



Datordrivna optimeringar för ökad hållbarhetsprestanda



Datordrivna optimeringar för ökad hållbarhetsprestanda

Farshid Shadram, Uppsala universitet

Johan Holmqvist, Sevda Jusufovska, Johan Larsson, IVL svenska miljöinstitut

Jani Mukkavaara, Sofia Lidelöw, Marcus Sandberg, Carolina Weinz, Shimantika Bhattacharjee, Luleå tekniska universitet



Energimyndighetens projektnummer: 2019-90058

E2B2



Förord

E2B2s vision är en resurs- och energieffektiv byggd miljö.

Bebyggelsesektorn svarar för cirka en tredjedel av Sveriges totala energianvändning och en effektivare energianvändning är en viktig del av utvecklingen av energisystemet. I E2B2 arbetar forskare och andra aktörer tillsammans för att utveckla samhällets byggande och boende och effektivisera energianvändningen.

E2B2 är ett forsknings- och innovationsprogram från Energimyndigheten där IQ Samhällsbyggnad är koordinatör. Programmets andra programperiod pågår mellan 2018 och 2021.

Syftet med E2B2 är att ta fram ny kunskap, teknik, tjänster och metoder som bidrar till en hållbar energi- och resursanvändning i bebyggelsen. Det läggs därför stor vikt vid samverkan mellan näringsliv, samhälle och akademi och programmet ska bidra till och vara ett verktyg för att länka samman behovsägare med projektutförare.

Datordrivna optimeringar för ökad hållbarhetsprestanda är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av IVL, Uppsala universitet och Luleå tekniska universitet och har genomförts i samverkan med NCC, Skanska, Kiruna bostäder och Pitebo.

Projektet har utvecklat praktiska metoder baserade på datordrivna optimeringar som gör det möjligt för projektörer, byggföretag och fastighetsägare att fatta beslut som kan förbättra byggnaders hållbarhet över hela livslängden. I projektet har även utvecklade metoder testats i ett antal fallstudier, för att ge kunskap om hur de beslut som fattas under projekteringsfasen kan påverka olika hållbarhetsmål kring energi, kostnader och CO₂-utsläpp

Uppsala, 29 December 2022

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Energimyndigheten tar ställning till framförda slutsatser, resultat eller eventuella åsikter.



Sammanfattning

I detta projekt har en datorbaserad metod utvecklats som möjliggör för byggnadsaktörer och -förvaltare att välja lösningar som minskar byggnaders energianvändning, CO₂-utsläpp och kostnader ur ett livscykelerspektiv. Testen av metoden visade på metodens tillämpbarhet för att identifiera både passiva och aktiva lösningar. Resultaten pekade på att aktiva och förnybara energieffektivitetsåtgärder spelar en viktig roll för att förbättra hållbarhetsprestandan. Detta trots att dessa åtgärder har betydligt kortare livslängd än en byggnad, vilket innebär att flera byten kan krävas vilket bidrar till ytterligare inbyggd energi och klimatpåverkan samt underhållskostnader under livslängden. När det gäller passiva energieffektivitetsåtgärder konstaterades från samtliga fallstudier att användning av (1) tjock normalpresterande isolering på taket och (2) 3-glasfönster kunde förbättra hållbarhetsprestandan ur ett livscykelerspektiv. Detta visar potentialen hos den utvecklade optimeringsmetoden att kunna fungera som ett beslutsstöd för att förbättra hållbarhetsprestandan för både nybyggnation och renovering av byggnader.

Byggnader bidrar till en betydande del av energianvändningen och utsläppen av växthusgaser globalt. Därför strävar byggnadsaktörer efter att minimera byggnaders energianvändning och CO₂-utsläpp, särskilt när de fattar beslut vid tidig projektering. Datordrivna optimeringar som maskininlärning, genetiska algoritmer och artificiell intelligens används i allt högre grad inom andra sektorer för prognoser och beslutsunderlag under projekteringsfasen. Men inom byggindustrin är arbetet med datordrivna optimeringar fortfarande i sin linda. Syften med projektet var därför att; (1) Utveckla metoder baserade på datordrivna optimeringar som möjliggör för byggaktörer att ta informerade beslut som kan förbättra hållbarhetsprestandan för nya och befintliga byggnader ur ett livscykelerspektiv och (2) Testa användbarheten av utvecklade metod i flera fallstudier av nybyggnads- och renoveringsprojekt.

Hela forskningsarbetet utfördes i samarbete med NCC, Skanska, Kirunabostäder och Pitebo. En datorbaserad metod som möjliggör optimering (minimering) av kriterierna livscykelenergi, CO₂ och livscykelkostnader utvecklades och har testats i fyra fallstudier för både nybyggnation och renovering för att söka efter optimala lösningar som kan förbättra en byggnads hållbarhetsprestanda ur ett livscykelerspektiv.

Husprojektering, husrenovering, optimering, livscykelenergi, koldioxidekvivalenter, livscykelkostnader, hållbarhet



Summary

In this project a computer driven method has been developed that enables building actors, developers and property owners to support solutions that minimize energy use, CO₂-emissions, and costs of buildings from a life cycle perspective. The tests showed the applicability of the method to identify both passive and active solutions. The results indicated that active solutions play an important role to enhance the sustainability. This is despite the fact that active solutions have a significant shorter lifespan than a building which implies that several replacements might be needed, thus increasing the embodied energy, climate impact and maintenance cost. Considering passive energy efficiency measures general conclusions from all case studies are that the use of: (1) thick normal performance insulation on the roof and (2) triple-pane windows can enhance the sustainability from a life cycle perspective. This demonstrates the potential of the developed optimization method to serve as a decision support to enhance sustainability performance of both new and retrofitting buildings.

Buildings account for a significant part of the energy use and greenhouse gas emissions globally. Therefore, building developers and property owners (the project's main stakeholders) strive to make early design decisions that minimize these impacts. Computer driven optimizations such as machine learning, genetic algorithms and artificial intelligence are increasingly being used for prognosis and decision support in other sectors. But in building sector and more specifically in building design the use of computer driven optimization is still limited. The purpose of this project was therefore to (1) develop a method based on computer driven optimizations to enable building actors to make informed decisions that can enhance the sustainability performance for new and existing buildings from a life cycle perspective and (2) Test the applicability of the developed method in multiple case studies.

The research was conducted in collaboration with NCC, Skanska, Kirunabostäder and Pitebo. A computer driven method that enables optimization (minimization) of energy use, CO₂-emissions and costs from a life cycle perspective was developed and tested in four case studies (of both new and retrofitting building projects) to support optimal solutions that could enhance the sustainability performance from a life cycle perspective.

Building design, building renovation, optimization, life cycle energy, carbon dioxide equivalents, life cycle costs, sustainability



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
1.1	BAKGRUND	7
1.2	SYFTE OCH MÅL	7
1.3	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR	8
2	GENOMFÖRANDE	9
3	RESULTAT	11
3.1	DEN UTVECKLADE OPTIMERINGSMETODEN	11
3.2	TEST AV OPTIMERINGSMETODEN I OLIKA FALLSTUDIER	12
4	DISKUSSION	18
5	SLUTSATSER	20
6	PUBLIKATIONSLISTA	21
7	REFERENSER	22



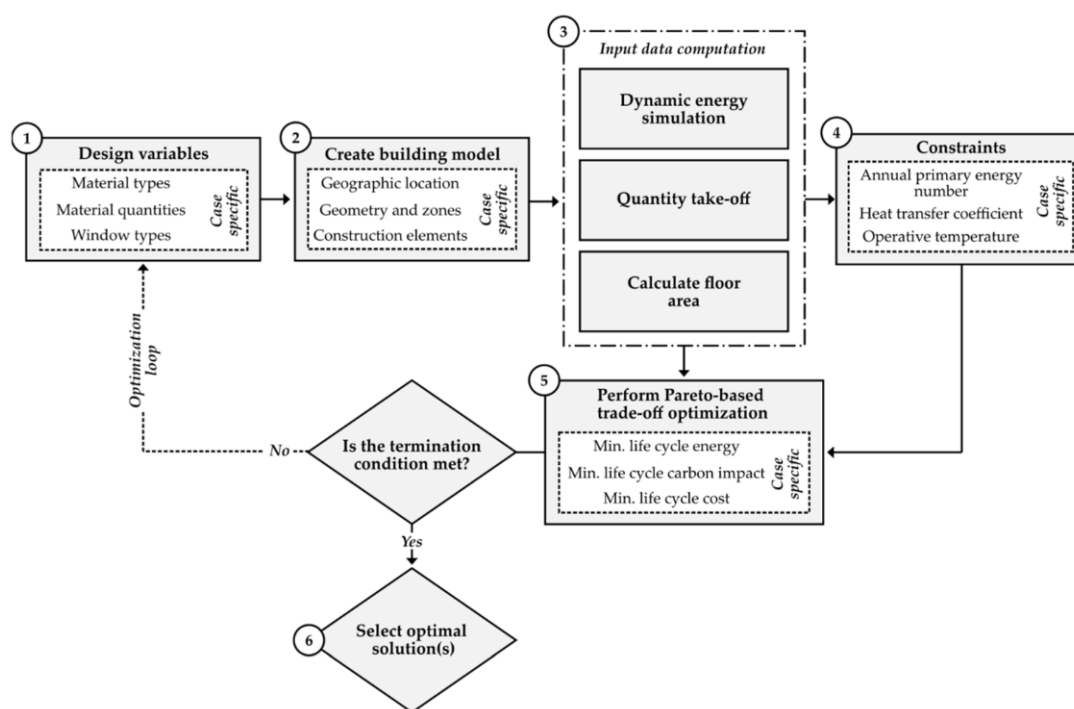
Figur 2. Fallstudier som undersöktes i forskningsprojektet: (A) nybyggt punkthus från NCC, (B) nybyggt radhus från Skanska, (C) befintligt 1980-tals bostadshus från Pitebo och (D) befintligt 1970-tals bostadshus från Kirunabostäder.



3 Resultat

3.1 Den utvecklade optimeringsmetoden

En optimeringsmetod, som hanterar flera kriterier (t.ex. minimera energi, kostnader och CO₂) för att hitta Pareto-optimala¹ lösningar som ökar byggnaders hållbarhetsprestanda, utvecklades med hjälp av programmeringsspråket Python, se figur 3.

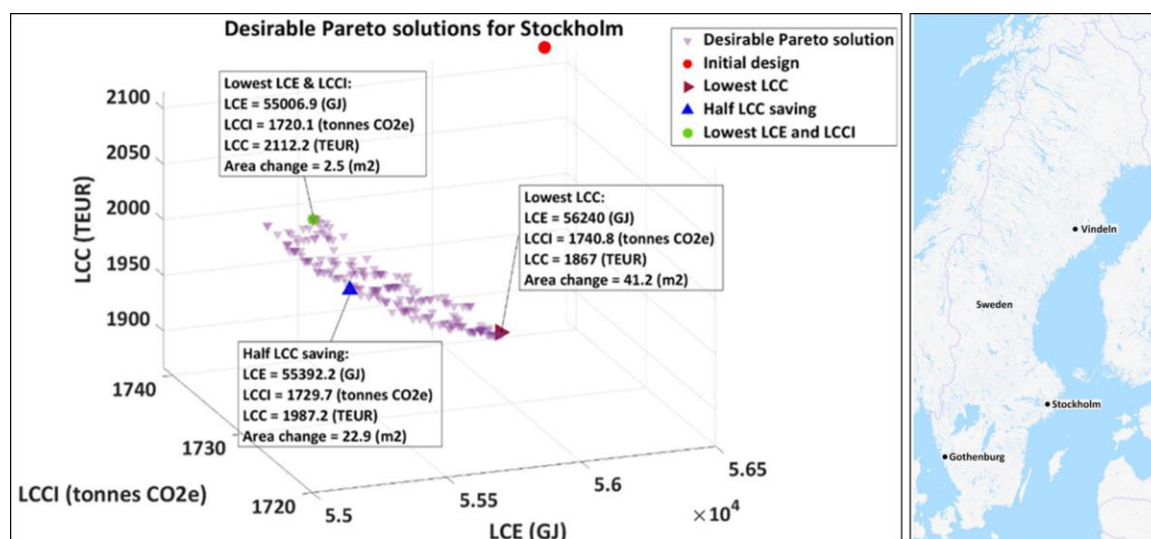


Figur 3. Utvecklade optimeringsmetoden för ökad byggnaders hållbarhetsprestanda [15].

Metoden består av sex steg:

1. I det första steget definieras de åtgärder (variabeluppsättning) som skall utvärderas. Detta beror på byggprojektet och de åtgärder som man vill studera. T.ex. för ett nybyggt projekt kan detta vara orientering av byggnaden, typ av och tjocklek för material i klimatskärmen, fönstertyper, VVS-system, förnybara energikällor, o.s.v.
2. I det andra steget sätts en representation upp av den aktuella byggnaden i form av en datormodell. Denna byggnadsmodell inkluderar byggnadens geografiska läge, geometri, zoner och byggdelar.

¹ För en lösning som är Pareto-optimal går det inte att förbättra ett mål utan att försämma ett eller flera andra mål.



Figur 4. Resultaten av hållbarhetsoptimeringen för punkthuset i Stockholm [15].

Analys av dessa Pareto-lösningar i olika städer visade att, oavsett byggnadens läge, användning av (1) tjock (670-800mm) lösull på taket och (2) måttligt tjock (120-150mm) cellplastisolering för golvet var nödvändiga för att förbättra byggnadens hållbarhetsprestanda ur ett livscykelperspektiv. Den optimala väggisoleringen var dock beroende på byggnadens läge; i platser med höga bostadspriser var utrymmet för att använda tjocka och konventionella isoleringar (mineralull/cellulosa) begränsat på grund av den betydande ekonomiska förlusten orsakad av minskning av boytan. På sådana platser var det därför mer fördelaktigt att använda tunn och högprestandaisoleringar (t.ex. PIR) i ytterväggar trots att dessa material har högre inbyggd påverkan och högre investeringskostnader jämfört med konventionella isoleringar. Detta var främst för att användningen av högprestandaisoleringar (som har lägre värmeledningsförmåga jämfört med andra isoleringar) på platser med höga bostadspriser möjliggjorde tunnare isoleringar i ytterväggarna och därmed betydande ekonomiska vinster till följd av ökad golvyta. Detta är av betydelse eftersom byggherrar ständigt letar efter lösningar som utökar den säljbara/uthyrningsbara golvytan för att maximera lönsamheten av investeringar, speciellt i stora/täta städer där bostadspriserna/hyrorna är höga och brist på tillgänglig mark kan resultera i mindre byggnadsareor.

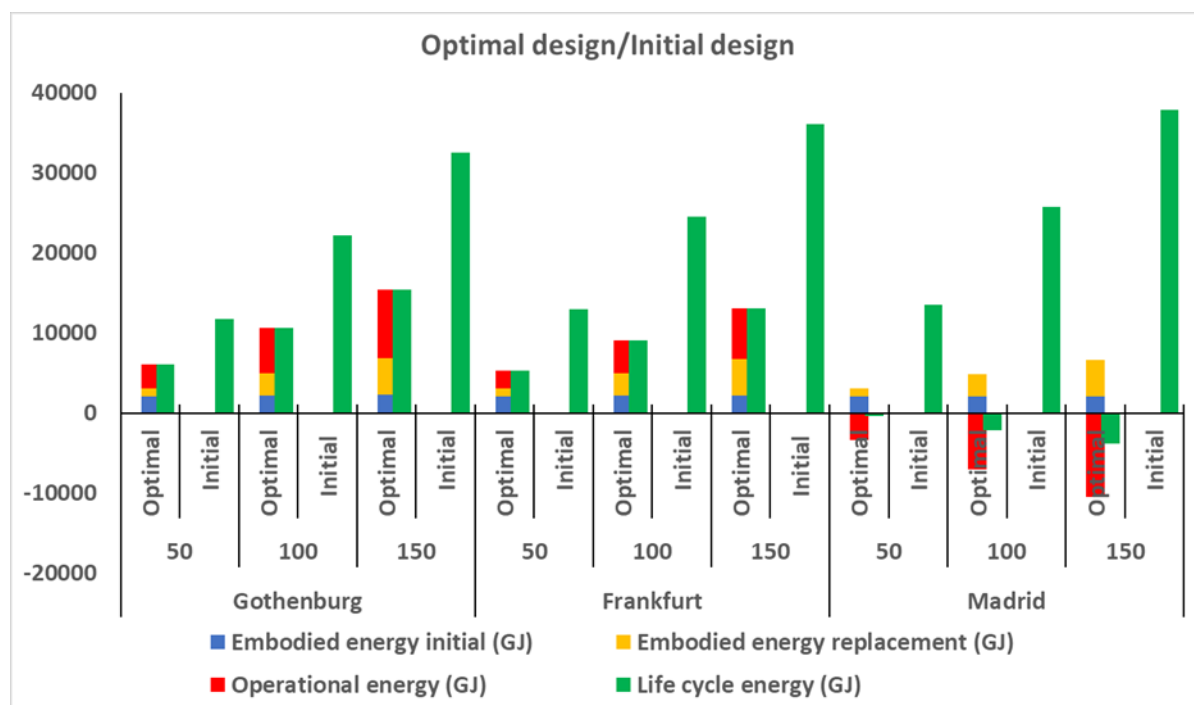
Generellt sett kunde de tre ovannämnda optimala lösningarna spara upp till 1410,7 GJ energi, 23 ton CO₂e och 248,4 TEUR kostnader ur ett livscykelperspektiv i förhållande till byggnadens ursprungliga utformning. Dessa besparingar motsvarade 6 års primärenergianvändning, 5 års klimatpåverkan respektive 40 års kostnader för uppvärmning av bostadskonceptet i dess ursprungliga utformning.

Fallstudie B: Nybyggt radhus från Skanska

Den andra fallstudien (se figur 2B) som studerades i detta projekt var en nybyggnation av fem sammanlänkade radhus under produktion i Göteborg. Denna fallstudie byggde ut den första fallstudien genom att: (1) variera byggnadens livslängd (50, 100 och 150 år) för att utforska hur byggnadens hållbarhetsprestanda påverkas utifrån olika livslängder, (2) inkludera aktiva och förnybara



energieffektiviseringsåtgärder (solcellspaneler och olika VVS system) utöver passiva åtgärder i variabeluppsättningen, och (3) utvidga studien till andra länder (Tyskland och Spanien) vid sidan av Sverige. Anledningen till att flera länder undersöktes var att utforska och jämföra potentialen hos förnybara energikällor att generera energi under olika klimatförhållanden och förstå hur detta kan bidra till att förbättra hållbarhetsprestandan hos byggnader ur ett livscykelerspektiv. Figur 5 visar energiprestanda för optimala lösningar jämfört med den ursprungliga utformningen för olika livslängder och klimatförhållanden ur ett livscykelerspektiv.



Figur 5. Livscykelenergianvändning för optimala lösningar jämfört med den ursprungliga utformningen för radhusen i Göteborg, Frankfurt och Madrid.

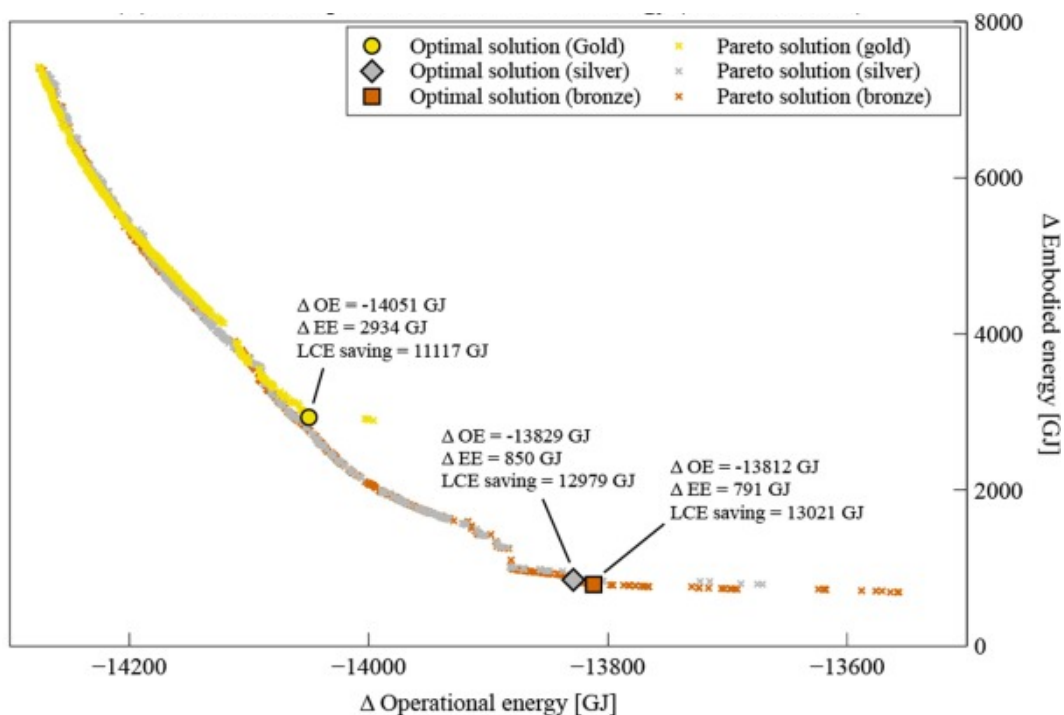
Som visas i figur 5 kan energiprestandan uppnå ett resultat som är mindre än noll ur ett livscykelerspektiv endast för radhusen i Madrid. De främsta anledningarna till detta var att: (1) fler soltimmar i Madrid ökade energiproduktionen från förnybara energikällor, och (2) byggnadens energibehov för uppvärmning och kyla i Madrid var nästan hälften av det som behövdes i Göteborg och Frankfurt. Detta visar att klimatförhållanden spelar en viktig roll för att nå det långsiktiga målet om netto nollenergi och utsläpp av växthusgaser i byggnader ur ett livscykelerspektiv. Analys av alla Pareto-optimala lösningarna i figur 5 visade att, oavsett byggnadens läge, kunde användning av (1) mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeväxlare (FTX), (2) bergvärmepump för uppvärmning och AC för kylning, (3) energieffektiva 3-glasfönster, och (4) solcellspaneler på hela taket i kombination med att rotera byggnaden 195 grader för att maximera förnybara energiproduktionen, förbättra radhusens hållbarhetsprestanda i termer av energianvändning ur ett livscykelerspektiv. Detta trots att många av de ovan nämnda aktiva energieffektiviseringsåtgärderna hade en betydligt kortare livslängd, jämfört med byggnaden, där flera byten behövdes under en byggnadens livscykel.



Fallstudie C: Befintligt flerbostadshus från 1980-talet

I den första renoveringsfallstudien studerades ett 3-våningar högt flerbostadshus (se figur 2C) ingår i ett mindre kvarter med fyra flerbostadshus byggda under andra halvan av 1980-talet i Piteå. I fallstudien utforskades hur husets livscykelenergianvändning skulle kunna påverkas av att applicera olika kombinationer av renoveringsåtgärder för att nå klassningsnivåer Brons, Silver och Guld enligt FEBY18 [16]. Den utvecklade optimeringsmetoden användes för att utforska hur en bredd av renoveringsåtgärder kan förändra husets inbyggda och operationella energianvändning. Den inbyggda energianvändningen definierades som primäre energi för att producera nya material/komponenter som tillförs vid de olika åtgärderna, medan den operationella energianvändningen definierades som primäre energi för 30 års uppvärmning och fastighetsel. Variablerna som ändrades under optimeringen var relaterade till tilläggsisolering av ytterväggar, vindbjälklag och platta på mark med olika material och tjocklekar, byte från 2- till 3-glasfönster och byte från mekanisk frånluft (F) till mekanisk till- och frånluftsventilation (FTX).

Figur 6 visar Pareto-optimala lösningar, där varje lösning (punkt i diagrammet) representerar en unik kombination av renoveringsåtgärder. Resultaten illustrerar hur den inbyggda och operationella energianvändningen förändras då olika kombinationer av renoveringsåtgärder appliceras för att nå FEBY18's tre klassningsnivåer. Renoveringsåtgärderna leder till att den inbyggda energianvändningen ökar, medan den operationella energianvändningen minskar jämfört med huset i originalutförande. Den kombination av åtgärder som leder till den största livscykelenergiebesparingen under 30 år betraktas som den optimala lösningen för varje klassningsnivå (se fetmarkerade punkter i Figur 6).



Figur 6. Resultat från optimeringen av renoveringsåtgärder för 1980-talshuset [17].

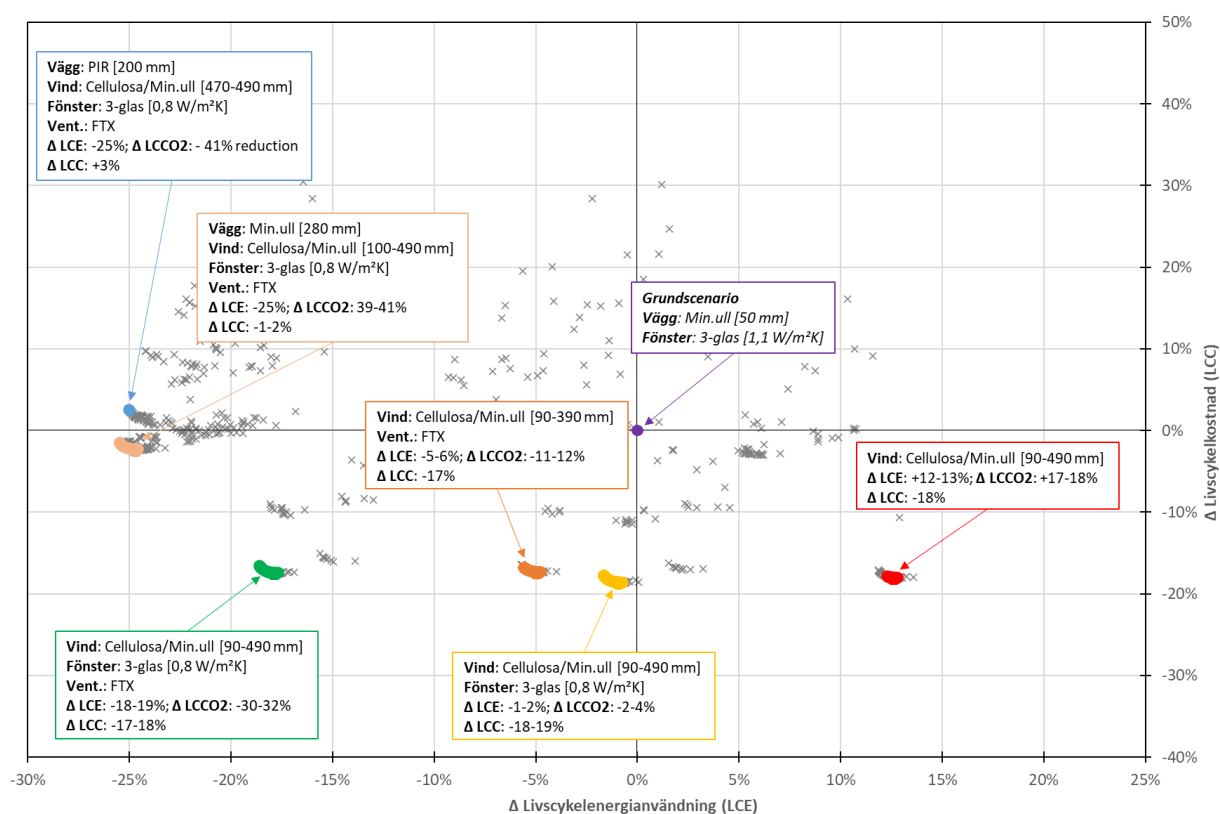


Analysen av de optimala lösningarna visade att de alla innebar byte till 3-glasfönster och FTX, samt tilläggsisolering av vindsbjälklaget med ett tjockt lager (500 mm) cellulosa och tilläggsisolering av ytterväggar vid balkonger med mineralull. Det betyder att oavsett vilken av FEBY18's klassningsnivåer som ska uppfyllas var de åtgärderna viktiga för att minimera livscykelenergianvändningen för det studerade huset. För att nå nivå Brons räckte det att kombinera dessa åtgärder med en måttlig tilläggsisolering (30 mm) av ytterväggar vid balkonger. För att nå nivå Silver och Guld krävdes dock även tilläggsisolering av platta på mark med 30 mm PIR eller VIP, samt tilläggsisolering av alla ytterväggar med mineralull för Silver eller (beroende på yttervägg) mineralull, PIR eller VIP för Guld. Trots att de ytterligare åtgärderna ledde till lägre operationell energianvändning ökade mängden inbyggd energi så mycket att den totala livscykelenergianvändningen över 30 år blev tydligt högre för den optimala lösningen för nivå Guld än för de optimala lösningarna för nivå Brons och Silver.

Fallstudie D: Befintligt flerbostadshus från 1970-talet

Den andra renoveringsfallstudien fokuserade på ett 3-våningar högt flerbostadshus byggt på 1970-talet i Kiruna (se figur 2D). Huset är en del av ett större bostadsområde, som fastighetsägaren successivt renoverar. I fallstudien utforskades hur husets hållbarhetsprestanda med avseende på energianvändning, CO₂-utsläpp och kostnader i ett livscykelperspektiv skulle kunna påverkas av att applicera olika energieffektiviseringsåtgärder. Analysperioden valdes till 30 respektive 60 år. Optimeringsmetoden användes här för att identifiera kombinationer av åtgärder som maximerar husets hållbarhetsprestanda. Variablerna som ändrades under optimeringen inkluderade tilläggsisolering av ytterväggar, vindsbjälklag och bottenbjälklag med olika material och tjocklekar, byte från 2- till 3-glasfönster och byte från självdrag (S) till mekanisk till- och frånluftsventilation (FTX). Variablerna inkluderar de åtgärder som fastighetsägaren valde att applicera – fasadbyte med 50 mm tilläggsisolering och fönsterbyte – på de första renoverade husen (här kallat grundscenariot).

Resultaten visade på ett tydligt linjärt samband mellan energianvändning och CO₂-utsläpp. Därför lades fokus på att analysera hur livscykelenergianvändning och -kostnader förändras i relation till grundscenariot då olika kombinationer av renoveringsåtgärder appliceras. Figur 7 visar resultat från optimeringen för 60 års analysperiod, där Pareto-optimala lösningar är färgmarkerade. De optimala lösningarna representerar kombinationer av åtgärder som kan minska livscykelkostnader (fjärde kvadranten), livscykelenergi/klimatpåverkan (andra kvadranten), eller både och (tredje kvadranten), jämfört med grundscenariot.



Figur 7. Resultat från optimeringen av renoveringsåtgärder för 1970-talshuset.

Analysen av de optimala lösningarna visade att det går att minimera livscykelkostnaderna genom att enbart tilläggsisolera vindsbjälklaget, men samtidigt ökade detta livscykelenergianvändningen. Minimal livscykelenergianvändning uppnåddes genom att kombinera byte till 3-glasfönster och FTX, samt tilläggsisolering av både vindsbjälklag och yttervägg. Detta kunde uppnås utan att förändra livscykelkostnaderna med mer än $\pm 3\%$. De optimala lösningar som både minskade livscykelenergianvändningen och -kostnaderna innebar byte till 3-glasfönster och/eller FTX, samt tilläggsisolering av vindsbjälklag. Däremot krävdes ingen ytterligare tilläggsisolering av ytterväggar än de 50 mm mineralull som tillämpades i grundscenariot, ingen tilläggsisolering av bottenbjälklag och ingen användning av EPS, VIP eller PIR som isolering i någon byggnadsdel. Resultat från optimeringen för 30 analysperiod pekade i samma riktning, med skillnaden att de optimala lösningarna innebar tunnare tilläggsisolering av vindsbjälklag och yttervägg än vid 60 års analysperiod.



4 Diskussion

För närvarande fokuserar många beslut som fattas vid tidig projektering på att hålla nere kostnader och minska driftenergianvändningen. För att förbättra byggnaders hållbarhetsprestanda är det dock viktigt att hitta designlösningar som minimerar energianvändning, CO₂-utsläpp och kostnader ur ett livscykelerspektiv. Tidigare studier inom andra sektorer har visat att datordrivna optimeringar kan vara ett användbart tillvägagångssätt för att förbättra olika hållbarhetsparametrar och därför syftade denna studie till att utveckla och testa en datordriven optimeringsmetod för att möjliggöra mer hållbara beslut under byggnadsdesign. Optimeringsmetoden utvecklades med hjälp av programmeringsspråket Python, där en genetisk algoritm användes för att utföra iterationer inom variabelrymden och söka efter optimala lösningar. Optimeringsmetoden testades sedan i fyra fallstudier av nybyggnation och renovering av bostadshus där resultaten visade att det är möjligt att skapa en automatiserad optimeringsprocess för att identifiera designlösningar som minimerar energianvändning, CO₂-utsläpp och kostnader ur ett livscykelerspektiv. Den utvecklade optimeringsmetoden kan därmed fungera som beslutstöd under tidig projektering för att underlätta för byggaktörer och beslutfattare att identifiera passiva och/eller aktiva åtgärder som förbättrar en byggnads hållbarhetsprestanda ur ett livscykelerspektiv.

Test av optimeringsmetoden i de fyra fallstudierna gav en bättre förståelse för vilka åtgärder som kan öka byggnaders hållbarhetsprestanda ur ett livscykelerspektiv. Exempelvis visade test av optimeringsmetoden i två fallstudier av nybyggnation att användning av passiva energieffektiviseringsåtgärder såsom (1) tjock normalpresterande isolering (t.ex. lösull) på taket och (2) måttligt tjock högpresterande isolering (t.ex. cellplast) för golvet, och (3) energieffektiva 3-glasfönster kunde förbättra hållbarhetsprestandan ur ett livscykelerspektiv, oavsett byggnadens geografiska placering. Väggisoleringen var dock beroende på byggnadens placering: på platser med höga bostadspriser var utrymmet för att använda tjock, normalpresterande isolering (mineralull/lösull) begränsat på grund av den betydande ekonomiska förlusten orsakad av minskning av boytan. När det gäller aktiva energieffektiviseringsåtgärder visade resultaten att användning av (1) mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeväxlare (FTX), (2) energieffektiva uppvärmnings- och kylsystem (t.ex. bergvärmepump och AC), och (4) solcellspaneler på hela taket i kombination med att rotera byggnaden så att panelerna vetter mot söder, kunde förbättra byggnadens hållbarhetsprestanda ur ett livscykelerspektiv, oavsett byggnadens geografiska placering. Test av optimeringsmetoden i de två renoveringsfallstudierna pekade på att en kombination av passiva åtgärder, inklusive (1) byte från 2- till 3-glasfönster, (2) tjock tilläggsisolering av vindsbjälklag med normalpresterande isolering (t.ex. cellulosa), (3) måttlig tilläggsisolering av ytterväggar med normalpresterande isolering (t.ex. mineralull), och aktiva åtgärder i form av (3) konvertering till mekanisk till- och frånluftsventilation (FTX) kan förbättra husens hållbarhetsprestanda i ett livscykelerspektiv. Däremot visade resultaten att tilläggsisolering av platta på mark ovanifrån med högpresterande isolering (t.ex. PIR eller VIP), samt ytterligare tilläggsisolering av ytterväggar inte ledde till någon förbättring av hållbarhetsprestandan i ett livscykelerspektiv i de här undersökta fallen.



Testerna visade att den utvecklade optimeringsmetoden fungerade likartat för nybyggnations- och renoveringsfall. Den största skillnaden var att man i renoveringsfall behövde ta hänsyn till att det fanns situationer där en åtgärd inte genomförs (dvs. befintlig lösning behövs). I den andra renoveringsfallstudien (fallstudie D) testades att enbart använda diskreta variabler. Detta ledde till att resultaten från optimeringen bestod av tydligare grupperingar av optimala lösningar (se figur 6) än när även kontinuerliga variabler användes (se t.ex. figur 5), vilket underlättade analysen och jämförelsen av vilka åtgärder som kan användas för att optimera olika hållbarhetsparametrar. Vidare testades i fallstudie D att definiera variabelberoenden mellan materialval och tjocklekar på isolering, vilket den genetiska algoritmen visade sig kunna hantera väl. En positiv effekt av det är att det gav möjlighet att ställa upp mer realistiska scenarion med olika maximala tjocklekar för olika isoleringsmaterial.



5 Slutsatser

I detta forskningsprojekt utvecklades en optimeringsmetod som kan stödja byggaktörer och beslutsfattare att i tidig projektering kunna fatta mer hållbara beslut. Optimeringsmetoden utvecklades med hjälp av en genetisk algoritm som möjliggör att utföra automatiska iterationer inom variabelrymden och söka efter optimala lösningar som kan förbättra en byggnads hållbarhetsprestanda med avseende på energianvändning, CO₂-utsläpp och kostnader ur ett livscykelperspektiv. Den utvecklade metoden testades i fyra olika fallstudier av nybyggnation och renovering där resultaten visade på metodens tillämpbarhet för att identifiera både passiva och aktiva lösningar som förbättrar hållbarhetsprestandan ur ett livscykelperspektiv. Resultaten pekade på att aktiva och förnybara energieffektivitetsåtgärder (mekanisk till- och frånluftsventilation med värmeväxlare (FTX), bergvärmepump, solcellspaneler) spelar en viktig roll för att förbättra hållbarhetsprestandan ur ett livscykelperspektiv. Detta trots att dessa åtgärder har betydligt kortare livslängd än en byggnad, vilket innebär att flera byten kan krävas som bidrar till ytterligare inbyggd energi och klimatpåverkan samt underhållskostnader under livslängden. När det gäller passiva energieffektivitetsåtgärder konstaterades från samtliga fallstudier att användning av (1) tjock normalpresterande isolering på taket och (2) 3-glasfönster kunde förbättra hållbarhetsprestandan ur ett livscykelperspektiv. Optimal isolering i ytterväggar var däremot beroende av typ av byggprojekt (nybyggnation eller renovering) och byggandens geografiska placering, där det i vissa fall (vid renovering) inte var hållbart med mer än en måttlig tilläggsisolering. All detta visar potentialen hos den utvecklade optimeringsmetoden att fungera som ett beslutsstöd för att förbättra hållbarhetsprestandan för olika byggprojekt och i olika läge.



6 Publikationslista

Open access-Vetenskapliga artiklar:

- Shadram, F., Bhattacharjee, S., Lidelöw, S., Mukkavaara, J., & Olofsson, T. (2020). Exploring the trade-off in life cycle energy of building retrofit through optimization. *Applied Energy*, 269, 115083. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115083>
- Mukkavaara, J., & Shadram, F. (2021). An integrated optimization and sensitivity analysis approach to support the life cycle energy trade-off in building design. *Energy and Buildings*, 253, 111529. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111529>
- Shadram, F., & Mukkavaara, J. (2022). Improving Life Cycle Sustainability and Profitability of Buildings through Optimization: A Case Study. *Buildings*, 12(4), 497. <https://doi.org/10.3390/buildings12040497>

Doktorsavhandling:

- Mukkavaara, J. (2021). *Exploration and Optimization of Building Design Solutions using Computational Design* (Doctoral dissertation, Luleå University of Technology). <http://ltu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1544058&dswid=8570>



7 Referenser

- [1] United Nations Environment Programme. Buildings and climate change: summary for decision makers. 2008.
- [2] United Nations Environment Programme. Common carbon metric for measuring energy use and reporting greenhouse gas emissions from building operations. 2009.
- [3] EU Directive. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. 2018.
- [4] Paulson Jr BC. Designing to reduce construction costs. *Journal of the Construction Division*. 1976;102(C04).
- [5] Grobler F. A practical guide to IFC or surviving in the BIM economy: What you need to know. AEC-ST, Orlando, FL. 2005.
- [6] Stephan A, Crawford RH, De Myttenaere K. A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Appl Energy*. 2013;112:23-34.
- [7] Chastas P, Theodosiou T, Bikas D. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review. *Build Environ*. 2016.
- [8] Wang Q, Holmberg S. A methodology to assess energy-demand savings and cost effectiveness of retrofitting in existing Swedish residential buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2015;14:254-266.
- [9] Lidelöv S, Örn T, Luciani A, Rizzo A. Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable cities and society*. 2018.
- [10] Gustafsson S, Karlsson BG. Life-cycle cost minimization considering retrofits in multi-family residences. *Energy and Buildings*. 1989;14(1):9-17.
- [11] Shadram F, Mukkavaara J. Exploring the effects of several energy efficiency measures on the embodied/operational energy trade-off: A case study of Swedish residential buildings. *Energy Build*. 2019;183:283-296.
- [12] Ding GKC. Sustainable construction— The role of environmental assessment tools. *Journal of environmental management*. 2008; 86(3), 451-464.
- [13] Chau C, Leung T, NG W. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*. 2015;143, pp. 395-413.
- [14] Nguyen A.T, Reiter S, Rigo P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied energy*. 2014;113, 1043-1058.
- [15] Shadram F, Mukkavaara J. Improving Life Cycle Sustainability and Profitability of Buildings through Optimization: A Case Study. *Buildings*. 2022;12(4), 497.



[16] FEBY. Kravspecifikation för energieffektiva byggnader: Bostäder och lokaler, FEBY18 (Jan 2018, kompletterad dec 2019). Forum för Energieffektivt Byggnade (FEBY). 2019

[17] Shadram F, Bhattacharjee S, Lidelöv S, Mukkavaara J, Olofsson T. Exploring the trade-off in life cycle energy of building retrofit through optimization. Applied Energy. 2020; 269, 115083.



Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 är Energimyndighetens program där IQ Samhällsbyggnad är koordinators. Läs mer på www.E2B2.se.

