UPTEC STS 26014
Examensarbete 30 hp
Juni 2026

UPPSALA
UNIVERSITET

Effekttoppsreducering av solcellsintegrerade kylsystem

En fallstudie

Louise Stensvad & Joel Åsberg

Civilingenjörsprogrammet i system i teknik och samhälle

UPPSALA UNIVERSITET

Power Peak Reduction in Solar Power Integrated Systems - A Case Study

Louise Stensvad & Joel Åsberg

Abstract

The increasing demand for cooling in commercial buildings, combined with the growing deployment of local photovoltaic (PV) systems, has highlighted the need for strategies that mitigate short-term peaks in net electrical demand. While cooling demand and solar generation correlate well on a seasonal basis, rapid fluctuations in solar irradiance generate temporary peaks in the net load that contribute to demand charges and elevated grid stress. This thesis investigates the potential for reducing such peaks through load shifting of the cooling system, utilising the building's thermal inertia as a latent flexibility resource.

The study is conducted as a case study of a commercial property in Uppsala, Sweden, equipped with two electrically driven chillers and a PV installation. Operational data with one-minute resolution from the cooling season of 2024 is used to identify the ten most heavily loaded days. The load shifting problem is formulated as a convex optimisation problem minimising the maximum net power over the day, subject to a total energy conservation constraint, and is solved for five time windows between one and fifteen minutes. To verify physical feasibility, a grey-box thermal model is calibrated against measured data and used to simulate the indoor temperature response under each optimised scenario.

The results show that load shifting consistently reduces the net power peak across all analysed days, with the average reduction increasing from 28 percent at a one-minute window to 56 percent at fifteen minutes. The simulated indoor temperature deviation remains below 0.34°C across all scenarios, well within applicable comfort limits. The economic analysis reveals, however, that the technical potential is only partially realised under the prevailing tariff structure, since the power company's demand charge is based on hourly averages. Measurable economic savings are obtained only at longer time windows, amounting to approximately one thousand SEK over the summer period. The study thereby identifies a structural discrepancy between the technical and economic load shifting potential and contributes to the discussion of how future tariff structures may better reflect the flexibility inherent in buildings' thermal inertia.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala

Handledare: Nils Rosengren Ämnesgranskare: Jonathan Staaf Scragg

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

Energianvändningen för kyla i kommersiella byggnader har ökat påtagligt under de senaste decennierna, vilket är en följd av ett varmare klimat, ökade interna värmelaster från elektronisk utrusning samt höjda komfortkrav. Samtidigt har installationen av solcellsanläggningar ökat i takt med ökad efterfrågan på energineutrala byggnader. Dessa två utvecklingar är på en övergripande nivå komplementära då kylbehov ofta korrelerar med solinstrålning. På kortare tidsskalor kan dock obalanser uppstå. Snabba variationer i solinstrålning, till följd av varierande väderförhållanden, ger upphov till kortvariga toppar i fastighetens nettoeffektuttag från elnätet. Dessa variationer belastar elnätet och resulterar i ökade kostnader genom effekttariffer.

Denna studie undersöker hur lastförskjutning kan användas för att reducera effekttoppar i solcellsintegrerade kylsystem. Detta innebär att tidsmässigt omfördela kylsystemets effektuttag för att bättre överensstämma med solcellsproduktionen, utan att förändra den totala kylproduktionen. En hypotes i studien är att byggnadens termiska tröghet utgör en resurs som kan utnyttjas systematiskt för att skapa flexibilitet. Denna flexibilitet representeras av ett tidsfönster där kylproduktionen kan förskjutas.

Studien genomförs som en fallstudie av en kommersiell fastighet i Uppsala utrustad med två eldrivna kylmaskiner och en solcellsanläggning. Driftdata med minutupplösning från sommaren 2024 ligger till grund för identifiering av de tio mest belastade dygnen, vilka utgör studiens analysdagar. Lastförskjutningsproblemet formuleras som ett konvext optimeringsproblem med målet att minimera den maximala nettoeffekten över dygnet, under villkoret att den totala kylenergin bevaras. Optimeringen utförs för fem tidsfönster mellan 1 och 15 minuter, vilket möjliggör en systematisk undersökning av hur reduktionspotentialen beror på tillgänglig flexibilitet. För att verifiera att de simulerade lastförskjutningarna är fysikaliskt realiserbara utvecklas en termodynamisk modell. Modellen kalibreras mot uppmätt driftdata och används för att kontrollera att inomhustemperaturen inte överskrider gällande komfortgränser i något optimeringsscenario.

Resultaten visar att lastförskjutningen reducerar nettoeffektens topp för samtliga analysdagar och att reduktionspotentialen ökar konsekvent med tidsfönstrets storlek. Den genomsnittliga reduktionen varierar från 28 procent vid ett tidsfönster på 1 minut till 56 procent vid 15 minuter, med betydande variation mellan dagarna beroende på topparnas tidsmässiga struktur. Relaterat till kylsystemets ursprungliga effekttopp, det vill säga utan solcellernas bidrag, uppgår den kombinerade reduktionen till mellan 48 och 69 procent. Den termodynamiska verifieringen visar att den maximala temperaturavvikelsen uppgår till 0,34°C vid det mest extrema scenariot, vilket bekräftar att de undersökta förskjutningarna ligger inom byggnadens termiska tröghetsmarginal.

Den ekonomiska analysen visar dock att den tekniska potentialen endast delvis kan realiseras

inom rådande tariffstruktur. Eftersom Vattenfalls effekttariff baseras på timmedelvärden får minutbaserad omfördelning av last begränsad ekonomisk effekt. Vid tidsfönster på 1 till 5 minuter erhålls ingen mätbar ekonomisk besparing, och först vid 10 till 15 minuter uppstår en marginell positiv effekt motsvarande knappt 1000 kronor för hela sommarperioden.

Studien identifierar därmed en strukturell skillnad mellan teknisk och ekonomisk lastförskjutningspotential. Resultaten ger ett kvantitativt underlag för fastighetsägarens bedömning av driftoptimering av solcellsintegrerade kylsystem. Dessutom bidrar den till en bredare diskussion om hur framtida tariffstrukturer kan utformas för att bättre reflektera den flexibilitet som finns inbyggd i existerande byggnaders termiska tröghet.

Innehåll

1. Inledning **6**

1.1. Syfte och forskningsfrågor . . . 7
1.2. Avgränsningar och begränsningar . . . 7
1.3. Initiala hypoteser och antaganden . . . 9
1.4. Disposition . . . 9

2. Bakgrund **10**

2.1. Effekttoppar i kommersiella byggnader och elnätets kapacitetsutmaning . 10
2.2. Effekttariffer som ekonomiska incitament . . . 11
2.3. Kylsystem och kylmaskiners funktion . . . 11
2.4. Lastförskjutning och efterfrågestyrning för kylsystem . . . 12
2.5. Termisk tröghet som möjliggörare för kortsiktig flexibilitet . . . 12
2.6. Samspel mellan kylsystem och solcellsproduktion . . . 13
2.7. Bakgrund om den studerade fastigheten . . . 14
2.8. Krav på termiskt inomhusklimat . . . 14

3. Metod **16**

3.1. Fallstudie av solcellsintegrerat kylsystem . . . 16
3.1.1. Datainsamling och tidsupplösning för kylsystem . . . 16
3.1.2. Urval av analysdagar . . . 17
3.2. Lastförskjutningsstrategi och optimeringsmodell . . . 17
3.3. Grey-box-modell . . . 19
3.3.1. Urval av rum . . . 19
3.3.2. Modellstruktur . . . 20
3.3.3. Systemidentifiering . . . 21
3.3.4. Verifiering och komfortkrav . . . 22
3.3.5. Känslighetsanalys av grey-box-modell . . . 22
3.4. Kvantifiering av ekonomisk besparing . . . 23
3.5. Källkritik . . . 23
3.6. Metoddiskussion . . . 24
3.6.1. Verifieringsmodell . . . 24
3.6.2. Robusthet i resultaten . . . 25

4. Data **26**

4.1. Höglastdagar under kylsäsongen . . . 26
4.2. Tillförd kyleffekt, soleffekt och nettoeffekt . . . 27

4.3. Nettoeffektens toppar för samtliga analysdagar 29
4.4. Ekonomisk data 30

5. Resultat **31**
5.1. Potential för effekttoppsreducering 31
5.2. Utvärdering av inomhustemperatur 34
5.3. Potential för ekonomisk besparing 36

6. Diskussion **38**
6.1. Reduktionspotential för solcellsintegrerade kylmaskiner 38
6.2. Reduktionspotential sett till det ursprungliga kylsystemet 39
6.3. Resultaten i relation till tidigare forskning 39
6.4. Fysikalisk realiserbarhet och termisk komfort 40
6.5. Ekonomiska implikationer och avvikelser mellan teknisk och ekonomisk potential 41
6.6. Praktiska implikationer och vidare forskning 42

7. Slutsatser **43**

Referenser **45**

1. Inledning

Byggnader utgör en av de största energianvändarna i industrialiserade länder och står i Europa för cirka 40% av den totala energianvändningen (Henning et al., 2013). Energianvändning i byggnader är främst kopplad till funktioner såsom uppvärmning, tappvarmvatten, ventilation, kylning och belysning, vilka tillsammans utgör den huvudsakliga delen av byggnadens drift. Utöver den totala energianvändningen är även effektuttaget som associeras med detta, en central del av byggnadens totala belastning på elnätet (Henning et al., 2013).

Som en konsekvens av byggnaders stora energianvändning, har omfattande regelverk införts i många länder med syfte att förbättra energiprestanda (Pérez-Lombard et al., 2011). Inom EU har detta bland annat resulterat i energiklassificeringar och ökade krav på energieffektivitet, med mål såsom nära-nollenergibyggnader. I detta sammanhang diskuteras energineutralitet som innebär att byggnader i hög grad kan försörjas av lokal producerad förnybar energi, exempelvis genom solcellsanläggningar (Pérez-Lombard et al., 2011). Trots denna utveckling mot energieffektivare byggnader kvarstår utmaningar kopplade till hög belastning av elnätet (Lejestrand, 2025).

Under de senaste decennierna har behovet av kylning i byggnader ökat markant. Detta drivs dels av ett varmare klimat med fler och intensivare värmeperioder och dels av ökade krav på termisk komfort i både bostäder och kommersiella fastigheter (Pérez-Lombard et al., 2011). I Sverige, precis som övriga Europa, har effekt blivit en allt viktigare fråga för både elnätsbolag och fastighetsägare (Lejestrand, 2025). Effektavgifter är en prismodell där kostnaden delvis baseras på kundens maximala effektuttag (kW) vid ett givet tillfälle, snarare än enbart på den totala energianvändningen (kWh). Syftet med effekttariffer är att optimera utnyttjandet av elnätet, vilket blir allt viktigare när elanvändning ökar (Lejestrand, 2025). Idag är exempelvis en effektavgiftsmodell utformad så att kunden betalar ett pris per kilowatt baserat på de högsta uppmätta effekttopparna under en period (Nässén, 2026). För fastighetsägare innebär detta ett växande ekonomiskt incitament att inte bara minska total energianvändning, utan även att aktivt styra och optimera effektuttaget över tid (Pérez-Lombard et al., 2011).

En central aspekt i denna studie är sambandet mellan kylsystem och solcellsproduktion. Perioder med högt kylbehov korrelerar generellt med perioder med hög solinstrålning, vilket skapar en naturlig potential för synergi (Henning et al., 2013). Solcellsproduktion kännetecknas dock av en hög grad av variation över tid beroende av solinstrålning och väderförhållanden (Henning et al., 2013). Trots en övergripande korrelation sammanfaller därmed inte produktion av solel och effektbehov för kyla alltid i tid, vilket skapar kortvariga nettoeffekttoppar.

En strategi för att hantera dessa effekttoppar är genom lastförskjutning. Detta innebär en strategi att aktivt styra *när* kylsystemet arbetar snarare än *hur mycket* det arbetar totalt.

Genom att utnyttja byggnadens termiska tröghet kan kylproduktionen tillfälligt förskjutas i tid, antingen förebyggande eller uppskjuten, utan att påverka inomhusklimatet märkbart. I denna studie formuleras lastförskjutningsproblemet som ett konvext optimeringsproblem med målet att minimera den maximala nettoeffekten (kylmaskinens effektuttag minus solcellsproduktionen). Detta genomförs som en fallstudie av en kommersiell fastighet i Uppsala utrustad med ett kylsystem samt en solcellsanläggning.

1.1. Syfte och forskningsfrågor

Denna fallstudie syftar till att analysera i vilken utsträckning effekttoppar hos ett solcellsintegrerat kylsystem kan reduceras genom optimerad lastförskjutning baserad på lokal solproduktion. Vidare utvärderas driftstrategins fysikaliska realiserbarhet genom en termodynamisk analys, vilken säkerställer att byggnadens termiska tröghet klarar av dessa kortsiktiga förskjutningar utan att kompromissa med inomhusklimatets komfortkrav. Slutligen kartläggs de ekonomiska implikationerna av denna optimering för att fastställa vilka incitament som skapas för fastighetsägare i form av minskade effektavgifter under rådande tariffstruktur. Mot denna bakgrund ämnar studien att besvara följande forskningsfrågor:

1. I vilken utsträckning kan effekttoppar av solcellsintegrerade kylsystem reduceras genom lastförskjutning?

2. Vilken påverkan har dessa lastförskjutningar på inomhusklimatet?

3. Vilka ekonomiska implikationer kan denna typ av driftoptimering medföra i form av minskade effektavgifter?

1.2. Avgränsningar och begränsningar

Denna studie är avgränsad till en fallstudie av en enskild kommersiell fastighet med ett specifikt kylsystem bestående av två eldrivna kylmaskiner samt en solcellsanläggning (Vasakronan, 2026a). En sådan avgränsning möjliggör en djupgående analys av systemets drift och flexibilitet, men innebär samtidigt att resultatens generaliserbarhet till andra typer av byggnader och tekniska system är begränsad. Skillnader i exempelvis byggnadsutformning eller användningen av tekniska system kan påverka överförbarheten av studiens resultat.

Analysen baseras på historisk driftdata under sommarperioden juni till augusti 2024. Detta val motiveras av att effekttoppar i det aktuella kylsystemet uppstår under dessa varma perioder i kombination med solcellsproduktion. På så sätt möjliggör denna driftdata en detaljerad analys av effekttoppar relaterade till kylsystemet för byggnaden. Samtidigt innebär denna tidsmässiga avgränsning att variationer under andra delar av året inte beaktas och eventuella avvikande beteenden undersöks inte inom denna studie. Dessutom innebär denna begränsning att studien inte tar hänsyn till osäkerheter i framtida drift, såsom förändringar i användarbeteende, verksamhet eller byggnadens kylbehov.

Den numeriska analysen baseras på en tidsupplösning om en minut, vilket utgör den högsta tillgängliga upplösningen av data. Detta innebär att variationer för kortare tidsintervall, såsom sekundnivå, inte omfattas i denna studie. Vidare undersöks effektförskjutningar inom tidsintervallen 1, 2, 5, 10 och 15 minuter. Detta val motiveras av att studien undersöker kortvariga variationer av effektprofilen för det solcellsintegrerade kylsystemet. Genom att undersöka lastförskjutning över tidsintervall över flera minuter kan både mycket kortsiktiga och något mer utdragna förflyttningar av last analyseras. Förflyttningar på längre tidsskalor inkluderas inte inom ramen för denna studie.

Studien behandlar kylsystemet på en övergripande nivå och tar inte hänsyn till driftens inverkan på dess prestandaegenskaper, såsom verkningsgrad eller konsekvenser av start och stopp av kylmaskiner. Detta innebär att analysen av effekttoppar och lastförskjutning inte fullt ut speglar de fysikaliska begränsningar och avvikelser som kan uppstå i verklig drift. Resultaten bör därför tolkas som en idealiserad uppskattning av flexibilitetspotentialen av tekniken. Dessutom behandlas inte hur den identifierade driften av kylsystemet rent praktiskt skulle implementeras. Studien fokuserar därmed på den teoretiska potentialen för lastförskjutning snarare än på den tekniska realiserbarheten, vilket bör tas i beaktning vid tillämpning av resultaten i praktiken.

Kylsystemet är uppdelat i två huvudsakliga användningsområden: komfortkyla och processkyla. På grund av begränsad datatillgång har det inte varit möjligt att särskilja deras respektive bidrag. I studien behandlas därför kylbehovet som en sammanlagd last. Detta antagande förenklar analysen, men kan dölja skillnader i flexibilitet mellan de två typerna av kylbehov, då dessa har olika krav på temperatur och styrbarhet. Vidare är kylsystemets drift tidsmässigt avgränsad till de perioder då komfortkylan är schemalagda att vara i drift (måndagar klockan 06:00-17:00 samt tisdag-fredag klockan 06:30-17:30). Detta val motiveras av att studien undersöker hur komfort påverkas av lastförskjutning som strategi och därmed anses det rimligt att fokusera på kontorstider enligt driftschemat. Under övrig tid används nattkyla i fastigheten, då byggnaden kyls med utomhusluft. Denna del av systemet inkluderas inte i analysen.

Den ekonomiska analysen i denna studie utgår ifrån att de reduktionerna som kan uppvisas av nettoeffekten kan översättas till en ekonomisk besparing. I verkligheten finns andra processer i byggnaden som kan ge upphov till effekttoppar och förekommer under andra perioder. I praktiken innebär detta att reduktionen av kylsystemets effekttoppar inte nödvändigtvis går att likställa med ekonomisk besparing relaterad till effekttoppsreduktion för hela byggnaden. I denna studie anses den ekonomiska besparingen isolerad till kylsystemet, men för verkliga driftfall krävs en analys av hela byggnadens effektuttag.

Sammanfattningsvis innebär dessa avgränsningar och begränsningar att studien ger en detaljerad men delvis idealiserad bild av flexibilitetspotentialen i ett specifikt kylsystem under sommarförhållanden. Resultaten bör därför tolkas med hänsyn till de antaganden och förenklingar som gjorts, särskiljt vid överföring till andra system eller driftförhållanden.

1.3. Initiala hypoteser och antaganden

Studien utgår från hypotesen att mindre justeringar av driftstrategier för befintlig kylsystem kan skapa ett mer effektivt samspel mellan byggnadens kylbehov och lokal solcellsproduktion. Genom att utnyttja byggnadens termiska tröghet och aktivt förskjuta laster i tiden antas det vara möjligt att anpassa kylproduktionen till perioder med hög solcellsproduktion. Denna strategi förväntas kunna reducera effekttoppar utan att försämra inomhusklimatet utanför komfortkrav. Dessutom antas att det finns ekonomiska incitament att genomföra effekttoppsreducering genom lastförskjutning baserat på rådande effekttariffstruktur.

1.4. Disposition

Resterande del av rapporten är disponerad enligt följande: Kapitel 2 presenterar teoretisk bakgrund kring effekttoppar och elnätets kapacitetsutmaning, effekttariffer som ekonomiska incitament, kylsystemets funktion, lastförskjutning och efterfrågestyrning, termisk tröghet som möjliggörare för flexibilitet, samt samspelet mellan kylsystem och solcellsproduktion. Avslutningsvis presenterar kapitlet bakgrund om den studerade fastigheten och krav på termiskt inomhusklimat. Kapitel 3 beskriver studiens metod genom systembeskrivning av fallstudien, datainsamling samt urval av analysdagar. Vidare beskrivs lastförskjutningen samt optimeringsmodellens matematiska formulering. Därefter presenteras grey-box-modellens metod samt metoden för ekonomisk besparing. Avslutningsvis diskuteras källkritik samt metoddiskussion. Kapitel 4 presenterar det datamaterial som ligger till grund för studien, inklusive de identifierade höglastdagarna och karakterisering av tillförd kyleffekt, soleffekt och nettoeffekt. Kapitlet avslutas med datan relaterat till den ekonomiska analysen. Kapitel 5 redovisar resultaten från optimeringen med lastförskjutning, de termodynamiska resultaten samt de ekonomiska resultaten. Dessa resultat diskuteras därefter i Kapitel 6 i relation till litteraturen för att kunna besvara studiens forskningsfrågor. Avslutningsvis sammanfattas studiens resultat och analys i Kapitel 7 där studiens slutsatser presenteras och forskningsfrågorna besvaras.

2. Bakgrund

Detta kapitel presenterar den teoretiska och tekniska bakgrund som ligger till grund för studiens metod och analys. Inledningsvis beskrivs de övergripande utmaningarna med effekttoppar i elnätet (avsnitt 2.1) och sedan hur effekttariffer fungerar som ett ekonomiskt incitament för fastighetsägare att jämna ut sitt effektuttag (avsnitt 2.2). Därefter redogörs för kommersiella kylsystems funktion (avsnitt 2.3) och sedan hur strategier som lastförskjutning och efterfrågestyrning kan tillämpas i praktiken (avsnitt 2.4). En central del i detta är byggnadens inbyggda termiska tröghet, vilken beskrivs som den underliggande möjliggöraren för flexibilitet (avsnitt 2.5). Därefter diskuteras samspelet mellan kylsystem och lokal solcellsproduktion (avsnitt 2.6). Avslutningsvis introduceras den specifika fastighet som utgör studiens fallstudie (avsnitt 2.7), samt de krav på termiskt inomhusklimat som sätter de praktiska gränserna för driftoptimeringen (avsnitt 2.8).

2.1. Effekttoppar i kommersiella byggnader och elnätets kapacitetsutmaning

Under de senaste decennierna har energianvändningen relaterat till kylning ökat markant i industrialiserade länder, inklusive regioner som historiskt dominerats av uppvärmningsbehov (Henning et al., 2013). Denna utveckling drivs av flera faktorer, såsom ökade interna laster från elektronisk utrustning, högre krav på termisk komfort och ett varmare klimat med fler och intensivare värmeperioder. Detta resulterar i att kylsystem idag utgör en energiintensiv komponent i kommersiella byggnader (Henning et al., 2013).

Utöver den totala energianvändning är effektuttaget, det vill säga hur stor eleffekt som tas ut vid ett givet ögonblick, en central fråga för elnätets funktion. Särskilt under varma sommarperioder koncentreras kylbehovet till korta tidsintervall, vilket kan skapa kortvariga men höga effekttoppar som belastar både fastighetens elsystem och det övergripande elnätet (Lejestrand, 2025). Elnätsoperatörer måste dimensionera kapaciteten för att kunna möta konsumenternas efterfrågan (Elum Energy, 2026). Detta innebär att effekttoppar belastar elnätet, även om topparna inträffar vid ett fåtal tillfällen, och kostnaden för denna reservkapacitet återspeglas i effekttarifferna (Elum Energy, 2026).

Elkostnaden för en kommersiell fastighet består typiskt av två rörliga delar; en energikomponent som baseras på förbrukad mängd kilowattimmar och en effektkomponent som baseras på det maximala effektuttaget vid ett givet tillfälle (Lejestrand, 2025). Denna uppdelning innebär att kostnadsreduktionen för energieffektivisering inte enbart handlar om att minska den totala energianvändningen, utan också om att aktivt styra hur stor effekt som tas ut vid varje ögonblick.

2.2. Effekttariffer som ekonomiska incitament

Effekttariffer är en prismodell där kostnaden baseras på hur mycket effekt kunden använder vid ett givet tillfälle. Syftet är att på ett bättre sätt utnyttjandet elnätet och ge kunden ekonomiska incitament att jämna ut sin elanvändning över tid (Lejestrand, 2025). Modellen är konstruerad för att spegla att de faktiska kostnaderna för elnätsinfrastrukturen i hög grad bestäms av topplaster, inte av genomsnittlig förbrukning.

En vanlig modell i Sverige är att effektavgiften beräknas som ett medelvärde av de högsta uppmätta effekttopparna under en månad (Lejestrand, 2025). Vattenfall, ett elnätsbolag i Uppsalaregionen, baserar effektavgiften på enskilt högsta effektuttaget för månaden (Vasakronan, 2026a). Detta effektuttag är medeleffekten på en timme och priset per kilowatt uppgår till 54 kr/kW för den studerade fastigheten (Vasakronan, 2026a). För en kommersiell byggnad med ett kylsystem vars effektuttag kan uppgår till över 100 kW under höglastperioder kan detta innebära betydande kostnader som direkt kopplar till effekttopparnas storlek.

Det är viktigt att notera att det svenska regelverket för effekttariffer befinner sig i förändring. Tidigare fanns ett krav på att alla elnätsföretag skulle införa effekttariffer senast den 1 januari 2027, men detta krav har stoppats under studiens gång och de regler som styrde införandet ska upphävas (Lejestrand, 2025). Trots denna politiska osäkerhet har flertalet nätbolag redan infört effektbaserad debitering för kommersiella kunder och troligtvis kommer denna prismodell användas en tid framöver (Vasakronan, 2026a).

2.3. Kylsystem och kylmaskiners funktion

HVAC-system (Heating, ventilation och air-conditioning) står för ungefär 40-50 procent av byggnaders totala energianvändning, vilket gör dem till en av de mest betydande komponenterna att hantera ur ett energisystemperspektiv (Weilin et al., 2019). I det studerade systemet samverkar två kylmaskiner med en driftstrategi där en primärmaskin (master) hanterar baslasten, och en sekundärmaskin (slav) aktiveras då kylbehovet överskrider primärmaskinens kapacitet (Vasakronan, 2026a). Denna master-slav-drift medför ett oscillerande mönster i effektuttaget under de tillfällen då slavmaskinen aktiveras. Då slavmaskinen startar stiger systemets totala tillförda effekt markant, och när kylbehovet sjunker under tröskelvärdet stängs den av (Vasakronan, 2026a).

En vanlig metod för att kyla byggnader är med hjälp av kompressorkylmaskiner (Hundy et al., 2016). I ett sådant system cirkulerar ett köldmedium i ett slutet kretslopp mellan fyra komponenter. Dessa komponenter är förångare, kompressor, kondensor och expansionventil (Hundy et al., 2016). Kylprocessen bygger på att köldmediet växlar mellan vätskeform och gasform vid temperaturer som beror av trycket. De fasövergångar som sker i processen absorberar respektive avger värme (Hundy et al., 2016). I förångaren tillförs värme vid lågt tryck och låg temperatur vilket gör att köldmediet förångas och absorberar värme. Denna upptagning av värme utgör kylsystemets faktiska kyleffekt. Gasen som lämnar förångaren

har lågt tryck och i det efterföljande steget komprimeras mediet mekaniskt i kompressorn (Hundy et al., 2016). Detta mekaniska arbete är det som utgör den tillförda effekten. I denna process höjs både trycket och temperaturen och resulterar i att köldmediet övergår till en överhettad gas. I kondensorn avges värme till omgivningen, vilket sänker temperaturen på mediet och det övergår till vätskeform (Hundy et al., 2016). Slutligen passerar mediet genom expansionventilen där trycket sänks och temperaturen blir lägre (Hundy et al., 2016). Detta steg sluter cykeln. Effektiviteten i en sådan cykel beskrivs genom ett COP-värde (Coefficient of Performance) som definieras som förhållandet mellan kyleffekten och den tillförda kompressoreffekten (Hundy et al., 2016).

2.4. Lastförskjutning och efterfrågestyrning för kylsystem

Lastförskjutning är en central strategi inom energihantering som syftar till att styra *när* energi används snarare än att minska den totala mängden. Inom detta fält brukar en specifik princip urskiljas som kallas topplastkapning (*peak shaving*) vilket innebär att reducera effektuttag under höglastperioder (Sveriges Allmännytta, u.å.). Denna princip är en del av efterfrågestyrning (*demand response*) av flexibla laster, och kylsystem i kommersiella byggnader är ett studerat objekt för denna typ av styrning.

Studier av efterfrågestyrning för luftkonditioneringssystem har i huvudsak fokuserat på att optimera den ekonomiska nyttan baserat på spot-priser (Dai et al., 2025). Litteraturen visar att kortsiktig lastförskjutning av kylsystem är möjlig utan att komforten påverkas nämnvärt, förutsatt att byggnaden har tillräcklig termisk tröghet. En fallstudie i en kontorsbyggnad i Kalifornien visade att en enkel effektbegränsningsstrategi kunde reducera kylmaskinens effektuttag med 80-100 procent under en kort eftermiddagsperiod utan större påverkan på termisk komfort (Xu & Haves, 2006). Mer nyligen har modellprediktiv styrning (MPC) av HVAC-system i ett kontorshus i Berkeley demonstrerat att effektuttaget kunde reduceras med 49-71 procent under en pristopp på sex timmar, genom att utnyttja byggnadens termiska massa (Zanetti et al., 2025).

2.5. Termisk tröghet som möjliggörare för kortsiktig flexibilitet

En viktig förutsättning för lastförskjutning i byggnader är utnyttjandet av termisk tröghet (Le Dréau & Heiselberg, 2016). Byggnadens stomme, inredning och det vatten som cirkulerar i kylsystemet fungerar som ett termiskt lager. Detta är möjligt då kyla kan absorberas av dessa massor och gradvis avges till rumsluften under en efterföljande period. Därmed skapas ett tidsfönster inom vilket kylproduktionen kan förskjutas utan att inomhustemperaturen avviker från acceptabla gränser (Le Dréau & Heiselberg, 2016).

En förskjutning av kyllasten har en liten påverkan på termisk komfort om byggnadens termiska massa utnyttjas. Detta då byggnadens massan kan absorbera eller avge värme till omgivningen (Weilin et al, 2019). Tidsrymden för denna flexibilitet beror på bygg-

nadens termiska egenskaper då byggnader med hög termisk massa, som fastigheter med betongstomme, generellt kan uppvisa högre grad av flexibilitet än lättare konstruktioner (Le Dréau & Heiselberg, 2016).

Tidigare studier visar att samordnad efterfrågestyrning med utnyttjande av byggnadens termiska massa avsevärt kan öka egenanvändningen av solceller och minska driftkostnader med mer än 15 procent, utan behov av andra typer av energilager (Yuan et al., 2026). Detta understryker att termisk tröghet inte enbart är en passiv byggnadsegenskap, utan en aktiv resurs som kan utnyttjas systematiskt för att optimera kylsystemets samspel med solcellsproduktionen.

Den termiska tröghetens storlek beror på byggnadens material och konstruktion. Värmekapaciteten hos en byggnadsmassa beskrivs av produkten av massa, specifik värmekapacitet och temperaturfördröjning enligt $Q = mc\Delta T$, där Q är lagrad energi (J), m är massa (kg), c är specifik värmekapacitet (J/kgK), och ΔT är temperaturförändringen (K).

2.6. Samspel mellan kylsystem och solcellsproduktion

Ett solcellssystem omvandlar solinstrålning till elektricitet med en produktion som varierar med solens position och väderförhållanden (Henning et al., 2013). I Sverige är produktionen störst under sommarhalvåret och mitt på dagen. Kommersiella byggnader som kontorsfastigheter, vilka generellt är i drift under dagtid, har en daglig lastprofil från kylsystemet som väl sammanfaller med tillgången på solinstrålning (Henning et al., 2013). Detta gör kombinationen av solceller och kontorsbyggnader till ett naturligt korrelerat system.

Tidigare studier visar att användningen av egenproducerad solel ökar linjärt med ökad kylefterfrågan (Shimomura, 2025). Studien visar att en tio-gradig ökning av dygnets maxtemperatur sammanfaller med en ökning av egenanvändningen av solel med 30 procent (Shimomura, 2025). Detta innebär att varma dagar, som är de dagar med högst effekttoppar från kylsystemet (Vasakronan, 2026a), är de dagar då solceller är som mest värdefulla.

Trots denna övergripande korrelation uppstår tidsmässiga obalanser mellan produktion av solel och kylbehov (Henning et al., 2013). Varierande väderförhållanden och snabba förändringar av solinstrålning skapar momentana fluktuationer av soleffekten, som inte direkt speglas i kylbehovet. Det är denna variation, som uppstår under korta tidsperioder, som skapar de effekttoppar i nettoeffekten som studien fokuserar på. Genom lastförskjutning kan kylsystemets drift anpassas för att bättre sammanfalla med dessa variationer och på så sätt reducera nettoeffektens toppar.

En central aspekt av samspelet mellan sol och kyla är den tidsmässiga fördröjningen mellan solinstrålningens påverkan och det faktiska kylbehovet. Solinstrålningen värmer inte en byggnads inomhusmiljö omedelbart då värmen först måste genomtränga byggnadens skal, absorberas av strukturens material och sedan avges till rumsluften (Causone et al., 2010). På det sättet gäller att väderförhållanden som momentant reducerar solinstrålningen inte omedelbart minskar kylbehovet då byggnaden fortsätter att avge värme som tidigare

absorberats. Denna fördröjning innebär att kylbehovet inte direkt speglar momentan solinstrålning, utan snarare är en följd av värmelasten över en längre period. Det är just denna tröghet som gör att snabba fluktuationer i solproduktionen, som uppstår till följd av varierande väderförhållanden och skapar kvarvarande nettoeffekttoppar, kan hanteras genom kortsiktig lastförskjutning utan att kylbehovet över längre perioder påverkas.

2.7. Bakgrund om den studerade fastigheten

Vasakronan är Sveriges största fastighetsbolag sett fastighetsvärde. Företaget har arbetat aktivt med energieffektivisering och lokal energiproduktion, bland annat genom installation av solcellsanläggningar på kommersiella fastigheter (Vasakronan, 2026a). Flera av bolagets byggnader använder eldrivna kylmaskiner och dessa system resulterar i betydande effekttoppar under varma perioder.

Kylmaskinernas drifttider är schemalagda till måndagar 06:00-17:00 och tisdag-fredag 06:30-17:00. Under natten kyls byggnaden med sval utomhusluft genom ventilationen, istället för eldrivna kylmaskiner. Vidare är fastigheten utrustad med en ackumulatortank som lagrar kylenergi som produceras av kylmaskinerna och används för att kyla byggnaden (Vasakronan, 2026a).

Det oscillerande effektmönster som observeras hos kylmaskinerna under varma dagar uppstår som en konsekvens av master-slav-driften. När kylbehovet tillfälligt överstiger mastermaskinens kapacitet aktiveras slavmaskinen och systemets totala tillförda effekt ökar abrupt (Vasakronan, 2026a). Detta mönster upprepas under varma dagar.

Den studerade fastigheten är även utrustad med en solcellsanläggning med en installerad toppeffekt på cirka 160 kW, och är dimensionerad för att bidra med ungefär 30% av byggnadens årliga elanvändning (Vasakronan, 2026b). Solpanelerna är placerade både på taket och integrerade i fasaden, vilket ger en spridning av elproduktionen över dagen. Takmonterade paneler är orienterade mot öst och väst med en låg lutningsvinkel, cirka 10 grader, vilket bidrar till en relativt jämn produktion över dagen jämfört med en strikt sydorientering. De fasadintegrerade panelerna är placerade i flera väderstreck, uteslutande norr, vilket ytterligare bidrar till att sprida produktionen över tid (Vasakronan, 2026a).

2.8. Krav på termiskt inomhusklimat

För att lastförskjutning av kylproduktion ska vara praktiskt genomförbar måste inomhusklimatet upprätthållas inom acceptabla gränser under hela driftperioden. I Sverige regleras termisk komfort i kontorslokaler primärt av Boverkets byggregler samt av en branschstandard (Boverket, 2024). Dessa definierar operativ temperatur som ett mått på den upplevda termiska komforten baserat på lufttemperatur och medelstrålningstemperatur (Boverket, 2024).

Den studerade fastigheten ägs av Vasakronan, vars interna riktlinjer specificerar att

operativ rumstemperatur i kontorslokaler sommartid ska hållas vid +24°C med en tillåten avvikelse på ±2°C vid dimensionerande utomhusfall (Vasakronan, 2025). Det innebär att rumstemperaturen inom ramen för normala driftförhållanden får variera mellan +22°C och +26°C. Utöver detta anges att kortvariga avvikelser under värmebölja, motsvarande <80 timmar per normalår, är acceptabla. Det tillåtna temperaturintervallet på ±2°C utgör en central parameter för utvärderingen av lastförskjutningens praktiska genomförbarhet. Vasakronans energistrategi identifierar dessutom explicit topplastkapning som en av sina prioriterade energistrategier (Vasakronan, 2025). Detta innebär att företaget vill minska mängden kyla som produceras under perioder med stort kylbehov för att uppnå ett jämnare effektuttag.

3. Metod

Detta kapitel redogör för det tillvägagångssätt som använts för att kartlägga systemets flexibilitet och besvara studiens forskningsfrågor. Initialt beskrivs den aktuella fallstudien och hur systemets nettoeffekt definieras som den centrala analysvariabeln (avsnitt 3.1). Därefter beskrivs hur lastförskjutningen av kylsystemet formulerades som ett konvext optimeringsproblem i syfte att minimera effekttoppar (avsnitt 3.2). För att säkerställa att optimeringen är fysikaliskt realiserbar utan att bryta mot komfortkrav, redogörs därefter för uppbyggnaden och kalibreringen av den termodynamiska grey-box-modellen (avsnitt 3.3). Slutligen beskrivs hur den ekonomiska besparingspotentialen kvantifierades utifrån gällande effekttariffer (avsnitt 3.4), följt av en avslutande diskussion kring källkritik (avsnitt 3.5) samt metodens tillförlitlighet, styrkor och begränsningar (avsnitt 3.6).

3.1. Fallstudie av solcellsintegrerat kylsystem

Eftersom solproduktionen kan variera snabbt över tid, exempelvis under en molnig dag, kan kortvariga effekttoppar uppstå trots hög installerad solcellskapacitet. Studien metod fokuserar därför på att analysera och jämna ut dessa variationer genom lastförskjutning av kylsystemets effektuttag. För att analysera samspelet mellan kylbehov och solcellsproduktion används nettoeffekten som central analysvariabel. Nettoeffekten definieras som skillnaden mellan kylsystemets tillförda effekt och solcellsanläggningens elproduktion vid varje given tidpunkt enligt

$$P_{netto}(t) = P_{tillfrd}(t) - P_{sol}(t). \tag{1}$$

Nettoeffekten representerar därmed den faktiska belastningen på elnätet från kylsystemet efter att solcellsproduktion har utnyttjats. Eftersom syftet är att reducera kortvariga effekttoppar är det denna nettoeffekt som används som grund för analysen och som lastförskjuts. Genom att studera variationer i nettoeffekten kan perioder identifieras där minskad solproduktion sammanfaller med fortsatt högt kylbehov, vilket resulterar i tillfälliga toppar i effektuttaget från nätet.

3.1.1. Datainsamling och tidsupplösning för kylsystem

Data för studien hämtades från fastighetens befintliga energiövervakningssystem, vilka kontinuerligt loggar bland annat driftparametrar för kylmaskiner och solcellsanläggning. För att kunna utvärdera kylsystemet och dess relation till solcellsanläggningen hämtades den tillförda effekten från respektive kylmaskin (kW) samt solcellsanläggningens elproduktion (kW). All data registrerades med en tidsupplösning på en minut, vilket var den högsta tillgängliga upplösningen. Valet av minutdata motiveras av studiens fokus på kortvariga variationer i solproduktion. Solinstrålning kan förändras snabbt över tid, vilket innebär att effekttoppar kan uppstå under mycket korta tidsintervall. Minutdata möjliggör en detaljerad

analys av samspelet mellan kylbehov och solproduktion samt identifiering av de variationer som driver toppar i nettoeffekten.

Inför analysen genomfördes en grundläggande datakvalitetskontroll. Tidsserier med felaktiga mätvärden, exempelvis avvikande solinstrålning under nattetid, identifierades och exkluderades. Datamaterialet bedömdes i övrigt vara komplett och representativt för den studerade perioden, utan bortfall som påverkade resultaten.

3.1.2. Urval av analysdagar

För att identifiera de dagar som anses mest relevanta för analys, undersöktes samtliga dygn under perioden juni-augusti 2024. Perioden motiveras av att effekttopparna i det aktuella kylsystemet primärt uppstår under varma sommardagar, då kylbehovet är som störst. Från detta identifierades de tio dygn som uppvisade högst effekttopp för kylsystemets effektuttag baserat på minutdata. För sommarperioden 2024 var dessa 10 dygn betydligt mer belastade än resterande dagar under perioden och ansågs därmed som relevanta höglastdagar att analysera. Genom att utgå från de dagar med högst kylbehov kunde de perioder identifieras där kylsystemet belastade elsystemet som mest och där potentialen för lastförskjutning bedömdes som störst. Valet av tio dagar motiverades av att ett sådant urval ger tillräcklig variation för att identifiera gemensamma mönster för höglastdagar, utan att reduceras till enskilda hörnfall. Fokus på höglastdagar är ett etablerat angreppssätt inom forskning relaterat till efterfrågestyrning, där målet är att kartlägga potentialen i de situationer där åtgärder har störst inverkan på systemet (Arteconi et al., 2012).

3.2. Lastförskjutningsstrategi och optimeringsmodell

För att undersöka möjligheten att reducera effekttoppar utan att förändra den totala kylmängden implementerades en lastförskjutningsstrategi baserad på konvex optimering. Valet att formulera problemet som ett optimeringsproblem motiveras av att en sådan ansats ger en teoretisk övre gräns för vad som är möjligt givet full kännedom om systemets driftdata under hela dygnet. Denna typ av deterministisk optimering med full framförhållning ger ett väldefinierat referensvärde som representerar det bästa möjliga utfallet under givna förutsättningar. Detta möjliggör jämförelser mellan scenarier utan osäkerhet av prestandavariabler (EPRI, 2021). Resultaten ska på detta sätt tolkas som en teknisk potential, och bör inte ses som en prognos för vad ett system i realtid skulle uppnå.

Strategin syftar till att omfördela kylmaskinernas tillförda effekt i tid, så att samma mängd energi levereras per dag men med ett jämnare effektuttag. Optimeringen formulerades som ett konvext optimeringsproblem där målet var att minimera den maximala nettoeffekten över dygnet. Konvex optimering är den dominerande metodklassen för realtidsenergihantering i byggnader (Georgiou, 2019). Detta innebär att effekttoppar reducerades genom att delar av lasten flyttades från tidpunkter med hög belastning till närliggande tidpunkter med lägre belastning. För varje tidpunkt tilläts effekt förflyttas både bakåt och framåt i tiden inom ett begränsat tidsfönster. Den optimerade effekten gavs därmed av den ursprungliga

nettoeffekten minus den förflyttade effekten plus effekt från andra tidpunkter, enligt

$$P_{\text{opt}}(t) = P_{\text{netto}}(t) - P_{\text{ut}}(t) + P_{\text{in}}(t). \tag{2}$$

De sex olika tidsfönster som analyserades var ±1, ±2, ±5, ±10 samt ±15 minuter. Dessa scenarier representerar olika grader av flexibilitet i systemet, där ett större tidsfönster motsvarar större möjlighet att omfördela last över tid. Valet av tidsfönster motiverades av dynamiken hos den insamlade datan samt av studiens fokus på kortvariga variationer i solproduktionen. Eftersom den högsta tillgängliga tidsupplösningen var på minutnivå valdes en minut som det minsta möjliga tidsintervallet i optimeringsmodellen. De kortare tidsfönstren på 1-5 minuter representerar begränsade förskjutningar där kylsystemets drift endast tillåts justeras marginellt i tiden. Dessa scenarier kan representera ett system med låg flexibilitet. De längre tidsfönstren på 10-15 minuter representerar istället ett system med större flexibilitet där lasten omfördelas över längre tidsperioder. Genom att analysera flera tidsfönster kan samband mellan tillgänglig flexibilitet och effekttoppsreduktionspotential studeras systematiskt.

Målet med optimeringen var att minimera den högsta uppmätta nettoeffekten under dygnet, vilket motsvarar att kapa systemets effekttoppar. Ett renodlat minimax-problem riskerar dock att generera stora förskjutningar av kyllast, vilket i praktiken skulle innebära instabil drift och ökat slitage på kylmaskinerna. För att motverka detta inkluderades därför en regulariseringsterm i målfunktionen som bestraffar mängden flyttat effekt. Denna parameter sattes till 0,001 kW. Denna parameter ansågs vara tillräckligt liten för att inte kompromissa med den ursprungliga målsättningen (att kapa effekttoppen) men tillräckligt stor för att bestraffa varje kilowatt flyttad effekt. Algoritmen kommer att fortsätta omfördela effekt så länge varje kilowatt som förskjuts bidrar till att sänka den globala toppen med mer än regulariseringsparametern (1 W). På detta sätt prioriteras lösningar i modellen där last endast förskjuts när det faktiskt bidrar till att reducera toppeffekter. Värdet på denna parameter sattes godtyckligt och för att finna en parameter som tar hänsyn till kylmaskinens faktiska drift måste detta praktiskt utvärderas.

Optimeringen genomfördes under ett energikonserverande bivillkor, vilket innebär att den totala mängden producerad kyla över den analyserade perioden hålls konstant. Lastförskjutningen representerar därmed inte en energibesparing utan en omfördelning av producerad kyla i tid. Detta innebär att modellen representerar en styrning av *när* kylmaskinen arbetar, inte en minskning av *hur mycket* den arbetar totalt. Detta bivillkor är nödvändigt för att säkerställa att modellen beskriver ett fysikaliskt rimligt system och förhindrar att effekttoppar reduceras genom att kylbehov utesluts från systemet.

Det är värt att notera att en teoretisk egenskap hos minimax-optimering är att när det tillåtna tidsfönstret växer mot oändligheten, och energikonserveringsbivillkoret gäller, konvergerar den optimala lösningen mot en fullständigt utjämnad lastprofil. Detta innebär att toppeffekten approximerar medeleffekten över hela driftperioden. Detta utgör den absoluta undre gränsen för vad som är tekniskt möjligt genom lastförskjutning. De fem tidsfönster som analyseras i denna studie representerar ett intervall som bedöms vara realistiskt genomförbart för systemet utifrån komfortkraven.

3.3. Grey-box-modell

Termisk byggnadsmodellering delas generellt in i tre kategorier, *white-box*, *black-box* och *grey-box* (Foucquier et al., 2013).

En renodlad white-box-modell bygger helt på fysikaliska samband, vilket kräver detaljerad kännedom om byggnadens egenskaper och gör modellen beräkningsintensiv samt svårkalibrerad (Foucquier et al., 2013). En black-box-modell är däremot helt datadriven, den kan vara träffsäker på känd data men saknar fysikalisk förankring, vilket begränsar förmågan att förutspå nya, fiktiva driftscenarier (Foucquier et al., 2013). Grey-box-modellering utgör en hybrid som kombinerar fördelarna från båda ansatserna. Metoden utgår från en förenklad fysikalisk struktur, typiskt ett ekvivalent nätverk av termiska motstånd och kapacitanser (RC-nätverk) vars okända parametrar estimeras statistiskt genom att minimera felet mot historisk mätdata. Detta resulterar i en beräkningseffektiv modell som strikt följer termodynamikens lagar, vilket gör den väl lämpad för att tillförlitligt simulera styrstrategier (Bacher & Madsen, 2011).

För att driva och kalibrera den aktuella modellen används följande inparametrar:

- Total kyleffekt (P_{kyla}): Värmen som kylmaskinerna faktiskt för bort från byggnaden.
- Soleffekt (P_{sol}): Den lokala elproduktionen från solcellsanläggningen. Denna används som en indikator (proxy) för att uppskatta hur mycket solen värmer upp byggnaden.
- Utomhustemperatur (T_{ute}): Den yttre temperaturen som driver värmeutbytet genom byggnadens fasad.
- Inomhustemperaturer (T_{in}): De historiska mätvärdena från rum i byggnaden. Dessa fungerar som referens när modellen tränas för att förstå byggnadens unika termiska beteende.

3.3.1. Urval av rum

För att modellera byggnadens inomhustemperatur valdes åtta representativa kontorsrum, vilka fördelades strategiskt över fyra olika våningsplan för att fånga upp termiska variationer. Urvalet bestod av två rum i söderläge, för att representera de zoner som utsätts för mest solinstrålning under dagen, samt två i västligt läge, ett nordligt och ett östligt rum. För att tydligare inkludera byggnadens inre termiska massa valdes två centralt placerade rum utan direkt fasadkontakt.

Inomhustemperaturen (T_{in}) som används i grey-box-modellen beräknades som ett medelvärde av mätdata från dessa rum. Vidare identifierades ett av rummen i söderläge som byggnadens systematiska *worst case*-rum, eftersom det uppvisade den högsta temperaturen under analysperioden. Detta rum användes för den slutgiltiga verifieringen av

komfortkraven genom en projicering där den simulerade temperaturavvikelsen adderades till rummets faktiska mätdata. Detta gjordes i syfte att säkerställa att den projicerade maxtemperaturen (T_{rum_opt}) inte kompromissat komfortkraven. Antagandet var att alla rum reagerar proportionellt på en förändring i kyleffekten. Detta antagande stöds empiriskt av den höga inbördes korrelationen ($r > 0{,}85$) mellan rummen, det vill säga att rummens temperaturförändringar följer samma mönster.

3.3.2. Modellstruktur

Modellen bygger på en RC-analogi, där byggnadens termiska beteende beskrivs med samma matematik som en elektrisk krets. En temperaturskillnad driver ett värmeflöde genom ett termiskt motstånd, likt hur en spänningsskillnad driver en ström. En termisk kapacitans lagrar värmeenergi, på samma sätt som en kondensator lagrar elektrisk laddning (Fraisse et al., 2002).

I den här studien modelleras byggnaden med en 3R2C-struktur, det vill säga ett termiskt nätverk med två kapacitanser och tre motstånd. Tillstånden är inomhusluftens temperatur T_{in} och stommens temperatur T_s (systemets noder). Inomhusluften reagerar snabbt på lastförändringar, medan stommen har en betydligt större värmekapacitet och fungerar som en termisk buffert. Noderna är kopplade till varandra och till utomhustemperaturen via de tre termiska motstånden. Detta innebär att värme kan flöda mellan utomhus och inomhus på två parallella vägar, via stommen eller förbi den (såsom dörrar, fönster, etc), vilket ger byggnaden både snabba och långsamma tidskonstanter (se Tabell 1). Valet av en 3R2C-struktur motiveras av att den utgör den lägsta modellordning som samtidigt kan representera dessa två fysikaliskt åtskilda tidskonstanter samt två parallella värmevägar mot utomhusmiljön. Bacher och Madsen (2011) visar genom systematisk modellselektion att en sådan tvåkapacitansmodell ger en god avvägning mellan beskrivningsförmåga och risk för överparametrisering, medan modeller av högre ordning sällan ger en proportionerlig förbättring givet tillgänglig datamängd. Energibalansen formuleras genom följande system av ordinära differentialekvationer

$$C_i \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{T_s - T_{in}}{R_{is}} + \frac{T_{ute} - T_{in}}{R_{ie}} - \beta P_{kyla} + \alpha P_{sol} + Q_{int} \tag{3}$$

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = \frac{T_{in} - T_s}{R_{is}} + \frac{T_{ute} - T_s}{R_{es}} \tag{4}$$

där R_{is}, R_{ie} och R_{es} utgör nätverkets termiska motstånd (Bacher & Madsen, 2011). Parametern β fungerar som en optimerad kopplingsfaktor för att fördela den korrekta andelen av den totala kyleffekten (P_{kyla}) till zonen, medan α relaterar solcellsproduktionen (P_{sol}) till termisk sollast. P_{sol} är solcellsproduktionen från byggnadens solcellsanläggning och används därmed som proxy för solinstrålningen på byggnaden. Interna värmelaster (Q_{int}) från personer och utrustning följer starka dygnscykler (Duarte et al. 2013). För att fånga detta i modellen approximeras de enligt

$$Q_{int}(t) = \gamma \sin(\omega t_{hour}) + \delta \cos(\omega t_{hour}). \quad (5)$$

I Tabell 1 illustreras samtliga tillstånd och parametrar som användes i grey-box-modellen med tillhörande enheter.

Tabell 1: *Tillstånd och parametrar i grey-box-modellen*

Symbol	**Beskrivning**	**Enhet**
Tillstånd		
T_{in}	Inomhusluftens temperatur	°C
T_s	Stommens temperatur	°C
Kapacitanser		
C_i	Luftens och inredningens värmekapacitet	J/K
C_s	Stommens värmekapacitet (termiskt batteri)	J/K
Termiska motstånd		
R_{is}	Motstånd mellan luft och stomme	K/W
R_{ie}	Motstånd mellan luft och utomhus (fönster, ventilation, läckage)	K/W
R_{es}	Motstånd mellan stomme och utomhus (väggarnas isolering)	K/W
Effektkopplingar		
β	Andel av kyleffekten som påverkar de modellerade rummen	–
α	Omvandlingsfaktor från solelproduktion till termisk sollast	–
Interna värmelaster		
γ	Fourier-koefficient (sinus-term) för dygnsvariation	W
δ	Fourier-koefficient (cosinus-term) för dygnsvariation	W

3.3.3. Systemidentifiering

Modellens nio okända parametrar, som presenteras i Tabell 1, skattades från historisk driftdata genom att minimera skillnaden mellan modellens simulerade inomhustemperatur och den faktiskt uppmätta temperaturen. Som felmått användes Root Mean Square Error (RMSE), och simuleringen genomfördes i öppen loop över hela träningsperioden. Detta innebär att modellen utgår från ett initialt temperaturvärde och simulerar därefter framåt utan att återställas mot uppmätt data. Detta säkerställer att de skattade parametrarna fångar systemets långsiktiga dynamik och inte enbart kortsiktiga prediktioner. Modellen tränades på data från perioden juni och juli 2024 (cirka 88 000 datapunkter på minutintervall) och validerades därefter på separat data från augusti 2024. Resultaten visade att modellen kunde återge byggnadens temperaturvariationer med god noggrannhet då den uppvisade ett RMSE på 0,47°C för träningsperioden och 0,66°C för valideringsperioden. Ett tidigare publicerat resultat för en liknande grey-box-modell rapporterade 0,89 °C för prediktion av inomhustemperaturen i en kontorsbyggnad (Talib et al., 2023), vilket bekräftar att modellens prediktionsförmåga är representativ.

3.3.4. Verifiering och komfortkrav

Efter att modellen identifierats användes den för att analysera hur den optimerade lastförskjutningen påverkade inomhusklimatet. För de perioder där kylsystemets tillförda effekt försköts i optimeringsmodellen, översattes detta till ett motsvarande förändrat kylbidrag i den termiska modellen. Därefter simulerades hur inomhustemperaturen förändrades över tid. För att säkerställa att lastförskjutningen inte ledde till försämrad termisk komfort i byggnaden jämfördes de simulerade temperaturerna med komfortkravet. Den simulerade temperaturavvikelsen adderas kontinuerligt till den uppmätta temperaturen i *worst case*-rummet. En lastförskjutning bedömdes vara acceptabel om den simulerade temperaturen inte underskred 22,0°C eller överskrider 26,0°C.

Optimeringen genomfördes på kylmaskinens tillförda eleffekt, medan grey-box-modellen använde termisk kyleffekt som insignal. Förskjutningen behövde därför omvandlas via kylmaskinens verkningsgrad (COP) innan den kunde appliceras i den termodynamiska verifieringen. Eftersom kylmaskinernas prestanda är temperaturberoende, då COP sjunker med stigande kondenseringstemperatur (Hundy et al., 2016), approximeras den i modellen enligt $COP(T_{ute}) = a + b \cdot T_{ute}$. Koefficienterna a och b skattas via linjär regression på det empiriska COP-värdet (kvoten mellan total kyleffekt och total tillförd effekt) mot uppmätt utomhustemperatur över hela datamängden. Detta värmeflöde applicerades i grey-box-modellen varpå den resulterande temperaturavvikelsen (ΔT_{mean}) beräknades.

3.3.5. Känslighetsanalys av grey-box-modell

För att validera grey-box-modellens robusthet och undersöka hur stor påverkan varje enskild parameter har på resultatet, genomfördes en känslighetsanalys. Detta gjordes genom att kylmaskinerna var avstängda under det största lastförskjutningsscenariot (tidsfönster på 15 minuter) för en höglastdag (2024-07-23). Detta resulterade i en maximal temperaturavvikelsen till 0,2227°C vilket utgör standardvärdet i analysen. Därefter varierades samtliga okända parametrar med ±10% samt ±20% och utvärderades sedan mot standardvärdet (se Tabell 2).

Tabell 2: *Resultat av känslighetsanalys* ±20%

Parameter	**Fysikalisk betydelse**	**Max avvikelse från standardvärdet**
C_i	Luftens och inredningens värmekapacitet	$\pm 0,0562$ °C
β	Effektiv kyleffekt i zonen	$\pm 0,0445$ °C
R_{is}	Termiskt motstånd (luft till stomme)	$\pm 0,0004$ °C
C_s	Stommens värmekapacitet	$\pm 0,0000$ °C
R_{ie}, R_{es}	Externa termiska motstånd	$\pm 0,0000$ °C
α, γ, δ	Solinstrålning och interna värmelaster	$\pm 0,0000$ °C

Resultaten i Tabell 2 visar att dynamiken vid korta lastförskjutningar primärt dikteras av luftvolymen (C_i) och den direkta kyleffekten (β), men att även stora feluppskattningar av dessa parametrar begränsar felet till $\sim 0,056$ °C. Den tunga massan (C_s) uppvisar noll

märkbar påverkan på den kortsiktiga temperaturförändringen, vilket visar att byggnadens termiska tröghet är tillräckligt stor för att överskugga parameterosäkerheter och möjliggöra en tillförlitlig lastförskjutning.

3.4. Kvantifiering av ekonomisk besparing

För att utvärdera de ekonomiska implikationerna av effekttoppsreduceringen kopplades de tekniska resultaten till den rådande effekttariffmodellen. Den ekonomiska besparingen beräknades utifrån den reducerade toppeffekten av nettoeffekt och den gällande tariffen för effektavgift.

Den potentiella månadsbesparingen i effektavgift beräknas enligt

$$\Delta C = \Delta P_{\text{topp}}(t) \cdot c_{\text{eff}} \tag{6}$$

där ΔP_{topp} är reduktionen i den debiteringsgrundande toppeffekten (kW) och c_{eff} är effektavgiftens pris (kr/kW/månad). Vattenfall som är elnätsbolaget för den aktuella byggnaden baserar sin effektavgift på den högsta medeleffekten över en timme. Priset per kilowatt uppgår till 54 kr/kW.

Det är viktigt att notera att kopplingen mellan den optimerade nettoeffekten och den faktiska debiteringsgrundande toppen kräver ett antagande: att de dagar som analyseras fortsätter, efter optimering, att utgöra den debiteringsgrundande dagen för den aktuella månaden. Eftersom studien reducerar effekttoppar för de tio mest belastande dagarna innebär detta att andra dagar, utanför det analyserade materialet, skulle kunna uppvisa en högre effekttopp efter optimeringen.

3.5. Källkritik

De källor som främst används till denna studie är huvudsakligen peer-reviewed vetenskapliga artiklar och tekniska rapporter. Referenserna till Xu och Haves (2006) och Zanetti et al. (2025) används för att sätta studiens resultat i relation till tidigare forskning om lastförskjutning av kylsystem. Båda dessa referenser berör samma ämne som denna studie, men har tydliga skillnader kopplat till systemkonfiguration och klimat. Båda källorna används med hänsyn till dessa skillnader.

Uppgifter om den studerade fastighetens tekniska specifikationer hämtas från Vasakronan (2025, 2026) genom interna dokument samt samtal. Dessa referenser utgör en viktig del av informationen kopplat till fallstudien, men kan inte oberoende verifieras på samma sätt som publicerad forskning. I kontexten av denna fallstudie anses informationen central, men innebär att resultaten är svåra att generalisera utan tillgång till motsvarande data från andra fastigheter.

Valet av konvex optimering som metod stöds av Georgiou et al. (2019), som granskar optimering i realtid i byggnader. Artikeln sammanfattar resultat från flera andra studier snarare än presenterar egna experimentella resultat.

Grunden för grey-box-modellens struktur och systemidentifiering utgår utifrån Bacher och Madsen (2011), som är en välciterad studie inom termisk byggnadsmodellering. Studiens resonemang kopplat till val av modell ger ett stöd för valet av 3R2C-strukturen i denna studie. Källan bedöms som tillförlitlig, men det bör noteras att den är publicerad 2011 vilket innebär att det kan finnas mer moderna metoder inom ämnet. Trots det ansågs källan vara en bra grund för den valda metoden i denna studie.

Information kopplat till effekttariffer och de ekonomiska incitamenten beskrivs med stöd av Lejestrand (2025) och Nässén (2026), varav den senare är hämtad från en kommersiell aktör. Detta innebär att informationen bör tolkas med viss försiktighet då det kan finnas ett intresse att framställa effekttariffer på ett visst sätt. Informationen används dock enbart för att beskriva strukturerna i allmänna termer. De specifika uppgifterna om tariffer som används i den ekonomiska analysen härstammar från Vasakronans interna dokumentation.

3.6. Metoddiskussion

3.6.1. Verifieringsmodell

Modellstrukturen valdes som kompromiss mellan modelltyper. En rent datadriven black-box-modell skulle ha kunnat uppnå lägre prediktionsfel på träningsdatan, men brister i extrapoleringsförmåga (gissa nästa steg) vid simulering av profiler som ligger utanför den faktiska datan. En detaljerad white-box-modell baserad på fullständig byggnadsgeometri och materialdata var inte realiserbar inom ramen för studien. En begränsning hos den valda strukturen är att den skattade tidskonstanten för stommen blev mycket lång ($\tau_{stomme} \approx 1\,288$ h), vilket innebär att modellen i praktiken approximerar en 1R1C-modell över de relevanta tidsskalorna. För verifiering av lastförskjutningar på 1-15 minuter är detta inte problematiskt, eftersom dynamiken på den tidsskalan domineras av luftvolymens kapacitet, vilket även känslighetsanalysen bekräftar. För längre tidsperspektiv (timmar till dygn) skulle en omkalibrering av modellen krävas.

En central förenkling var att kylmaskinens elektriska effektförskjutning (ΔP_{el}) översattes till en termisk effektförändring (ΔP_{kyla}) via en empiriskt skattad COP. Detta förutsatte att kylmaskinen momentant kunde följa den nya effektprofilen utan tröghet i exempelvis kondensorvattnets temperatur eller kompressorernas reglering. I praktiken finns alltid en viss fördröjning mellan elektrisk styrning och termisk respons, vilket inte fångas av modellen. Effekten av detta antagande bedöms emellertid vara begränsad för analysens tidsskala, eftersom byggnadens termiska tröghet är flera storleksordningar längre än kylsystemets interna responstid. Den temperaturberoende COP-modellen ($COP(T_{ute}) = a + b \cdot T_{ute}$) fångar bara en av flera systematiska variationer i kylmaskinens prestanda. En mer detaljerad modell skulle kräva tillgång till kondensor- och förångartemperaturer på minutintervall, vilket inte ingick i tillgänglig data.

3.6.2. Robusthet i resultaten

Modellen tränades på sommarperioden juni-juli 2024 och validerades på augusti 2024. Den begränsade datagrunden, en sommar, innebär att modellen inte testats över olika år med olika väderförhållanden. Skillnaden mellan tränings-RMSE (0,47°C) och valideringS-RMSE (0,66°C) är tillräckligt litet för att modellens resultat ska kunna appliceras inom samma sommarperiod, men robustheten över längre perioder är inte verifierad. Användningen av mer omfattande träningsdata hade dessutom kunnat möjliggöra en mer precis skattning av β och C_i, vilka enligt känslighetsanalysen är de parametrar som primärt styr verifieringens utfall. För denna studie bedömdes träningsmängden vara tillräcklig, men för att kunna generalisera över flera säsonger hade data över längre tid krävts.

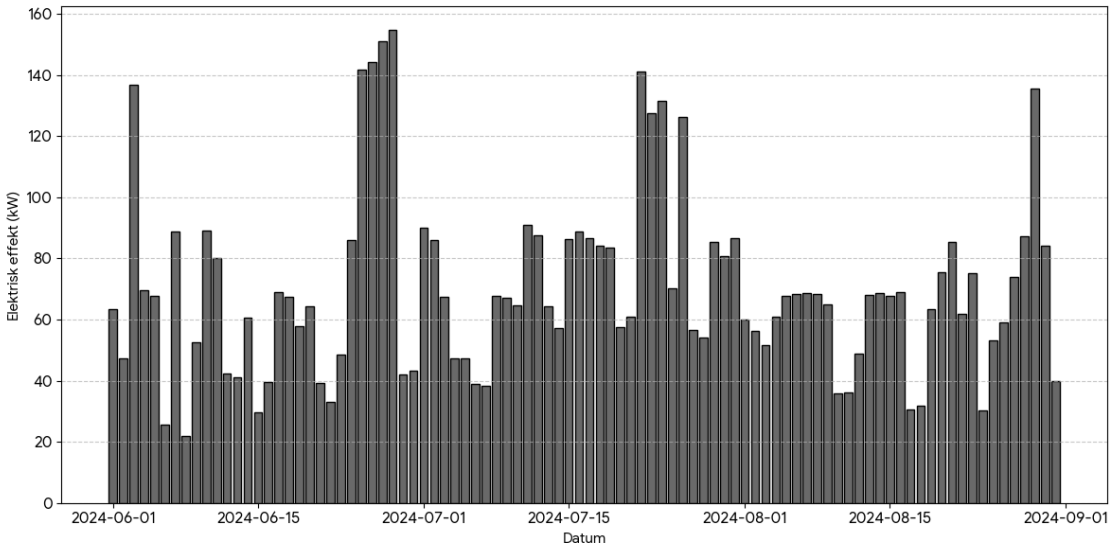
Känslighetsanalysen visade att verifieringens utfall var oföränderlig mot sju av nio modellparametrar. Detta var ett betydelsefullt resultat eftersom det implicerade att verifieringens slutsatser inte kritiskt berodde på att grey-box-modellen är korrekt skattad i absolut mening, utan endast att den fångar förhållandet mellan en kyleffektsförändring och inomhustemperaturens respons. Modellfel som ger 0,66 °C absolut RMSE påverkar inte ΔT-prediktionen i samma utsträckning, eftersom systematiska fel försvinner i differensen mellan original och optimerat scenario. Detta utgör ett av de starkaste argumenten för att grey-box-ansatsen är lämplig för det aktuella verifieringsändamålet.

4. Data

Detta kapitel presenterar det empiriska datamaterial som ligger till grund för studiens optimering och analys. Inledningsvis beskrivs urvalet av de mest belastande höglastdagarna under sommarsäsongen för att rama in perioderna med störst kylbehov (avsnitt 4.1). Därefter analyseras dynamiken mellan kylsystemets tillförda effekt, solcellsanläggningens produktion och den resulterande nettoeffekten mer i detalj utifrån utvalda exempeldagar (avsnitt 4.2). Vidare sammanställs de maximala nettoeffekttopparna för samtliga analysdagar, vilka utgör de kortvariga effekttoppar som optimeringsmodellen syftar till att reducera (avsnitt 4.3). Avslutningsvis presenteras den ekonomiska datan, där de debiteringsgrundande timmedelvärdena fastställs för att möjliggöra en ekonomisk utvärdering av lastförskjutningen baserad på gällande effekttariffer (avsnitt 4.4).

4.1. Höglastdagar under kylsäsongen

Baserat på urvalsmetoden beskriven i avsnitt 3.1.2 identifierades de tio mest belastande dagarna under perioden juni till augusti 2024. Figur 1 visar den maximala tillförda effekten till kylmaskinerna för varje dag under sommarsäsongen och illustrerar hur kylbehovet varierar och när de högsta topparna infaller.



Figur 1: *Figuren visar den högsta eleffekten för kylmaskinerna för varje dag under perioden juni till augusti 2024.*

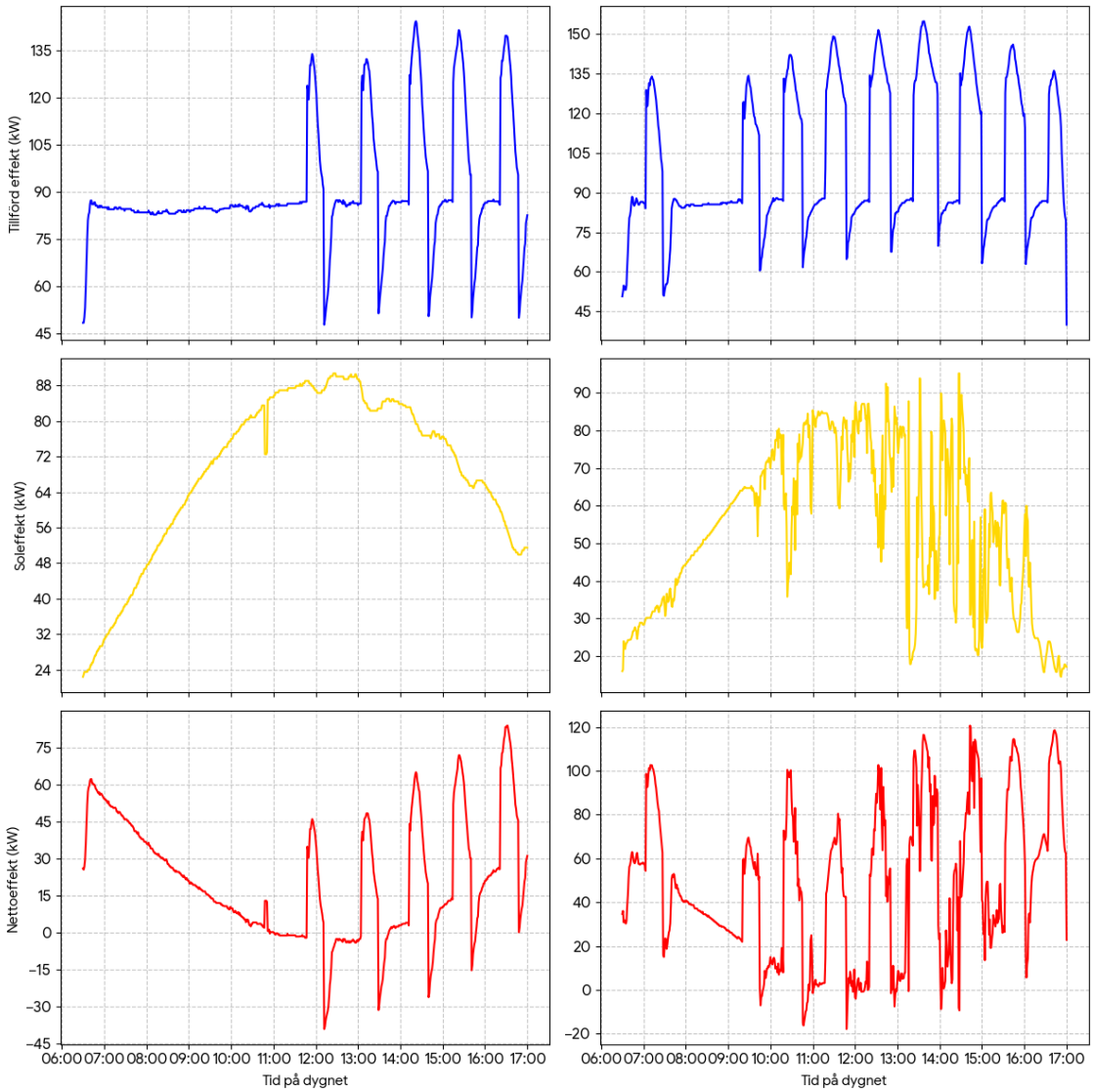
Tabell 3 sammanfattar de tio utvalda höglastdagarna och deras maximala effektuttag. Av fördelningen framgår att fem av de tio höglastdagarna infaller under juni, fyra dagar under juli och en under augusti. Höglastdagarna uppträder dessutom i kluster, exempelvis 25-28 juni och 22-26 juli, vilket är en fördelning med ihållande varma perioder.

Tabell 3: *De tio högsta dagliga effekttopparna för kylmaskinerna under perioden juni till augusti 2024.*

Datum	Tillförd effekt (kW)
2024-06-28	154,8
2024-06-27	151,2
2024-06-26	144,2
2024-06-25	141,8
2024-07-22	141,3
2024-06-03	136,8
2024-08-29	135,7
2024-07-24	131,5
2024-07-23	127,5
2024-07-26	126,2

4.2. Tillförd kyleffekt, soleffekt och nettoeffekt

Figur 2 nedan visar i blått kyleffektuttaget under två höglastdygn; 26 juni och 28 juni 2024. Den 26 juni är det tredje mest belastande dygnet och den 28 juni motsvarar det dygn som belastar perioden allra mest i relation till maximal tillförd effekt. Dessa två exempeldagar karaktäriseras av olika omfattning av oscillationer av tillförd kyleffekt som visualiseras av de blå graferna. Figuren visar även soleffektproduktionen i gult för samma dagar. I figuren illustreras de fluktueringar av solinstrålningen som uppstår till följd av lokala väderförhållanden. I rött visualiseras den resulterande nettoeffekten då solbidraget reducerats från den tillförda kyleffekten, och motsvarar den effektprofil som analyseras i denna studie.



Figur 2: *Figuren visar kylmaskinens tillförda effekt (blå), soleffekt (gul) samt nettoeffekt (röd) den 26 (vänster) och 28 juni (höger) 2024 under dagtid (6:30-17).*

Det oscillerande beteendet hos kylsystemet tillsammans med solens variation av instrålning resulterar i ett varierande effektbehov över dagarna. Denna nettoeffekt har kvarvarande effekttoppar som genom lastförskjutning kan reduceras och på så vis kan driften av kylsystemet i kombination med solcellsanläggningen optimeras.

Jämförelsen mellan de två dagarna belyser två centrala egenskaper hos det studerade systemet. För det första varierar oscillationsmönstret mellan dagarna. Den 26 juni visar en relativt stabilt tillförd kyleffekt under dagens första halva för att sedan uppvisa ett oscillerande kylbehov under dagens andra halva. Den 28 juni uppvisar detta oscillationsmönster under majoriteten av dagen med fler svängningar totalt över perioden. För det andra ser solprofilen olika ut för de studerade dagarna. I figuren framgår det att den 26 juni var en klar dag med relativt jämn solinstrålning, medan sen 28 juni visar en period med större fluktuationer till följd av väderförhållanden. Sammantaget blir det tydligt i grafen för nettoeffekten att dessa variationer får stor betydelse för effektbehovets utseende under

dagen. Denna typ av minutvariationer i kylsystemets nettoeffekt är svår att förutsäga då solinstrålningen varierar snabbt. Detta understryker värdet av att använda faktisk uppmätt driftdata med hög tidsupplösning för både kylbehovet och solinstrålningen för att undersöka reduktionspotentialen i ett sådant variabelt system (Lin et al., 2026).

4.3. Nettoeffektens toppar för samtliga analysdagar

Tabell 3 presenterar de tio höglastdagarna rangordnande efter maximal tillförd effekt. Studiens analysvariabel är nettoeffekten och dess maximala värde under analysdagarna redovisas i Tabell 4 tillsammans med den tillförda effekten till kylmaskinerna vid samma tidpunkt. Dessutom presenteras soleffekten för tidpunkten med maximal nettoeffekt för att illustrera hur solproduktionen kunde reducera den tillförda effekten. Denna reduktion presenteras också i tabellen. Den redovisade nettoeffekten i Tabell 4 utgör den högsta topp som reduceras i optimeringsmodellen för respektive analysdag.

Tabell 4: *Högsta toppar för nettoeffekt under sommaren 2024, motsvarande tillförd effekt till kylmaskinerna och soleffekt vid tidpunkten för toppen, samt procentuell reduktion av effekttoppen från soleffekt.*

Datum	**Nettoeffekt (kW)**	**Tillförd effekt kylmaskin (kW)**	**Soleffekt (kW)**	**Reduktion (%)**
2024-06-28	120,6	151,6	31,0	20,4
2024-07-22	117,2	141,3	24,1	17,1
2024-06-27	116,6	138,0	21,4	15,5
2024-06-25	109,9	131,6	21,7	16,5
2024-06-03	107,9	131,4	23,5	17,9
2024-07-26	99,7	126,2	26,5	21,0
2024-07-23	93,1	114,5	21,4	18,7
2024-08-29	92,4	133,8	41,4	30,9
2024-06-26	83,8	139,1	55,3	39,8
2024-07-24	74,4	125,0	50,6	40,5

Tabellen möjliggör flera observationer. Differensen mellan den tillförda effektens och nettoeffektens toppar varierar mellan dagarna beroende på hur väl solproduktionen sammanfaller med kylproduktionens maximum i tid. Dagar där solproduktionen är som störst när kylbehovet är störst uppvisar en markant lägre nettoeffekt än tillförd kyleffekt. Dagar med större förekomst av moln eller andra variationer uppvisar å andra sidan en nettoeffekt som ligger närmre toppen för den tillförda kyleffekten. Detta illustrerar att solcellsanläggningen redan under nuvarande drift bidrar till att reducera effekttoppar.

4.4. Ekonomisk data

För den ekonomiska analysen behandlas nettoeffekten i systemet utifrån ett timmedelvärde. Priset på effekttoppar i den studerade byggnaden baseras på den högsta uppmätta medeleffekten för en timme och dessa presenteras i tabell 5.

Tabell 5: *Tabellen visar den högsta genomsnittliga nettoeffekten under en timme de 10 mest belastade dygnen under perioden juni till augusti 2024. Detta används för den ekonomiska analysen.*

Datum	**Maximal timmedeleffekt (kW)**
2024-06-28	72,8
2024-06-27	67,6
2024-07-23	56,5
2024-06-03	50,5
2024-08-29	49,6
2024-06-26	45,7
2024-07-22	43,9
2024-06-25	42,0
2024-07-24	31,2
2024-07-26	24,9

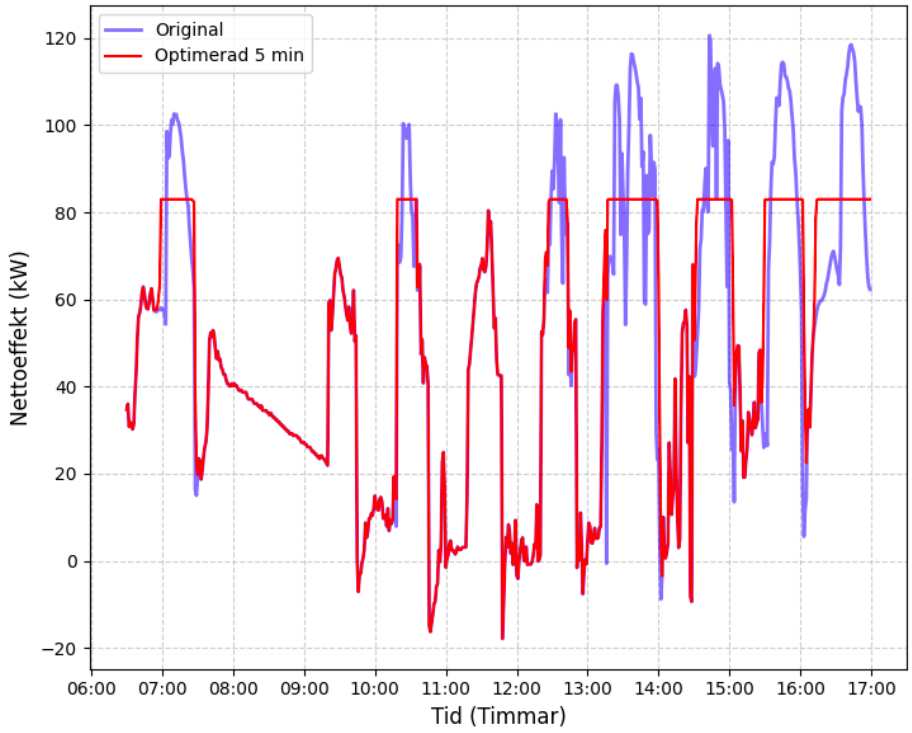
Baserat på tabellen observeras det att timmedeleffekten för kylsystemet i kombination med solcellsanläggningen är betydligt lägre än effekttopparna för minutdata. Detta är främst till följd av de oscillationer som observerats tidigare och är en direkt konsekvens av att den resulterande tillförda kyleffekten varierar kraftigt under korta tidsintervall. Den ekonomiska ansatsen i denna studie ämnar att undersöka om det finns någon ekonomisk potential av att reducera kortvariga effekttoppar, baserat på en debitering som använder medeleffekten över en timme.

5. Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från studiens optimering och termodynamiska verifiering. Inledningsvis presenteras den tekniska reduktionspotentialen för nettoeffektens toppar för samtliga tio analysdagar, samt hur denna potential varierar med storleken på det tillåtna tidsfönstret för lastförskjutning (avsnitt 5.1). Därefter utvärderas hur den optimerade driften påverkar inomhusklimatet via grey-box-modellen, där den simulerade temperaturavvikelsen jämförs mot komfortkraven (avsnitt 5.2). Avslutningsvis kvantifieras den ekonomiska besparingspotentialen baserat på Vattenfalls effekttariff och de optimerade nettoeffekttopparnas timmedelvärden (avsnitt 5.3).

5.1. Potential för effekttoppsreducering

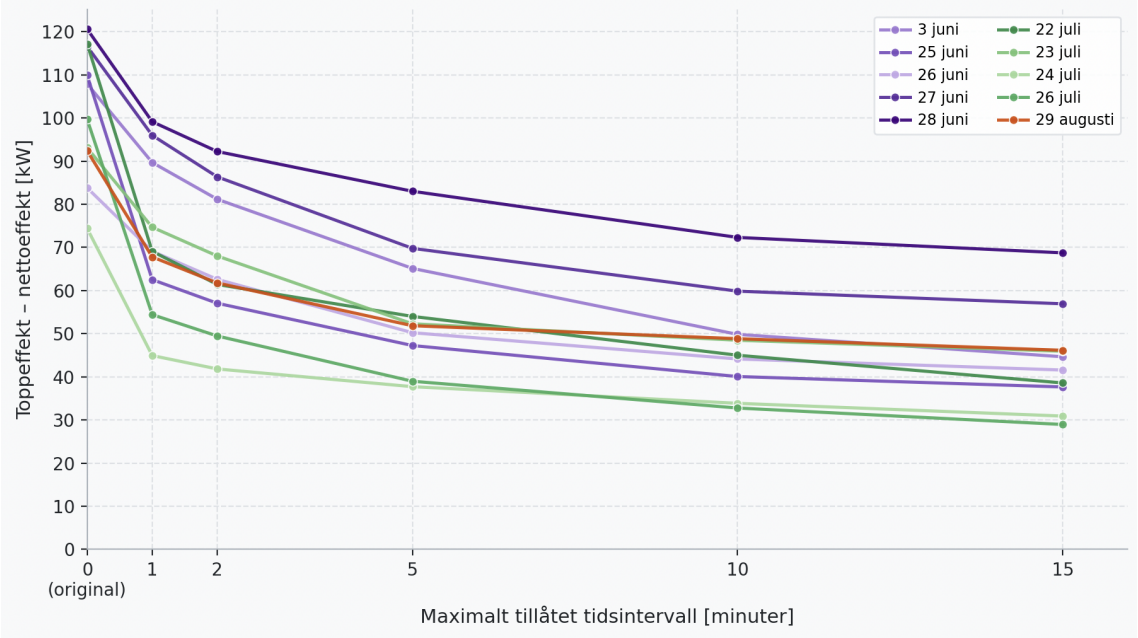
Med konvex optimering som lastförskjutningstrategi kunde nettoeffekttoppar för det solcellsintegrerade kylsystemet reduceras. Ett exempel på hur lastförskjutning påverkade nettoeffekten visualiseras i Figur 3 där ett tidsfönster på 5 minuter implementerades. I blått illustreras den ursprungliga nettoeffekten för kylsystemet i kombination med solcellsanläggningen den 28 juni. I rött visualiseras den resulterande nettoeffekten efter lastförskjutning.



Figur 3: *Visualisering av effekttoppsutjämning för ett tidsspann på 5 minuter*

Figur 4 visar den resulterande toppeffekten av nettoeffekten efter lastförskjutning för

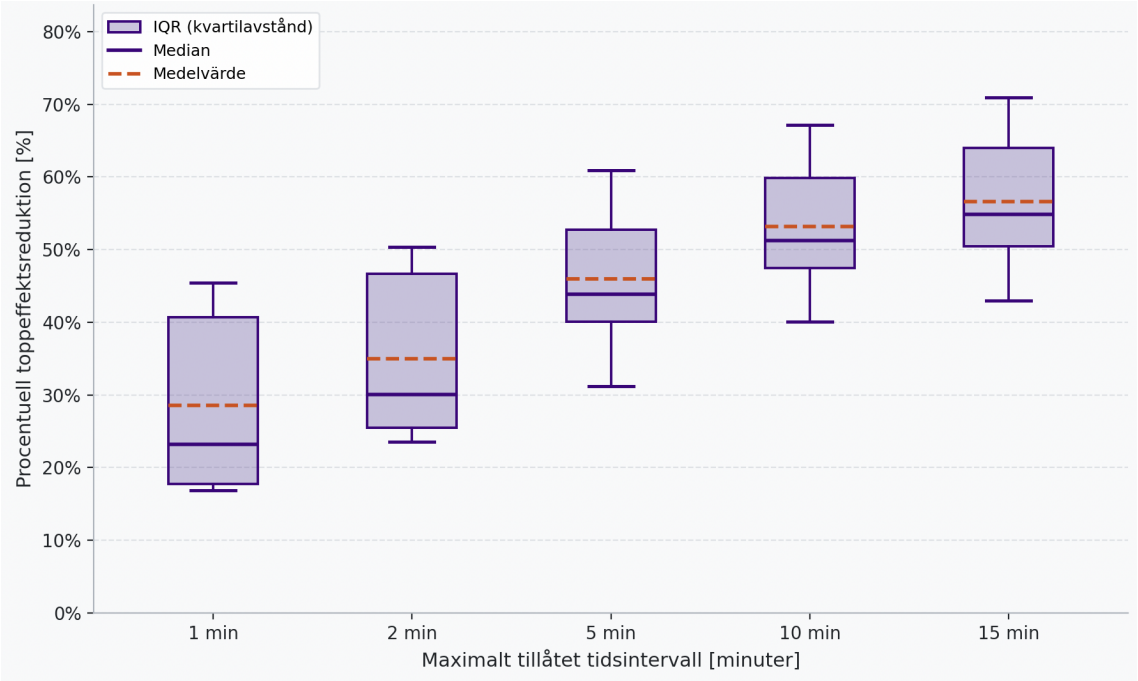
samtliga tio analysdagar för tidsfönster 1, 2, 5, 10 och 15 minuter.



Figur 4: *Figuren visar den resulterande toppeffekten [kW] efter lastförskjutning genom konvex optimering för utvalda tidsfönster. Vid x=0 visas den ursprungliga toppeffekten.*

Tre mönster framträder från resultaten. För det första uppvisar samtliga dagar en avtagande toppeffekt med ökat tidsfönster vilket visar på att lastförskjutningen ger en kontinuerlig reduktion av effekten för alla analyserade dagar. För det andra varierar reduktionspotentialen mellan dagarna då lutning på graferna varierar för de olika dagarna. Det går även att observera att förhållandet mellan dagarna är relativt jämt över tidsspannet och de mest belastande dagarna fortsätter att påvisa högst effekttoppar oavsett tidsspann för lastförskjutningen. Å andra sidan, i några fall, reduceras toppen för en dag såpass mycket att en annan dag påvisar en högre effekttopp efter ett större tidsspann.

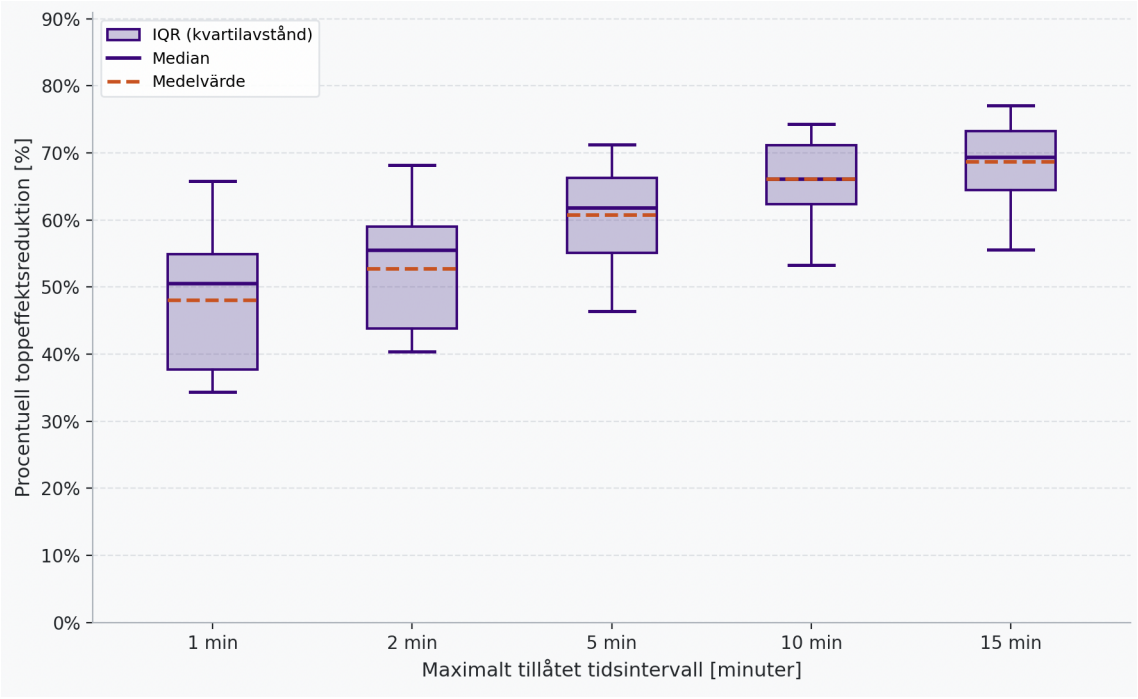
Figur 5 visar den procentuella toppeffektsreduktionen per tidsfönster för samtliga tio analyserade dagar.



Figur 5: *Figuren visar den procentuella reduktionen av toppeffekten genom lådagram för att visa spridningen mellan de analyserade dagarna.*

Från figuren framgår det att vid kortare tidsspann finns en större spridning ovanför medianen, vilket visar på att några dagar har en betydligt större potential för effekttoppsreduktion vid små tidssteg än andra dagar. Då tidsstegen blir större visar figuren att skillnaden mellan den mest reducerade dagen och den minst reducerade dagen, i procentenheter, är relativt jämn för alla tidssteg, och visar en spridning på cirka 30 procentenheter. Dessutom går det att observera att reduktionspotentialen varierar mellan cirka 17 procent till 46 procent för ett tidsfönster på 1 minut, och mellan cirka 43 procent till 71 procent för ett tidsfönster på 15 minuter. Slutligen visar figuren att den genomsnittliga procentuella effekttoppsreduktionen varierar från cirka 28 procent (vid ett tidsfönster på 1 minut) till cirka 56 procent (vid ett tidsfönster på 15 minuter).

Den procentuella reduktionspotentialen som illustreras i Figur 5 demonstrerar hur väl last-förskjutningsstrategin kan kapa nettoeffekttoppar. Ytterligare relevant reduktionspotential relaterar till det ursprungliga kylsystemet. Figur 6 visar hur väl lastförskjutningsstrategin kan kapa toppar av tillförd kyleffekt vid implementering av ett solcellssystem som styrs utifrån den analyserade ansatsen. Detta innebär att den procentuella reduktion som presenteras i figuren relaterar till hur väl effekttoppar för ett kylsystem kan reduceras genom att integreras med en optimerad solcellsanläggning.

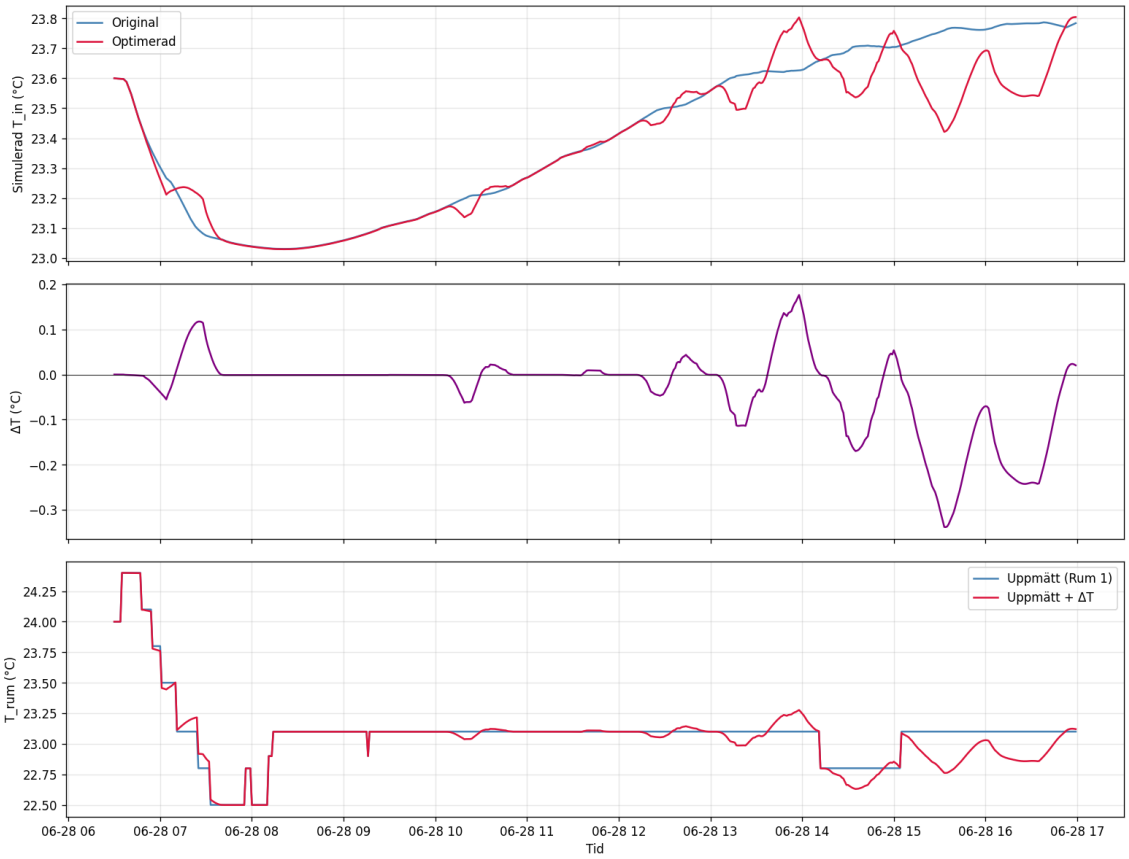


Figur 6: *Reduktionspotential för kylsystemet*

Från figuren avläses att reduktionspotentialen för lastförskjutning under ett tidsintervall på 1 minut varierar mellan cirka 34 procent och 66 procent för de olika analyserade fallen. För ett tidsfönster på 15 minuter varierar reduktionspotentialen mellan cirka 55 procent och 77 procent. Medelvärdet för denna potential varierar mellan cirka 48 procent (1 minut) och 69 procent (15 minuter). Från figuren är det tydligt att ökningen av potentialen avtar när tidsfönstret blir större. Skillnaden mellan reduktionen för ett tidsfönster på 10 minuter och 15 minuter är betydligt mindre än för de kortare tidsintervallen. Detta tyder på en mättnad av reduktionspotentialen för det solcellsintegrerade kylsystemet.

5.2. Utvärdering av inomhustemperatur

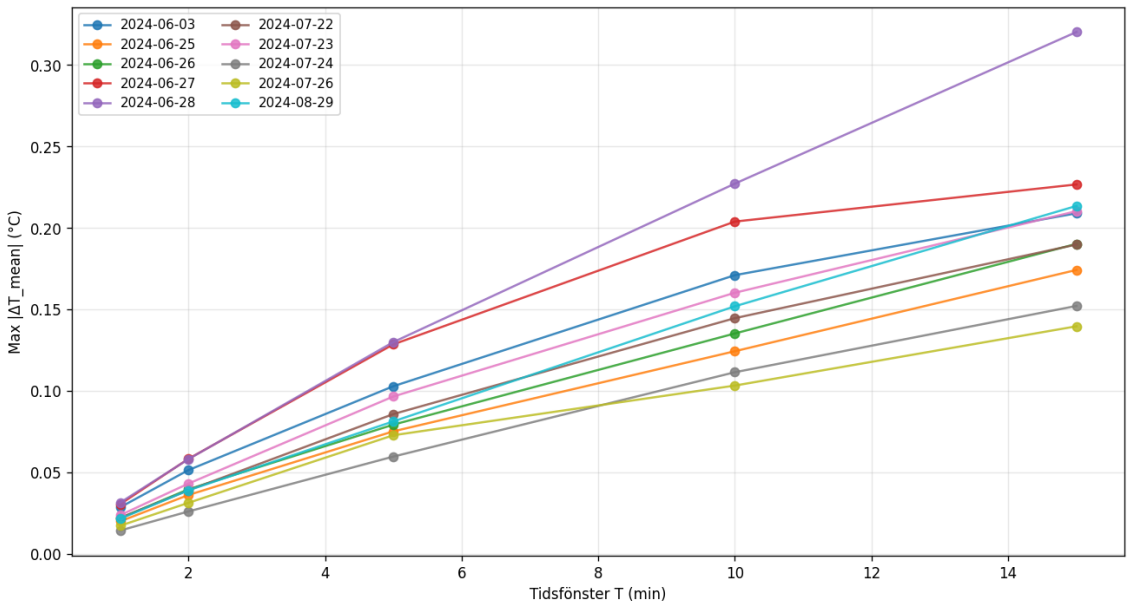
För att utvärdera hur lastförskjutningen påverkar inomhusklimatet utvärderas samtliga förändringar av nettoeffekten med grey-box-modellen. Figur 7 visar hur den faktiska inomhustemperaturen i ett genomsnittligt rum den 28 juni 2024 påverkas av lastförskjutning med ett tidsfönster på 15 minuter. I den översta grafen visas grey-box-modellens prediktion av den genomsnittliga temperaturen i byggnaden (blått) samt den predikterade temperaturen i byggnaden med den lastförskjutna nettoeffekten (rött). Grafen i mitten illustrerar modellens prediktion av temperaturförändringen till följd av lastförskjutningen sett över hela dagen 28 juni. Grafen i slutet visar modellens beräknade temperaturförändring, applicerat på det varmaste rummet från urvalet.



Figur 7: *Figuren visar grey-box-modellens förväntade utfall av lastförskjutningen (överst), den totala förväntade temperaturavvikelsen (mitten) samt temperaturavvikelsen applicerad på ett faktiskt rum i byggnaden (längst ned)*

Sammantaget visar figuren att temperaturen förväntas avvika från ursprungstemperaturen med maximalt 0,34°C men att exempelrummet i sista grafen fortfarande uppvisar temperaturer inom ett rimligt intervall för komfortkraven. Från figuren ses att den största temperaturförändringen i detta fall är negativ. Detta är en direkt konsekvens av att lastförskjutningen tidigarelägger tillförd kyleffekt. Vid validering av resultaten av temperaturförändringen uppvisade samtliga rum, som uppfyllde komfortkraven innan lastförskjutning, ingen avvikelse från komfortgränserna.

Figur 8 sammanställer hur den genomsnittliga temperaturen i byggnaden maximalt påverkas av lastförskjutningen för de olika tidsstegen, baserat på grey-box-modellens resultat. Detta används för att visa på hur lastförskjutning av effekt under korta tidsperioder kan påverka inomhusklimatet i byggnaden för samtliga analyserade fall.



Figur 8: *Figuren visar den maximala temperaturförändringen i byggnaden för de analyserade dagarna för respektive tidsfönster*

Från figuren visas att den 28 juni påvisar den störta temperaturförändringen i byggnaden som vid ett tidsfönster på 15 minuter uppgår till cirka 0,34°C. För den 26 juli förändrades temperaturen maximalt med cirka 0,14°C vid ett tidssteg på 15 minuter. Vid ett tidssteg på 1 minut framgår det av figuren att temperaturförändringen i rummet förväntas vara försumbar.

5.3. Potential för ekonomisk besparing

För de ekonomiska resultaten behandlas nettoeffekten sett till ett medelvärde för den högst belastade timmen under de analyserade dagarna. Tabell 6 redovisar den reducerade maximala medeltoppeffekten under en timme efter optimeringen för varje tidsfönster och månad. Detta utgör det debiteringsgrundande underlaget för den ekonomiska analysen.

Tabell 6: *Reducerad toppeffekt under juni-augusti för olika tidsfönster.*

Tidsfönster (min)	**Red. effekt juni (kW)**	**Red. effekt juli (kW)**	**Red. effekt augusti (kW)**
1	0	0	+1,2
2	+1,2	0	+1,9
5	+3,2	-4,2	+2,2
10	-0,5	-8	-0,8
15	-4,1	-10,6	-3,4

Tabellen visar att för små tidsfönster ökar, eller förblir oförändrad, den maximala medeltoppseffekten för den debiteringsgrundande dagen för respektive månad. Vid större tidsfönster visar tabellen att medeleffekten minskar något för de tre månaderna.

Den ekonomiska analysen baseras på Vattenfalls effekttariff om 54 kr/kW, där debiteringsunderlaget utgörs av den högsta uppmätta timmedeleffekten under månaden. För varje månad har den dag vars optimerade nettoeffekt som utgör den debiteringsgrundande toppen identifierats. Reduceringen av nettoeffekttopparna presenteras i Tabell 6. För alla månader är samma dag debiteringsgrundande oberoende av optimeringsfönster. Dessa dagar är 28 juni, 23 juli och 29 augusti.

Tabell 7 redovisar besparingsmöjligheten för sommarperioden 2024.

Tabell 7: *Ekonomisk besparing för perioden juni-augusti 2024, med effekttariff: 54 kr/kW. Beräknad som summan av månatliga besparingar under tre månader. Se not om tolkning (15 minuter data)*

Tidsfönster (min)	**Juni kr**	**Juli kr**	**Augusti kr**	**Total besparing kr**
1	0	0	-64,8	-64,8
2	-64,8	0	-102,6	-167,4
5	-172,8	226,8	-118,8	-64,8
10	27	432	43,2	502,2
15	221,4	572,4	183,6	977,4

Not: Besparingarna avser den reducerade effekttoppens värde i förhållande till Vattenfalls effekttariff (54 kr/kW). Beräkningen förutsätter att de analyserade höglastdagarna utgör de debiteringsgrundande topparna för respektive månad. I den mån lastförskjutningen sänker dessa toppar kan dagar utanför det analyserade materialet bli debiteringsgrundande, vilket innebär att den faktiska besparingen kan vara lägre än vad tabellen anger.

Tabellen visar en negativ total besparing vid lastförskjutning mellan 1-5 minuter och en positiv besparing mellan 10-15 minuter. Detta innebär att timmedeleffekten efter lastförskjutningen på minutnivå faktiskt blev högre och resulterade i en dyrare effektavgift för lastförskjutning under korta tidsintervall. Detta beror på att medeleffekten beräknas från timomslaget (det vill säga från exempelvis 12:00-13:00) och i dessa fall har effekt förskjutits över timgränsen. Vid större omfördelningar av effekt, för tidsfönster mellan 10 och 15 minuter, reduceras medeleffekten för den mest belastande timmen något.

6. Diskussion

I detta kapitel diskuteras studiens resultat i relation till de forskningsfrågor som formulerades i avsnitt 1.1, den teoretiska bakgrunden i kapitel 2 samt metodvalen i kapitel 3. Diskussionen inleds med en tolkning av den tekniska reduktionspotentialen hos systemet (avsnitt 6.1) och fortsätter med en analys av den tekniska reduktionspotentialen i ett bredare perspektiv för kylsystem (avsnitt 6.2). Därefter relateras resultaten till tidigare studier (avsnitt 6.3). I efterföljande del diskuteras den fysikaliska realiserbarheten via termisk tröghet (avsnitt 6.4). Diskussionen fortsätter därefter med att resonemang kring de ekonomiska implikationerna av reduktionen (avsnitt 6.5) . Avslutningsvis diskuteras studiens praktiska implikationer och förslag till vidare forskning (avsnitt 6.6).

6.1. Reduktionspotential för solcellsintegrerade kylmaskiner

Reduktionspotentialen för solcellsintegrerade kylsystem illustreras i Figur 4 och 5. Figurerna visar att lastförskjutning ger en konsekvent och betydande reduktion av nettoeffektens topp för samtliga tio analysdagar, och reduktionspotentialen ökar med tidsfönstrets storlek. Reduktionen varierar från i genomsnitt 28 procent vid ett tidsfönster på 1 minut till 56 procent vid 15 minuter, med specifika maxvärden för dagarna på 46 procent respektive 71 procent. Att reduktionen är jämn i tidsfönstret är ett förväntat resultat eftersom ett större tidsfönster utgör en svagare bivillkorsmängd, detta då varje optimum för tidsspannet 1 minut även är tillåtet i optimeringsproblemet med tidsspannet 15 minuter, men inte tvärt om.

En teoretiska undre gräns för toppeffekten diskuteras i avsnitt 3.2 och beskrivs där som konvergerande mot medeleffekten, vilket är en relevant referensram. Tidsfönstret på 15 minuter uppvisade i genomsnitt 56 procent reduktion och detta antyder att en betydande del av oscillationerna dämpats, men inte eliminerats helt. Detta är förenligt med litteraturen (Xu & Haves, 2006; Zanetti et al., 2025) kopplat till lastförskjutning på timskala där ytterligare reduktionspotential kunde påvisas. Denna potential förutsätter troligtvis andra mekanismer än den minutbaserade utjämningen som denna studie undersöker, men är en intressant aspekt av effekttoppsreduktion inom solcellsintegrerade kylsystem.

Låddiagrammet i Figur 5 uppvisar en spridning på cirka 30 procentenheter mellan den dag som reducerades mest och den som reducerades minst, oavsett tidsfönster. Denna spridning indikerar att det skulle kunna finns något som karakteriserar en dag med hög respektive låg reduktionspotential.

6.2. Reduktionspotential sett till det ursprungliga kylsystemet

Hittills har diskussionen berört hur lastförskjutningen reducerar nettoeffektens toppar, det vill säga hur effektprofilen ser ut efter att solcellsproduktionen redan dragits av. Det är även värdefullt att belysa reduktionspotentialen sett till det ursprungliga kylsystemets tillförda effekt, det vill säga den kombinerade effekten av solcellsintegrering och optimerad drift. Denna dimension illustreras i Figur 6 och ger studien ett mer generellt perspektiv, relevant för bedömning av hur väl optimerad drift av ett kylsystem kan sammanfalla med solcellsproduktion.

Figuren visar att den totala reduktionen av kylsystemets effekttopp, relativ den ursprungliga tillförda effekten utan solceller eller driftoptimering, varierar mellan 34 och 66 procent vid ett tidsfönster på 1 minut, med ett medelvärde på cirka 48 procent. Vid ett tidsfönster på 15 minuter ökar intervallet till 55-77 procent med ett medelvärde på cirka 69 procent. Mönstret att förbättringstakten avtar med längre tidsfönster kvarstår, men är tydligare i detta fall. Skillnaden mellan 10- och 15-minutersfönstren är väldigt liten, vilket antyder att reduktionspotentialen börjar mättas när tidsfönstret överstiger 10 minuter.

Solcellsanläggningen bidrar i sin grundapplicering redan med en substantiell reduktion av kylmaskinernas nettolast (15-40 procent beroende på dag, se Tabell 4). Lastförskjutningarna bidrar med ytterligare reduktion av de kvarvarande topparna. Resultaten illustrerar därmed att solceller och en optimerad drift av kylsystem har en stor potential att kombineras.

En intressant observation är att dagarna med störst solbidrag vid nettoeffekttopparna (24 juli och 26 juni, se Tabell 4) uppvisar en lägre reduktionspotential för nettoeffekttopparna (Figur 4). Detta är främst till följd av att nettotopparna för dessa dagar redan dämpas kraftigt av solcellerna, och att den återstående optimeringspotentialen fördelas på en relativt lägre topp. Dagar med mer molnigt väder, där solbidraget är lägre, lämnar kvar en högre nettotopp men har generellt en profil med tydligare kortvariga oscillationer.

Sett i ett bredare perspektiv kan Figur 6 bidra till en mer generell diskussion om hur kylsystem i kommersiella fastigheter kan utformas och styras för att maximera egenanvändningen av lokalt producerad solel. Att ett befintligt system, utan implementering av ny teknisk utrustning eller energilager, kan reducera effekttoppen med i genomsnitt nästan 70 procent vid ett 15-minutersfönster stöder slutsatsen från Yuan et al. (2026) om att termisk tröghet och koordinerad efterfrågestyrning kan ersätta delar av den funktion som traditionellt kräver aktiva batterilager. Huruvida denna styrning är ekonomiskt försvarsbar diskuteras senare.

6.3. Resultaten i relation till tidigare forskning

Tidigare studier av efterfrågestyrning på kylsystem visar reduktioner på 49-71 procent (Zanetti et al., 2025). Vid en första anblick framstår denna studies maximala reduktion på cirka 71 procent vid ett tidsfönster på 15 minuter som jämförbar med litteraturen. En

sådan jämförelse är i detta fall missvisande eftersom dem refererade studiens tidsfönster är timslånga, medan denna studie undersöker betydligt kortare tidsfönster. En bättre tolkning av resultaten är att den tidigare studien utnyttjar byggnadens fulla termiska tröghet för att förskjuta last över hela dygnet och troligtvis behandlar effekttoppar med lägre amplitud. Denna studie utnyttjar enbart den tröghetsmarginal som ryms inom ±15 minuter, men för en effektprofil med kraftiga oscillationer.

Att en så pass kort förskjutning räcker för att reducera toppen med drygt hälften pekar mot en fundamental egenskap hos det studerade systemet. Denna egenskap är att en stor andel av effekttopparna utgörs av snabba transienter (tillfälliga) snarare än ihållande höglastperioder. Detta är förenligt med Yuan et al. (2026), som visar att samordnad efterfrågestyrning kan öka egenanvändningen av solel och minska driftkostnader med över 15 procent utan aktiva energilager. Samtidigt understryker det att den minutbaserade ansatsen i denna studie kompletterar den timbaserade litteraturen då den studerade minutbaserade lastförskjutningen visar på liknande reduktionspotential hos ett solcellsintegrerat kylsystem.

Den tidigare forskningen som visar att kylefterfrågan och solproduktion är säsongmässigt korrelerade (Henning et al., 2013; Shimomura, 2025) bekräftas från Tabell 4. Tabellen visar att solcellsanläggningens bidrag reducerar effekttopparna, utan styrning av driften för kylmaskinerna, med mellan 15,5 procent (27 juni) och 40,5 procent (24 juli). Variationen mellan dessa värden visar dock att den momentana matchningen är långt ifrån perfekt, vilket är just den variationen som denna studies optimering använder. Att solcellsanläggningen är monterad i flera väderstreck (avsnitt 2.7) ger en jämnare produktion över dagen, men löser inte problemet att kortvariga variationer av väderförhållandet såsom moln, skapar obalanser och resulterar i effekttoppar för nettoeffekten.

6.4. Fysikalisk realiserbarhet och termisk komfort

Lastförskjutningens praktiska realiserbarhet förutsätter enligt avsnitt 2.5 att byggnadens termiska tröghet kan absorbera kortvariga avvikelser i tillförd kyleffekt utan att inomhusklimatet under- eller överstiger de gränser som specificeras i Vasakronans interna riktlinjer (24 grader ±2 grader). Resultaten i figur Figur 7 visar att den maximala simulerade temperaturförändringen vid ett 15-minutersfönster uppgår till cirka 0,34 grader den 28 juni. För kortare tidsfönster är förändringen försumbar. Detta är ett stöd för antagandet i avsnitt 1.2 om att de simulerade lastförskjutningarna kan absorberas av byggnadens termiska massa utan märkbar inverkan på inomhusklimatet.

Resultatet är även relaterbart till Le Dréau och Heiselberg (2016) som visar att vissa kontorsbyggnader uppvisar ett tidsfönster för lastförskjutningen utan komfortpåverkan. Att 1 till 15-minuters förskjutningar i denna studie ger temperaturförändringar långt under det tillåtna intervallet är därmed inte överraskande, men förstärker robustheten i slutsatsen.

En relevant aspekt av den minimala temperaturpåverkan vid lastförskjutning över 15 minuter är att studera större tidsfönster i framtida arbeten. Detta då byggnadens termiska

kapacitet verkar kunna utnyttjas ytterligare för större tidsfönster. Detta motiverar att den övre gränsen för flexibilitet i den studerade fastigheten sannolikt sätts av andra faktorer än komfortkrav, såsom kylmaskinernas dynamik vid start och stopp eller ackumulatortankens kapacitet, vilka ligger utanför studiens omfattning.

6.5. Ekonomiska implikationer och avvikelser mellan teknisk och ekonomisk potential

Trots att effektreduktionen på minutnivå når mellan 28-56 procent i genomsnitt, är den ekonomiska besparingen under sommaren begränsad. Anledningen till detta är strukturellt inbyggt i hur Vattenfalls effekttariffer är konstruerade då debiteringsunderlaget utgörs av den högsta genomsnittliga nettoeffekten under en timme. Detta innebär att tariffmodellen fungerar som ett filter på den faktiska effektprofilen, där transienter filtreras bort.

En direkt konsekvens av denna konstruktion är att de analyserade tidsintervallen 1-5 minuter inte ger någon ekonomisk effekt, eftersom omfördelningarna sker på en tidsskala som är betydligt kortare än den period som bestämmer debiteringsunderlaget. Det negativa besparingarna som påvisas i Tabell 6 indikerar att omfördelningen av last inom ett snävt tidsfönster kan skapa en marginellt jämnare men något bredare lastprofil, vilket kan höja timmedelvärdet något för enstaka dagar.

Först vid tidsfönster på 10-15 minuter börjar optimeringen ge ett mätbart genomslag i timmedelvärdet. För att 15-minutersfönster uppnås en total sommarbesparing om 977 kr fördelade på de tre månaderna. Att de ekonomiska resultaten uppvisar relativt låga besparingar kan förklaras av att effekttopparna som reduceras egentligen bara flyttas till en närliggande dal i nettoeffektkurvan som redan var en del av medeleffekten. Detta innebär att trots att driftstyrningen som analyseras i denna studie kan kapa faktiska toppar, motsvarar dessa reduktioner små förändringar för de ekonomiska resultaten.

Denna skillnad mellan teknisk och ekonomisk potential innehåller två centrala delar. För det första visar den att det finns ett strukturellt gap mellan teknisk och ekonomisk lastförskjutningspotential, ett gap som är inneboende i utformningen av den svenska effekttariffen. Den nuvarande tariffmodellen är konstruerad för att motverka ihållande perioder med högre last snarare än kortvariga toppar. För det andra innebär det att fastighetsägare med högfrekventa effekttoppar får relativt låga ekonomiska incitament att investera i lastförskjutning för korta perioder trots att den tekniska potentialen är betydande. Detta fördjupar diskussionen i avsnitt 2.2 om att effekttariffer fungerar som ekonomiska incitament för reduktion av effekttoppar. Incitamentets form, baserat på ett medelvärde över en timme, avgör vilken typ av flexibilitet som tillåts. Resultatet visar att minutbaserad effektreduktion inte stöds av effekttariffens utformning i dagsläget.

Detta motiverar en bredare diskussion om tariffutformning. Om framtida tariffer baserades på kortare medelvärdesperioder skulle den ekonomiska potentialen i studiens tekniska resultat realiseras i betydligt högre grad. Studien kan på så vis ses som en kartläggning av

flexibilitetspotential för effekttoppar som befintlig tariffstruktur inte beaktar.

6.6. Praktiska implikationer och vidare forskning

Sett som helhet visar studien att solcellsintegrerade kylsystem i kommersiella fastigheter har en betydande teknisk potential för effekttoppsreducering genom kortvarig lastförskjutning. Däremot visar även studien att den ekonomiska potentialen under nuvarande tariffstruktur är begränsad.

För fastighetsägare är resultaten relevanta som underlag för att kvantifiera värdet av kortvarig styrning av tillförd effekt för att matcha solproduktionen, innan andar typer av investeringar övervägs. Resultatet att även ett 1-minuters tidsfönster ger en reduktion på i genomsnitt 28 procent indikerar att enkla regelbaserade strategier, exempelvis påkoppling av slavmaskinen vid solinstrålningstoppar, kan fånga upp en betydande del av av flexibilitetspotentialen. För Vasakronan specifikt ligger studien i linje med bolagets uttalade strategi om topplastkapning (avsnitt 2.8), men antyder samtidigt att det ekonomiska fördelarna främst kommer från något längre tidsfönster. För elnätsbolag och beslutsfattare pekar studien på att utformningen av medelvärdesperioden i effekttariffen påverkar vilken typ av flexibilitet som kan anses relevant. Syftet med effekttariffen är att minska elnätets toppbelastning, men för att fånga mer kortvariga effekttoppar bör tarifferna baseras på medelvärdet för kortare perioder.

Tre konkreta riktningar för vidare forskning har identifierats. För det första vore en utvidgning till modellprediktiv styrning med realistiska prognosfel ett nästa steg. Detta då det är relevant att förstå skillnaden mellan studiens teoretiska potential och praktisk realtidsprestanda. För det andra bör en fördjupad termodynamisk analys av kylmaskinens dynamik, såsom variation av verkningsgrad, kostnader relaterat till start och stopp av kylmaskiner samt ackumulatortankens roll, integreras i optimeringen för att ge en mer realistisk uppskattning av den faktiska flexibilitetspotentialen. För det tredje vore en jämförande fallstudie över flera byggnader med olika systemkonfigurationer värdefull för att undersöka i vilken utsträckning resultaten är generaliserbara eller fastighetsspecifika.

Sammantaget bidrar denna studie med en kvantitativ kartläggning av minutbaserad flexibilitetspotential i ett solcellsintegrerat kylsystem. Dessutom bidrar den med en tolkning av varför denna potential endast delvis kan realiseras under nuvarande ekonomiska incitament. Resultaten ger därmed ett underlag för fastighetsägares beslut om huruvida driftoptimering anses lönsamt för verksamheten. Dessutom öppnar de upp för en bredare diskussion om hur framtida tariffstrukturer bör utformas för att utnyttja den lokal flexibilitet som finns inbyggd i existerande byggnaders termiska tröghet och avlasta elnätet.

7. Slutsatser

Denna studie har undersökt potentialen för effekttoppsreducering i ett solcellsintegrerat kylsystem för en kommersiell fastighet i Uppsala, med lastförskjutning som driftstrategi. Nedan besvaras studiens tre forskningsfrågor, och följs av övergripande slutsatser om metodens räckvidd och begränsningar.

Den första forskningsfrågan *"I vilken utsträckning kan effekttoppar av solcellsintegrerade kylsystem reduceras genom lastförskjutning?"* besvaras genom att denna studie visar att lastförskjutning konsekvent reducerar nettoeffektens toppar för samtliga tio analyserade höglastdagar. Studien visar även att reduktionspotentialen ökar med ett större tidsintervall för lastförskjutning. Den genomsnittliga reduktionen av nettoeffektens topp varierar från 28 procent vid ett tidsfönster på 1 minut till 56 procent vid 15 minuter. Spridningen mellan dagarna är dock betydande, vid ett tidsfönster på 1 minut varierar reduktionen mellan 17 och 46 procent, och vid 15 minuter mellan 43 och 71 procent. Denna variation förklaras främst av oscillationsmönstrets karaktär, då de dagar med snabba kortvariga toppar i effektprofilen uppvisar högre reduktionspotential vid korta tidsfönster eftersom lasten enkelt kan förskjutas till intilliggande dalar. Dagar med bredare och mer ihållande toppar kräver längre tidsfönster för att ge motsvarande effekt.

Sett till kylsystemets ursprungliga effekttopp, utan solcellernas bidrag, visar resultaten att den kombinerade effekten av solcellsintegrering och optimerad lastförskjutning reducerar topplasterna med i genomsnitt 48 procent vid ett tidsfönster på 1 minut och 69 procent vid 15 minuter. Detta illustrerar att solceller i kombination med optimerad drift av kylmaskiner uppvisar en stor potential för effekttoppsutjämning av kylsystem. Solcellsanläggningen reducerar i sin grundkonfiguration nettolasten med 15-40 procent beroende på dag, och lastförskjutningen hanterar de kortvariga variationer som kvarstår till följd av väderförhållanden och variationer av den tillförda kyleffekten. Reduktionstakten avtar när tidsfönstret ökar, då effektprofilen konvergerar mot medeleffekten.

Den andra forskningsfrågan *"Vilken påverkan har dessa lastförskjutningar på inomhusklimatet?"* besvaras genom den termodynamiska analysen via grey-box-modellen som visar att dessa lastförskjutningar är fysikaliskt genomförbara utan att inomhusklimatet påverkas i betydande utsträckning. Den maximala simulerade temperaturavvikelsen uppgår till 0,34° vid ett tidsfönster på 15 minuter, och vid kortare tidsfönster är temperaturpåverkan i stort sett försumbar. Vid validering av resultatet på befintliga rum i fastigheten kunde komfortkravet bekräftas. Byggnadens termiska tröghet utgör därmed en tillräcklig buffert för de minutbaserade lastförskjutningarna som analyseras i studien, vilket bekräftar det grundläggande antagandet om att kortvariga justeringar av tillförd kyleffekt kan genomföras utan märkbar inverkan på termisk komfort.

Den tredje forskningsfrågan *"Vilka ekonomiska implikationer kan denna typ av driftop-*

timering medföra i form av minskade effektavgifter" ger ytterligare förståelse för det driftoptimerade solcellsintegrerade kylsystemet. Den ekonomiska analysen visar att den tekniska reduktionspotentialen inte direkt översätts till ekonomisk besparing under rådande tariffstruktur. Vattenfalls effekttariff innebär att debiteringsunderlaget fungerar som ett filter på effektprofilen och den ekonomiska effekten av minutbaserad optimering blir marginell.

För tidsfönster upp till 5 minuter ger lastförskjutningen ingen eller svagt negativ ekonomisk effekt då timmedelvärdet ökar något för vissa driftfall som en konsekvens av att omfördelningen skapar en bredare men något jämnare lastprofil. Först vid tidsfönster på 10-15 minuter uppnås en mätbar reduktion av timmedelvärdet, vilket ger en positiv ekonomisk besparing. Den totala besparingen för sommarperioden juni-augusti 2024 uppgår till 977 kr vid ett 15-minutersfönster.

Skillnaden mellan teknisk och ekonomisk potential är inte ett tecken på att lastförskjutningen som strategi saknar värde, utan ett resultat av att tariffen inte är utformad för att begränsa de effekttoppar som denna studie analyserar. Om debiteringsunderlaget i framtida tariffer baseras på kortare medelvärdesperioder skulle den ekonomiska besparingen för reduktion av korta effekttoppar öka och i högre grad motsvara den tekniska potentialen.

Studien bidrar därmed med ett kvantitativt underlag för fastighetsägares beslut om minutbaserad driftoptimering av solcellsintegrerade kylsystem och för en bredare diskussion om hur framtida tariffstrukturer bör utformas för att reflektera den flexibilitet som finns inbyggd i befintliga byggnaders termiska tröghet.

Referenser

Arteconi, A., Hewitt, N.J. & Polonara, F. (2012). State of the art of thermal storage for demand-side management. *Applied Energy*, 93, s. 371–389. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.045 [Hämtad 12 april 2026].

Bacher, P. & Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43(7), s. 1511–1522. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005 [Hämtad 20 april 2026].

Boverket (2024). *Termiskt klimat*. Tillgänglig på: https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/ [Hämtad 4 maj 2026].

Causone, F., Corgnati, S-P., Filippi, M. & Olesen, B-W. (2010). Solar radiation and cooling load calculation for radiant systems: Definition and evaluation of the Direct Solar Load. *Energy and Buildings*, 42(3), s. 305–314. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.008 [Hämtad 10 maj 2026].

Dai, M., Li, H. & Wang, S. (2025). Cooling management and control of buildings for unlocking demand flexibility: A comprehensive review on the objectives, objects and methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 224, 116140. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116140 [Hämtad 20 april 2026].

Duarte, C., Van Den Wymelenberg, K. & Rieger, C. (2013). Revealing occupancy patterns in an office building through the use of occupancy sensor data. *Energy and Buildings*, 67, s. 587–595. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.062. [Hämtad 4 maj 2026].

Electric Power Research Institute (EPRI) (2021). *Perfect foresight optimization*. Tillgänglig på: https://storagewiki.epri.com/index.php/DER_VET_User_Guide/Model_Details/Perfect_Foresight_Optimization [Hämtad 4 maj 2026].

Elum Energy (2026). *Peak Shaving: Using Battery Storage & Solar to Reduce Peak Load*. Tillgänglig på: https://elum-energy.com/blog/peak-shaving-solar-energy-storage-methods-to-reduce-peak-load/ [Hämtad 24 april 2026].

Foucquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L. & Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, s. 272–288. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004 [Hämtad 20 april 2026].

Georgiou, G., Christodoulides, P. & Kalogirou, S. (2019). Real-time energy convex

optimization, via electrical storage, in buildings – A review. *Renewable Energy*, 139, s. 1355–1365. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.003 [Hämtad 25 april 2026].

Heidelberg Materials (u.å.). *Tekniska egenskaper – betong*. Tillgänglig på: https://www.betong.heidelbergmaterials.se/sv/tekniska-egenskaper [Hämtad 4 maj 2026].

Henning, H.-M., Motta, M. & Mugnier, D. (2013). *Solar Cooling Handbook: A Guide to Solar Assisted Cooling and Dehumidification Processes*. Berlin: Ambra Verlag. Tillgänglig på: https://ebookcentral.proquest.com/lib/uu/reader.action?docID=4822065&ppg=9&c=UERG [Hämtad 20 februari 2026].

Hundy, G.F., Trott, A.R. & Welch, T.C. (2016). The Refrigeration Cycle. I: *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps* (5:e uppl.), s. 19–39. Butterworth-Heinemann/Elsevier. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100647-4.00002-4 [Hämtad 10 maj 2026].

Le Dréau, J. & Heiselberg, P. (2016). Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy*, 111, s. 991–1002. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.076 [Hämtad 10 april 2026].

Lejestrand, A. (2025). *Effekttariffer - varför då?* Energiföretagen Sverige. Tillgänglig på: https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/elnatet--distribution-av-el/effekttarifftariffer/ [Hämtad 23 april 2026].

Lin, X., Zhao, Y., Zhang, Y. et al. (2026). Bridging the gap between the actual and expected chiller power load variations in HVAC demand response: A dynamic modeling method considering the PID control characteristic. *Energy and Buildings*, 361, 117463. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117463 [Hämtad 4 maj 2026].

Lu, S.-D., Hsieh, C.-T., Liu, H.-D. & Xu, S.-T. (2026). Data-Driven Identification of Operating Thresholds for Cycling Reduction in Chiller Systems. *Processes*, 14(8), 1266. Tillgänglig på: https://doi.org/10.3390/pr14081266 [Hämtad 3 maj 2026].

Nässén, S. (2026). *Effekttariffer och effektavgift: vad innebär det för dig?* Greenely. Tillgänglig på: https://www.greenely.com/artiklar/effekttariffer-forklarat [Hämtad 24 april 2026].

Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Coronel, J-F. & Maestre, I-R. (2011). A review of HVAC systems requirements in building energy regulations. *Energy and Buildings*, 43(2–3), s. 255–268. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.025 [Hämtad 10 maj 2026].

Shimomura, M., Keeley, A.R., Matsumoto, K. et al. (2025). Unveiling and estimating behind-the-meter rooftop solar self-consumption using explainable AI. *npj Clean Energy*, 1(11). Tillgänglig på: https://doi.org/10.1038/s44406-025-00011-7 [Hämtad 24 april 2026].

Sveriges Allmännytta (u.å.). *Flexibilitet och effekttoppar*. Tillgänglig på: https://www.sverigesallmannytta.se/energi/effekttoppar-och-fornybar-energi/flexibilitet/ [Hämtad 4 februari 2026].

Talib, A., Park, S., Im, P. & Joe, J. (2023). Grey-box and ANN-based building models for multistep-ahead prediction of indoor temperature to implement model predictive control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107115. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107115 [Hämtad 20 april 2026].

Vasakronan (2026a). Kylsystem inom Vasakronans fastigheter. Uppsala. Personlig kommunikation med teknikansvarig för byggnaden [samtal], mars 2026.

Vasakronan (2026b). Kyleffekt, soleffekt och övrig information från givare i fastigheten. Uppsala. [Inhämtad fastighetsdata från databas], februari 2026.

Vasakronan (2025). *Vasakronans guidelines och principer för byggande*. Version 6. [Internt dokument] Uppsala: Vasakronan.

Weilin, L., Liu, Y., Ying, J. & Peng, X. (2019). Estimating demand response potential under coupled thermal inertia of building and air-conditioning system. *Energy and Buildings*, 182, s. 19–29. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.022 [Hämtad 23 april 2026].

Xu, P. & Haves, P. (2006). Case study of demand shifting with thermal mass in two large commercial buildings. *ASHRAE Transactions*, 112(2), s. 572–580. Tillgänglig på: https://www.researchgate.net/publication/279611424_Case_study_of_demand_shifting_with_thermal_mass_in_two_large_commercial_buildings [Hämtad 19 april 2026].

Yuan, H., Chen, Y., Gangi, A.D. & Chen, Z. (2026). Energy Flexibility Evaluation for Building Passive Thermal Storage Mass. *Energies*, 19(4), 1035. Tillgänglig på: https://doi.org/10.3390/en19041035 [Hämtad 5 maj 2026].

Zanetti, E., Blum, D., Fu, H., Weyandt, C., Pritoni, M. & Piette, M.A. (2025). Commercial building HVAC demand flexibility with model predictive control: Field demonstration and literature insights. *Energy and Buildings*, 345, 116097. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116097 [Hämtad 19 april 2026].

Zinsmeister, D., Ludolfinger, U., Perić, V. & Goebel, C. (2024). A benchmarking framework for energy management systems with commercial hardware models. *Energy and*

Buildings, 321, 114648. Tillgänglig på: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114648 [Hämtad 3 maj 2026].