhåll och skapas en innovation lösning att producera energi. Stationära cyklar som är tillgängliga för allmänheten kan också skapa mer jämlika möjligheter till fysisk aktivitet och med ökad motion bidra till en ökad folkhälsa i kommunen. Genom att aktivt bidra till att driva barriären kan privatpersoner även potentiellt känna en ökad meningsfullhet med sin insats.

För att återkoppla till aspekten kring att belysa nedskräpningsproblemet och syftet med bubbelbarriären kan användning av cyklarna eventuellt ha en fördelaktig effekt då detta engagerar användarna. Eftersom fem cyklar uppskattas användas 30-120 minuter per dag, överstiger detta tiden människor passerar och således interagerar med solcellerna. Denna längre interaktionstid kan potentiellt öka möjligheten för att en användare informeras kring nedskräpningsproblemet och förstår vikten av att ta itu med det.

De väggmonterade solpanelerna på skeppselevatorn (A_3) kom på en tredje plats i rangordningen till mest lämpad energikälla. Slutpoängen skiljde sig dock bara med tre decimaler mellan A_3 och A_4 .

Solenergi i kombination med vätgaslagringen visade sig vara de minst lämpade alternativet (A_1). Att A_1 blev sist i rangordningen berodde främst på dess låga säkerhetsbedömning samt dess höga emissionsfaktor. Klimatnyttan visade sig vara negativ i jämförelse med det befintliga systemet på grund av att tillverkningen av solpanelerna, vätgascylindrarna, bränslecellen och vätgasen frigör mer koldioxidutsläpp än vad de hinner kompensera för under en 25-årsperiod. Vätgaslagring skulle potentiellt göra att Uppsala kommun hamnar i framkant inom den teknologiska utvecklingen, men visar sig i detta projekt vara det minst lämpade alternativet.

Emissionsfaktorerna varierar beroende på om respektive energikälla studeras separat, se figur 16, eller i kombination med varandra eller elnätet, se figur 17.

När energikällor som stationära cyklar och vätgaslagring kombineras med elnätet eller solenergi, minskar deras emissionsfaktorer. Eftersom vätgaslagring (E_4) och de stationära cyklarna (E_3) inte kan producera så mycket elektricitet på egen hand, blir deras gram koldioxidutsläpp per producerad kWh hög. När de istället kombineras med solenergi (A_1) respektive elnätet (A_4) blir dess emissionsfaktorer betydligt lägre. A_1 får främst ett lägre koldioxidutsläpp då detta alternativ kräver mindre vätgas och färre vätgascylindrar än om kompressorn bara skulle drivas med hjälp av vätgaslagring (E_4). Elproduktion är dock relativ till hur många gånger vätgascylindrarna byts ut per månad för E_4 . Om fler byten utfördes per månad blir således elproduktion högre och emissionsfaktorn mindre.

För E_1 och E_2 gäller det motsatta. När de kombineras med elnätet i A_2 och A_3 ökar deras klimatavtryck, men utan elnätet kan de inte driva kompressorn året om.

Både figur 16 och 17 är således relevanta att studera för en ökad förståelse av energisystemens koldioxidutsläpp i förhållande till dess elproduktion.

4.1.1 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen påverkade inte rangordningen för A_2 på första plats och A_1 på sista plats, men de ändrade parametrarna gjorde att lämpligheten mellan A_3 och A_4 varierade. De väggmonterade solcellerna producerar mer el än de stationära cyklarna, har lägre emissionsfaktor men fick högre slutpoäng på grund av dess högre säkerhet och viktningsvärden. Utan viktning i känslighetsanalysen bytte A_3 och A_4 plats i sin rangordning, eftersom A_3 mindre emissionsfaktor och högre elproduktion då fick större inverkan på slutpoängen.

Känslighetsanalysen visade också på hur effekten för att driva kompressorn påverkar rangordningen mellan A₃ och A₄. En lägre motoreffekt skapar ett mindre energibehov för att driva kompressorn. Om motoreffekten låg på 75 % hela tiden vore A₄ det andra mest lämpade alternativet, men om effekten gick ner till 50% är A₃ mer lämplig. Detta berodde på att mindre el behövde kompletteras från elnätet vilket påverkade emissionsfaktorerna. Både elproduktionen och koldioxidutsläppen minskade, men i förhållande till varandra blev emissionsfaktor för A₃ mindre medan A₄ blev högre. Resultatet kan således variera här beroende på hur mycket motoreffekt som krävs för att driva barriären under ett år.

När drifttiden ändrades i känslighetsanalysen påverkades inte rangordningen av den mest lämpade energikällan. Vad som gick att tolka från analysen är dock hur klimatnyttan för den mest lämpade energikällan A₂ först nås efter 10 år, och hur alla alternativens klimatnytta minskade ju längre systemen är i drift.

4.2 Osäkerheter

Samtliga energikällor förutsätter att givna lägen i området får tillämpas. För att implementera något av alternativen krävs tillstånd att tillämpa marken eller byggnaden i fråga.

Eftersom solenergi är en intermittent energikälla kan även given data kring horisontell bestrålning skilja sig från verkligheten, vilket påverkar resultatet kring elproduktion. Studien har förutsatt att väderförhållandena är desamma för alla 25 åren, vilket inte stämmer i praktiken. Standardavvikelsen har därför angetts för att demonstrera hur bestrålningen kan variera från år till år. Resultatet är således inte exakt utan beror på föränderliga väderförhållanden, men det demonstrerar hur en genomsnittlig elproduktion kan se ut baserat på väderförhållanden från åren 2005-2020.

Resultatet av studien visar att solcellerna på dansbanan har potential att generera mer el än vad som behövs för att driva kompressorn under flera månaders tid. Detta skapar en möjlighet att sälja överskottselen till elnätet. Viktigt att notera är dock att detta överskott främst produceras under dagtid medan produktionen under natten är begränsad, se figur 14 och 15. För att realistiskt implementera solceller krävs således ett batteri, eventuellt ett litiumbatteri, solcells batteri, eller stöd från elnätet under nattid. För att kompensera för denna produktionsavvikelse kan överskottet av el som genereras under dagtid säljas till elnätet, medan en liten mängd el köps under nattid.

På så vis kan solcellerna fortsatt leverera mer el än vad som förbrukas till elnätet, men vid elbrist från solcellerna kan kompressorn drivas av el från elnätet. Resultatet blir ändå nettopositivt, eftersom mer el säljs än vad som tas från nätet och självförsörjningen på energi blir större. Detta gör det möjligt att generera en ekonomisk vinning samtidigt som man bidrar till en mer hållbar energiproduktion.

På likande vis finns en osäkerhet kring de stationära cyklarnas elproduktion. Resultatet förutsätter att användare brukar cyklarna en viss mängd varje månad. Hur mycket cyklarna kommer tillämpas är endast uppskattat och är går inte att förutsäga exakt.

4.2.1 Multikriterieanalys som metod

Vad som är mest hållbart och inte är en komplex fråga och handlar inte bara om miljö och klimat. Aspekter såsom välfärd och ekonomi spelar en viktig faktor i fråga om hållbarhet. Beroende på val av kriterier kan även resultatet kring vad som är hållbart skifta. Ett alternativ kanske ger mindre koldioxidutsläpp men parallellt mer skada på ekosystem. Ett ytterligare fall skulle kunna vara att ett alternativ bidrar med ökad försurning medan ett annat bidrar med minskad biologisk mångfald. Vad som väger tyngst är en komplicerad fråga och resultatet kan variera beroende på vilken kriterier som undersöks.

Denna studie kommer således inte som ensamt verktyg kunna besvara frågan om energikällorna är hållbara eller inte då de endast undersöks utifrån tre kriterier, men studien kommer kunna fungera som ett hjälpmedel i processen att avgöra det. Tydliggörandet av dessa osäkerheter kan förhoppningsvis säkerställa bättre informerade beslutsfattare samt ett robustare och transparentare resultat.

4.3 Framtida arbete

Vid framtida expansion av studien finns det flera möjligheter att utforska vidare kring. Vid utökning av tidsram och omfattning hade en utveckling inom antalet energikällor och kriterier varit av intresse.

- Ekonomiska aspekter vid investeringar i respektive energikälla är ett exempel på ett viktigt kriterium, för att säkerställa att energikällan är realistiskt implementerbar.
- Energitillförlitlighet är ett vidare intressant kriterium för att utvärdera variationsbredden i elproduktion för respektive energikälla. En möjlighet vid fördjupning av studien är att undersöka hur resultatet påverkas vid

analys av skillnaden i bestrålning under ett dygn istället för per månad. Detta hade skapat en bättre förståelse av skillnaderna mellan dag- och nattid och dess påverkan på tillförlitligheten av solenergi och de stationära cyklarna.

- En utvärdering av olika typer av batterier som går att tillämpa för att lagra solel över natten och dess klimatpåverkan är en ytterligare intressant aspekt att utforska vidare kring.
- Att ta hänsyn till sårbarhet för klimatförändringar är ett annat viktigt kriterium för att undersöka hur respektive energikälla påverkas av yttre faktorer som förändrade väderförhållanden över tid.
- För att uppnå en ökad förståelse av kompressorns varierande effektbehov under året är det av intresse att analysera vattenflödet i Fyrisån. Genom att studera vattenflödet kan effektbehovets variation över tid ge en mer precis uppskattning av elbehovet per månad, istället för att använda det maximala effektbehovet. Då motoreffekten som krävs för att driva barriären varierar mellan 50-75%, understryks vikten av att analysera kompressorns effektbehov under olika årstider för att uppnå en mer djupgående förståelse av systemet.
- Frågan kring hur emissionsfaktorn hade påverkats för de stationära cyklarna om studien hade beaktat de ökade koldioxidutsläppen som kan uppstå vid ökad matkonsumtion vilket skapas vid ökad förbränning vore intressant att undersöka.
- Vidare pedagogiska metoder för att öka medvetenheten kring nedskräpning och bubbelbarriärens syfte är också av intresse att analysera.
- Till sist hade valet av material och dess inverkan på resultatet varit intressant att studera. Exempelvis valet av solpaneler, med potentiellt högre verkningsgrad eller lägre tillverkningsutsläpp.

5. Slutsats

Studien i sig ger en god vägledning för fortsatt arbete kring både solceller och de stationära cyklarna. Studien ger inte tillräckligt med underlag för realistisk implementation, men skapar ett bra beslutsunderlag för framtida implementering och vidare undersökning.

Slutsatsen är att ingen av de analyserade energikällorna på de givna områdena kan skapa en självförsörjning av energi utan att kombineras med elnätet eller med varandra. Utifrån studiens avgränsningar och de valda kriterierna är takmonterade solceller på dansbanan i kombination med elnätet (A_2) det mest lämpade alternativet för att driva bubbelbarriären. Därefter de stationära cyklarna i kombination med elnät (A_4) och sedan den väggmonterade solenergin på skeppselevatoren i kombination med elnät (A_3). De små marginalerna emellan A_3 och A_4 både med och utan ändrade parametrar i känslighetsanalysen antyder att de båda är relativt likvärdiga i dess lämplighetsbedömning. Vid undersökning av vätagaslagring kan slutsatsen dras att det troligen är ett smartare alternativ i storskaliga projekt, och till platser som saknar eller har brist på el förbindelser.

6. Referenser

- Abdallah Abou-Taouk (Ph.D in Applied Mechanics & technical Quotation/Application Engineer) (2023). Nilsson Energy AB. [Personlig kommunikation] [2023-03-29]
- Amaya, J. (u.å.). *PEDALKRAFT SYSTEM*. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:715963/FULLTEXT01.pdf> [2023-03-29]
- Asam, Z.-Z., Poulsen, T.G., Nizami, A.-S., Rafique, R., Kiely, G. & Murphy, J.D. (2011). *How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants?* Applied Energy, 88 (6), 2013–2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.036>
- Berg David (Projektledare Renhållning) (2023). Statsbyggnadsförvaltningen Uppsala kommun. [Personlig kommunikation] [2023-03-24]
- Bosch, R. & Fuses Navarra, V. (u.å.). *The water trompe or the Pyrenees Trompe. Recovery of the functional principle for pumping applications. Approximation by using electromagnetic equations*. <http://aedie.org/11chlie-papers/RESUMEN/248-Bosch-summary.pdf> [2023-05-29]
- Brandskyddsföreningen (u.å.a). *Solceller*. <https://www.brandskyddsforeningen.se/brandsakerhet-i-hemmet/solceller/> [2023-04-17]
- Brandskyddsföreningen (u.å.b). *Vätgas*. <https://www.brandskyddsforeningen.se/brandsakerhet/vatgas/> [2023-04-28]
- Buško, K. (2005). *Power output and mechanical efficiency of human muscle in maximal cycle ergometer efforts at different pedalling rates*. Biology of Sport, 22, 35–51
- Bäcknert, H. & Rydén, P. (2019). *Navmotor som generator* <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1022693/FULLTEXT01.pdf> [2023-03-28]
- Chen, C., Jiao, F., Lu, B., Liu, T., Liu, Q. & Jin, H. (2023). *Challenges and perspectives for solar fuel production from water/carbon dioxide with thermochemical cycles*. Carbon Neutrality, 2 (1). <https://doi.org/10.1007/s43979-023-00048-6>
- Clerici, A. & Alimonti, G. (2014). *World energy resources*. EPJ Web of Conferences. https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2015/17/epjconf_eps-sif_01001.pdf
- Dodds, P.E., Staffell, I., Hawkes, A.D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W. & Ekins, P. (2015). *Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review*. International Journal of Hydrogen Energy, 40 (5), 2065–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>
- Dodgson J, Spackman M (2000). *Multi criteria analysis: A manual*. https://eprints.lse.ac.uk/12761/1/Multi-criteria_Analysis.pdf

- Ekholm, T. (u.å.). *Inget kraftverk i Fyrisån*.
<https://www.energinyheter.se/20190805/4831/inget-kraftverk-i-fyrisan> [2023-03-17]
- Energigas (2023). *Vad är biogas?* Energigas Sverige. <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/vad-ar-biogas/> [2023-03-28]
- Energimarknadsbyrån (u.å.). *Värmevärden och gaskostnader*. Energimarknadsbyrån.
<http://www.energimarknadsbyran.se/gas/dina-avtal-och-kostnader/varmevarden-och-gaskostnader/> [2023-03-29]
- Energimyndigheten (u.å.a). *Hur mycket energi krävs för att tillverka en cykel?*
<https://www.energimyndigheten.se/arkiv-for-resultat/Resultat/hur-mycket-energi-kravs-for-att-tillverka-en-cykel/> [2023-04-15]
- Energimyndigheten (u.å.b). *Olika typer av solceller*. Energimyndigheten.
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/olika-typer-av-solceller/> [2023-04-03]
- Energimyndigheten (u.å.c). *Solceller*.
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solenergi/solceller/> [2023-03-14]
- Energimyndigheten (u.å.e). *Solcellers miljöpåverkan*.
<https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/lar-dig-mer-om-solceller/solcellers-miljopaverkan/> [2023-04-13]
- Energimyndigheten (u.å.f). *Vätgas*. <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/vatgas/> [2023-04-15]
- Engholm, N. & Johansson, T. (2021). *Solceller som integrerat fasadmaterial*.
<http://kau.diva-portal.org/smash/get/diva2:1618586/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-26]
- Engineeringtoolbox (u.å.). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*.
https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html [2023-04-03]
- Eskandari, M., Homaei, M. & Mahmodi, S. (2012). *An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural area*. Waste Management (New York, N.Y.), 32 (8), 1528–1538.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.014>
- European Commission (u.å.). *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [2023-03-28]
- Floberg, E. & Grundel Sörensson, K. (2021). *Utredning av bränsleceller*.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1706158/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-15]
- Folkhälsomyndigheten (u.å.). *Friluftsliv — Folkhälsomyndigheten*.
<https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/friluftsliv/> [2023-03-29]
- Ghosh, S. & Ghosh, B. (2020). *Fossil Fuel Consumption Trend and Global Warming Scenario: Energy Overview*. Global Journal of Engineering Sciences, 5, 1–5.
<https://doi.org/10.33552/GJES.2020.05.000606>

- Ghosh, T., Kim, H.C., De Kleine, R., Wallington, T.J. & Bakshi, B.R. (2021). *Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of using carbon fiber reinforced polymers in automotive components: Front subframe case study*. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, e00263.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00263>
- HemSol (2022). *Så mycket solceller behöver man: Dimensionering & storlek*.
<https://hemsol.se/solceller/hur-mycket-behoover-man/> [2023-04-05]
- Hälsa (2019). *Cykelfrämjandet*. <https://cykelframjandet.se/halsa/> [2023-04-28]
- Isaksson Björn (Projektledare) (2023). BioDriv Öst. [Personlig kommunikation] [2023-03-27]
- Jansson, A. (2009). *Kolfiber eller aluminium – två HT i jämförande test*.
<https://happyride.se/kolfiber-eller-aluminium-%e2%80%93-tva-ht-i-jamforande-test/> [2023-04-15]
- Kamm, P. (u.å.). Den framtida energiförsörjningen ur ett miljömässigt och säkerhetspolitiskt perspektiv. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1697827/FULLTEXT01.pdf>
- Kim, S., An, J., Choi, H. & Hong, T. (2023). *Assessment the technical and economic performance of a window-integrated PV system using third-generation PV panels*. *Energy and Buildings*, 286.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112978>
- Kindbom, K. & Gustafsson, T. (2017). *Känslighetsanalys som verktyg i arbetet med utsläppsprognoser*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1549699/FULLTEXT01.pdf> [2023-05-04]
- Kinnunen, A. & Ljungemyr, E. (u.å.). *Modell för energiåtgång vid cykling*. KTH, utgivare och konst. [2023-04-03]
- Kristoffersson, J., Muyingo, H., Klintberg, T. & Sommerfeldt, N. (u.å.). *Solceller ur flera perspektiv*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:917865/FULLTEXT02.pdf> [2023-05-30]
- Lantmäteriet (2023) Uppsala Kungsängen 1:2. SWEREF 99 TM, N 6637848, E 648220, WGS84, 59°51'5.9"N 17°38'45.4"E, Höjd 3 m ö.h. Flygfoto [Kartografiskt material] <https://minkarta.lantmateriet.se> [2023-04-04]
- Miljöfordonsverige (u.å.). *Vätgas och snabbladdning i Uppsala*. www.miljofordonsverige.se. <https://miljofordonsverige.se/nyheter/vatgas-och-snabbladdning-i-uppsala/> [2023-03-29]
- Naturskyddsföreningen (u.å.a). *Hur fungerar vätgas?* Naturskyddsföreningen.
<https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/hur-fungerar-vatgas/> [2023-03-29]
- Naturskyddsföreningen (u.å.b). Vanliga frågor om solceller och solenergi - Naturskyddsföreningen. <https://www.naturskyddsforeningen.se/artiklar/vanliga-fragor-om-solceller-och-solenergi/> [2023-04-17]
- NE (u.å.). *koldioxidekvivalent* - Uppslagsverk - NE.se.
<https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/koldioxidekvivalent> [2023-05-29]

- Nilsson, J. & Zemack, T. (2022). *Kolfiberdrev till cykel*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1678838/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-15]
- Nordén, S. (2020). *Elbilar, en livscykelanalys av två alternativa tekniker*. <http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1529210/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-15]
- Nordin Lennart (Sektionschef Biogas) (2023). Uppsala Vatten och Avfall AB. [Personlig kommunikation] [2023-03-25]
- Näsström Maskin (u.å.). *Storm 8-8-270 ES 10.0Hk 8Bar 270l/tank 1250l/min med kyltork*. https://www.nasstrommaskin.se/sv/Produktkategorier/Tryckluft/Kompressorer/Skruvkompressorer/Storm_8-8-270_ES_10_0Hk_8Bar_270l_tank_1250l_min_med_kyltork?id=STORM808270ES [2023-03-24]
- OSHA, Occupational Safety and Health Administration (u.å.). *Using Portable Generators Safely*. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3286.pdf> [2023-04-28]
- Refsgaard, K. (2006). *Process-Guided Multicriteria Analysis in Wastewater Planning*. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 24, 191–213. <https://doi.org/10.1068/c21s>
- Regeringskansliet, R. och (2020). *Agenda 2030 | Mål 7 | Hållbar energi för alla*. Regeringskansliet. [Text]. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/agenda-2030-mal-7-hallbar-energi-for-alla/> [2023-04-21]
- Rivkin, C., Burgess, R. & Buttner, W. (2015). *Hydrogen Technologies Safety Guide*. (NREL/TP--5400-60948, 1169773). <https://doi.org/10.2172/1169773>
- Singh, H., Muetze, A. & Eames, P.C. (2010). *Factors influencing the uptake of heat pump technology by the UK domestic sector*. *Renewable Energy*, 35 (4), 873–878. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.001>
- smed (u.å.). *Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export*. <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1540012/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-14]
- Stockholms dramatiska högskola (2005). *Olympic Cyclist Vs. Toaster: Can He Power It?* [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ> [2023-03-24]
- sunnytek (u.å.). *Trekantiga solpaneler och specialare | Sunnytek Solar SWEDEN AB | Allan Jansson*. <http://www.sunnytek.se/fixarsidan-for-den-som/solsaker-pdf-dokument/trekantiga-solpaneler-och/> [2023-04-05]
- Tang, D., Tan, G.-L., Li, G.-W., Liang, J.-G., Ahmad, S.M., Bahadur, A., Humayun, M., Ullah, H., Khan, A. & Bououdina, M. (2023). *State-of-the-art hydrogen generation techniques and storage methods: A critical review*. *Journal of Energy Storage*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107196>
- The Hartford (2021). *Solar Energy: Benefits and Safety Risks*. The Hartford. <https://www.thehartford.com/insights/home-workplace-safety/solar-energy-benefits-safety-risks> [2023-04-17]

- Troldborg, M., Heslop, S. & Hough, R.L. (2014). *Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1173–1184.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.160>
- Uppsala Kommun (2021a). *Hälsotips*. Uppsala kommun.
<https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/sa-arbetar-vi-med-olika-amnen/aldrevanlig-kommun/halsotips/> [2023-03-29]
- Uppsala Kommun (2021b). *Riktlinjer för solceller och solfångare*. Uppsala kommun.
<https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/publikationer/2021/riktlinjer-for-solceller-och-solfangare/> [2023-03-28]
- Uppsala Kommun (2022). *Renare Fyriså*. Uppsala kommun.
<https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/sa-arbetar-vi-med-olika-amnen/sa-arbetar-vi-med-renhallning/innovationer-matningar-och-certifieringar/renare-fyrisa/> [2023-03-27]
- Uppsala Kommun (u.å.a). *Klimat*. Miljöbarometern - Uppsala kommun.
<https://uppsala.miljobarometern.se/klimat/> [2023-04-21]
- Uppsala Kommun (u.å.b). *Så arbetar vi med: Miljö och klimat*. Uppsala kommun.
<https://www.uppsala.se/kommun-och-politik/sa-arbetar-vi-med-olika-amnen/sa-arbetar-vi-med-miljo-och-klimat/> [2023-03-27]
- Uppsala Vatten (2023). *Biogasanläggning*. [text]. <https://www.uppsalavatten.se/om-oss/vara-anlaggningar/biogasanlaggning> [2023-05-30]
- Vanky, K. (2018). *Miljökrav på solceller*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1209144/FULLTEXT01.pdf> [2023-04-05]
- Vätgas Sverige (u.å.a). *Distribution*. Vätgas Sverige. <https://vatgas.se/fakta/distribution/> [2023-03-29]
- Vätgas Sverige (u.å.b). *FAQ*. Vätgas Sverige. <https://vatgas.se/fakta/faq/> [2023-03-30]
- Our World in Data (u.å). *What are the safest and cleanest sources of energy?*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy> [2023-04-17]
- Zhu, Z. & Lu, C. (2023). *Life cycle assessment of shared electric bicycle on greenhouse gas emissions in China*. *Science of The Total Environment*, 860, 160546.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160546>

Tack

Jag vill rikta ett stort tack till David Berg på Uppsala kommun som har hjälpt mig med detta projekt samt givit mig möjligheten att arbeta med Uppsalas bubbelbarriär.

Jag vill även rikta ett stort tack till min handledare Gunnar Larsson som har hjälpt mig genom hela projektet med vägledning och råd.

Både D. Berg och G. Larsson har lagt ner mycket tid på mailkonversationer och möten kring projektet samt varit till en otrolig hjälp under min uppsats. Tack så mycket!

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. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

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.