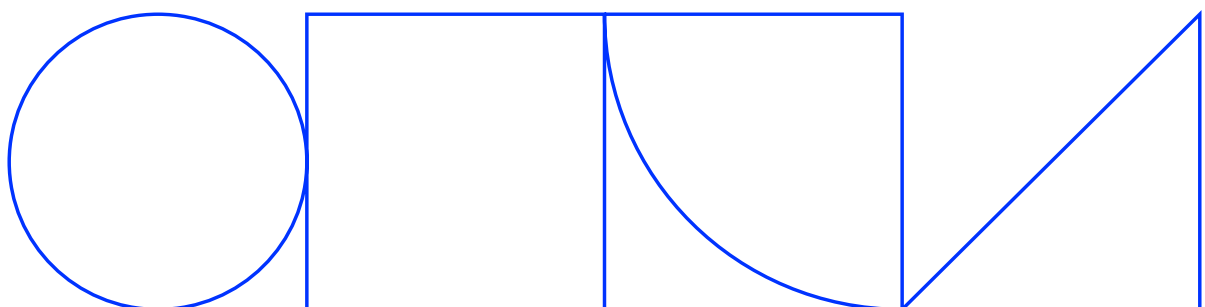


Frikyla i kontorsbyggnader

En förstudie om möjliga tekniska lösningar med energi- och kostnadsanalys

Taha Arghand, Bengt Dahlgren
Adnan Ploskić, Bravida och KTH/Byggvetenskap

2025-01-07



Förord

Vi vill härmed framföra vårt djupaste tack till Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond SBUF för deras finansiella stöd som gjorde denna studie möjlig under året 2024. Utan deras generositet och engagemang hade detta arbete inte varit genomförbart.

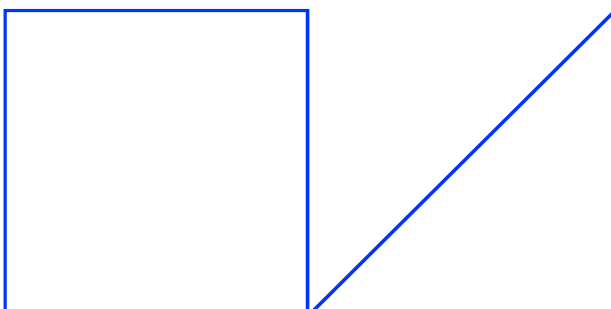
Vi vill även rikta ett varmt tack till referensgruppen för deras värdefulla bidrag till studien. Deras engagemang och insiktsfulla insatser har varit ovärderliga för att forma och förbättra innehållet i denna rapport. Vi är tacksamma för det prestigefria samarbetet och den kunskap som de delade med sig.

Referensgrupp:

Tomas Glaerum, ReTherm Kruge

Carl-Ola Danielsson, Swegon

Mattias Gruber, Fläktgrupp



Sammanfattning

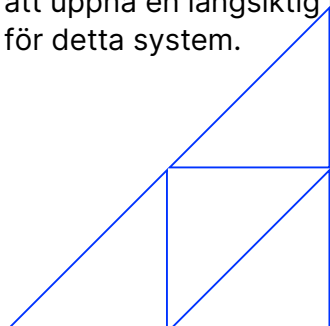
Användning av frikyla har blivit alltmer relevant och viktigt i Sverige på grund av det ökande behovet av komfortkyla i kommersiella byggnader. Behovet av mer energieffektiva lösningar är särskilt viktigt med tanke på de stigande energikostnaderna och de ökade kraven på hållbarhet. Denna rapport är en förstudie som undersöker energi- och kostnadseffektiviteten för två tekniska lösningar för frikyla i kommersiella byggnader: frikyla genom frikyla värmeväxlare (F-VVX) och frikyla genom borrhålssystem.

Syftet med denna studie är att göra en detaljerad jämförelse av dessa två kylsystem med avseende på deras kyltillförsel till byggnaden, energikostnader och prestanda under olika klimatförhållanden i Sverige. Simuleringar utfördes för två kontorsbyggnader med olika arkitektoniska egenskaper för att undersöka hur varje system fungerar under varierande förhållanden. Byggnad I representerar en traditionell kontorsbyggnad med en formfaktor på 68% och ett fönster-till-vägg förhållande på 24% medan Byggnad II har en modern design med stora glaspartier och en formfaktor på 83% och ett fönster-till-vägg förhållande på 37%.

Resultaten från simuleringarna visar att borrhålssystemet har betydligt högre potential att minska mängden köpt kylenergi jämfört med FVVX-systemet. Detta är på grund av borrhålssystemets förmåga att tillvarata den låga temperaturen i berggrunden vilket ger en jämnare och mer effektiv kylning över hela året i byggnaden. Borrhålssystemet minskade kylenergieffektiviteten med upp till 61% i Byggnad II och 54% i Byggnad I jämfört med referensbyggnaderna utan frikyla. FVVX-systemet visade däremot endast marginella energibesparingar och minskade kostnaderna av köpt kylenergi i mindre utsträckning, med omkring 1% i Byggnad I och 8% i Byggnad II jämfört med referensbyggnaderna.

Trots att FVVX-systemet har en avsevärd lägre investeringskostnad än borrhålssystemet är dess långsiktiga energi- och kostnadsbesparingar begränsade. FVVX-systemet är mest effektivt under våren och hösten när utomhustemperaturen är fördelaktig (d.v.s. tillräckligt låg) för att systemet själv kan täcka byggnadens kylbehov. Under sommaren är FVVX-systemets kylkapacitet otillräcklig och större delen av byggnadens kylbehov måste täckas av ett kompletterande kylsystem vilket minskar systemets totala effektivitet.

Sammanfattningsvis visar rapporten att borrhålssystemet är en mer energieffektiv lösning för kylning av kontorsbyggnader under svenska förhållanden. FVVX-systemet kan vara användbart under specifika förhållanden men dess totala kylningsförmåga är begränsad och lägre i jämförelse med ett borrhålssystem. Rapporten rekommenderar därför byggnadsägare att i första hand överväga installation av borrhålssystemet för att uppnå en långsiktig kostnadseffektivitet trots en högre initial investeringskostnad för detta system.



Nyckelord: Frikyla; Bergkyla; Borrhål; Kylbafflar; Luftbehandlingsaggregat; Hågtemperaturkyla; Energibesparingar; Energiförbrukning; Kontorsbyggnader; Förevärmningsbatteri

Summary

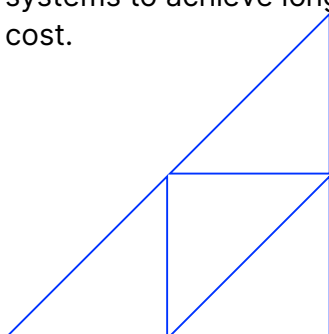
The utilization of free cooling has become increasingly relevant in Sweden due to the growing demand for comfort cooling in commercial buildings. The necessity for energy-efficient solutions is particularly pressing given the rising energy costs and enhanced sustainability requirements. This report presents a preliminary study investigating the energy and cost efficiency of two technical solutions for free cooling in office buildings: free cooling via air-to-water heat exchanger and free cooling through borehole systems.

The objective of this study is to conduct a detailed comparison of the two cooling systems with respect to energy input, energy costs, and performance under various climatic conditions in Sweden. Simulations were carried out in two office buildings characterized by differing architectural features to assess the performance of each system under distinct conditions. Building I represents a more traditional office building with a form factor of 68% and a window-to-wall ratio of 24%, while Building II has a modern design with large glass areas, a form factor of 83%, and a window-to-wall ratio of 37%.

The simulation results indicate that the borehole system offers substantially greater potential for reducing purchased cooling energy compared to the air pre-heater system. This is primarily due to the borehole system's ability to leverage the stable temperature of the ground, which enables more consistent and efficient cooling throughout the year. The borehole system reduced cooling costs by up to 61% in Building II and 54% in Building I, relative to the reference building without free cooling. In contrast, the free-cooling heat exchanger system demonstrated only marginal energy savings, reducing purchased cooling energy costs by 1% in Building I and 8% in Building II, compared to the reference buildings.

Despite the lower initial investment cost associated with the free-cooling heat exchanger system, its long-term energy savings and economic benefits are limited. The free-cooling heat exchanger system operates most efficiently during spring and autumn seasons, when outdoor temperatures are low enough for the system to meet the building's cooling demands independently. However, during the summer, the capacity of the free-cooling heat exchanger system is insufficient, necessitating the use of a supplementary cooling system to cover the majority of the building's cooling needs, thereby reducing the system's overall efficiency.

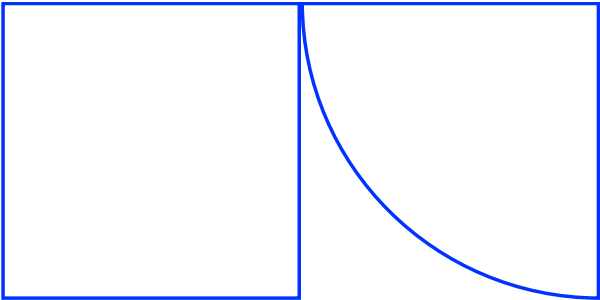
In conclusion, the study demonstrates that the borehole system is a more energy-effective solution for cooling office buildings in the Swedish climate. While the free-cooling heat exchanger system may be suitable under specific conditions, its overall performance is limited when compared to the borehole system. Consequently, the report recommends that building owners consider the implementation of borehole systems to achieve long-term energy savings despite the higher initial investment cost.



Keywords: Free-cooling; Ground-coupled cooling; Borehole; Chilled beam; Air handling unit; High-temperature cooling; Energy saving; Energy cost; Office buildings; Air pre-heater

Innehåll

Förord	1
Sammanfattning	2
Summary	3
1. Inledning	6
1.1. Bakgrund	6
1.2. Syfte	8
1.3. Genomförande	8
1.3.1. Modellutveckling och simulering	8
1.3.2. Systemstudier	8
1.3.3. Dimensionerings- och energianalys	8
1.3.4. Rapport	8
2. Metod	9
2.1. Byggnadsmodeller	9
2.2. Klimat	10
2.3. Kylsystem i undersökta byggnaderna	11
2.4. Energiförsörjningssystem	12
2.4.1. Kylteknik I: Frikyla via frikyla värmeväxlare (F-VVX)	13
2.4.2. Kylteknik II: Frikyla från borrhål	14
2.5. Energikostnader	15
2.6. Simulering	15
2.7. Metodologi	16
3. Resultat	17
3.1. Levererad energianalys	17
3.2. Systemanalys av LK	18
3.2.1. Energianalys	18
3.2.2. Energikostnader	20
3.2.3. Känslighetsanalys	21
3.3. Borrhål systemanalys	24
3.4. Jämförelse	27
4. Diskussion	29
5. Slutsats	30
Referenser	31



1. Inledning

Detta kapitel består av fyra delar:

- Bakgrund
- Syfte
- Genomförande
- Rapportupplägg

1.1. Bakgrund

Komfortkyla har snabbt blivit ett växande energibehov i Sverige. Trots att Sverige traditionellt har ett relativt högt värmebehov så har det också skett en märkbar ökning av behovet av komfortkyla i kommersiella byggnader under de senaste åren. Faktorer som urbanisering, teknologiska framsteg och förändrade arbetspreferenser bidrar till denna ökning. Behovet av komfortkyla i kommersiella byggnader har därmed blivit alltmer märkbart, drivet också av stigande utetemperaturer till följd av klimatförändringar, bättre termisk isolering i byggnaderna och önskan om ett mer behagligt inomhusklimat under sommarmånaderna.

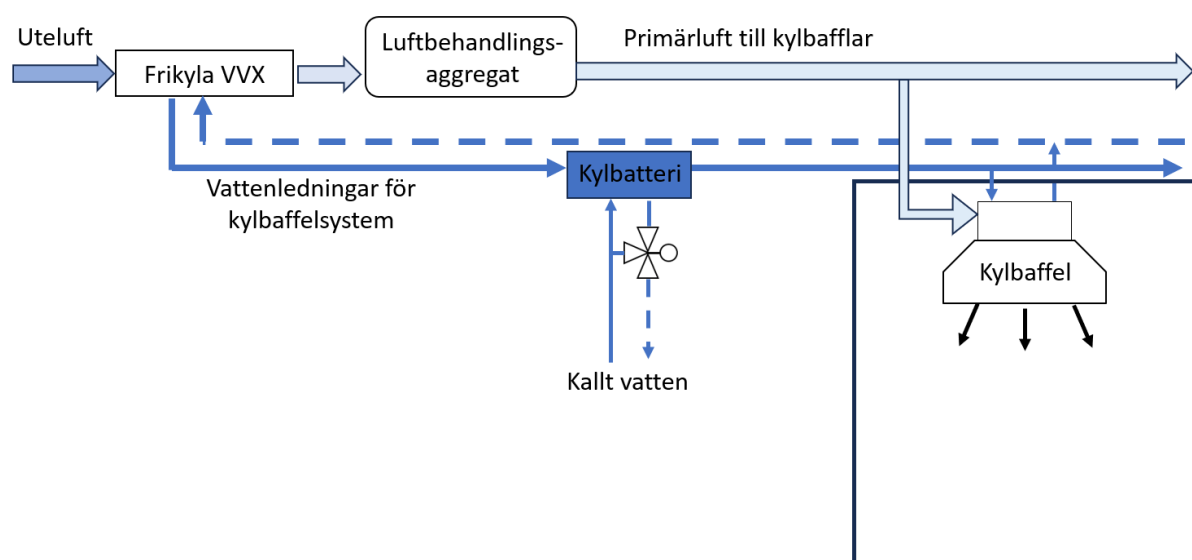
Idag tillförs Komfortkyla i Sverige huvudsakligen genom kylmaskiner, kylvärmepumpar och fjärrkyla. Detta innebär att kyla vanligtvis produceras vid temperaturnivåer på cirka 5°C till 8°C, vilket är tillräckligt för att kyla byggnader med konventionella system, såsom variabelflödessystem (eng. VAV) eller behovsstyrt (eng. DCV) ventilationssystem. Dock kräver kylningen i dessa system betydande mängder elektricitet för ventilationssystemet.

Vattenburna kylsystem är ett alternativ till luftburna kylsystem. I vattenburna system används cirkulerande vatten av låg temperatur för att avlägsna ackumulerad värme i rummet. Följaktligen är elbehovet för fläktarna i vattenburna system avsevärt lägre än i luftburna system på grund av det lägre luftflödesbehovet som behövs för att säkerställa ett jämförbart termiskt klimat inomhus. Elbehovet för cirkulationspumpar i vattenburna system är något högre än i luftburna kylsystem, men det brukar vara betydligt lägre än behovet för fläktdriften.

Kylbafflar är ett av de vanliga vattenburna kylsystemen som oftast används för rumskylning i svenska kontorsbyggnader [1]. Systemet använder oftast vatten som köldmedium och samkörs med mekanisk ventilation för att garantera acceptabel luftkvalitet inomhus. Kylbafflar fungerar väl med kylvatten av förhållandevis höga framledningstemperaturer (över 14 °C)[2], vilket inte bara förbättrar kylmaskins energieffektivitet utan även möjliggör att helt eller delvis frångå användning av konventionell kompressordriven kyla som använder betydligt lägre tillloppstemperaturer och därmed kräver högre elanvändning. Hög tillloppstemperatur underlättar också användningen av naturliga kylresurser och förbättrar utnyttjandet av tillgänglig frikylning från naturen.

Direkt bergkyla är en av de vanligaste metoderna i Sverige för kylning av byggnader, där bergets låga temperatur används som en naturlig kylkälla [3]. System för direkt bergkyla använder borrhålsvärmepumpar för överföring av kylenergi från berget till byggnaden. Den naturliga bergtemperaturen används för att kyla byggnaden under sommaren medan värme från berget utvinns under vintern för att värma byggnaden och balansera bergets naturliga temperatur [4]. Direkt bergkyla behöver ingen kylvärmepump och kräver endast en liten mängd el för att cirkulera vätskan inuti borrhålsvärmepumpar vilket innebär betydligt lägre elanvändning jämfört med system som använder eldrivna kylvärmepumpar.

En ytterligare metod för att leverera kyla till kontorsbyggnader är genom användning av kall utomhusluft. I detta system kyla inkommande uteluft returvattnet från byggnadens kylbafflar via ett uteluftbatteri som är integrerat i luftbehandlingsaggregatet, se Figur 1. När den kalla uteluften strömmar genom batteriet överförs kyla till vattnet som cirkulerar i kylbafflarna och kyla tillvattenflödet till dessa. Detta system minskar behovet av köpt kylenergi och hjälper till att jämna ut kyleffekter samtidigt som det kan minska byggnadens köpt värmeenergi [5].



Figur 1. Frikyla värmepump (F-VVX).

Båda dessa tekniker levererar kyla till byggnadens kylsystem genom frikylning. De skiljer sig dock åt i hur de utnyttjar kylresurserna och det finns olika fördelar och nackdelar med varje teknik. De erbjuder olika nivåer av energieffektivitet och kräver olika designstrategier. Såvitt författarnas kännedom sträcker sig har ingen tidigare studie gjort en jämförelse mellan dessa två tekniker för frikyla, dvs frikylning med hjälp av ett kallt borrhål och en kall uteluft.

1.2. Syfte

Syftet med detta projekt är att utvärdera energieffektivitet och energikostnad hos de ovan beskrivna teknikerna för frikylning i kontorsbyggnaderna, dvs frikyla från berg och utelufts kylning. Syftet är uppnått genom att utveckla dimensioneringsanalys för olika designförutsättningar, såsom tilluftsflöde, framledningstemperatur till kylsystemet, uteklimatet och energikostnad.

1.3. Genomförande

Projektet genomfördes vid avdelningen för energi och kylteknik på Bengt Dahlgren och på Bravida Stockholm. Till projektet knyts också en referensgrupp med olika experter. Projektet genomfördes med hjälp av systemsimuleringar med energisimuleringsprogrammet IDA ICE. Genomförandet av projektet var uppdelat i följande steg:

1.3.1. Modellutveckling och simulering

Arbetet i projektet baseras på datorsimuleringar med hjälp av energisimuleringsprogrammet IDA ICE. Kylsystemens prestanda undersöktes i två kontorsbyggnader. Båda modellerna för kontorsbyggnader skapades och utvärderades i IDA ICE. Modellerna utvecklades baserat på allmänna industriella metoder.

1.3.2. Systemstudier

Två tekniker för frikylning har utvärderats. Den ena tekniken är bergkyla och den andra är kall uteluft som kylkälla. De två teknikerna har utvärderats i de utvalda byggnader och deras energiprestanda har jämförts. Simuleringsarbetet har utförts för att bedöma teknikernas effektivitet under både nuvarande och framtida klimatförhållanden.

1.3.3. Dimensionerings- och energianalys

Målet med denna studie är att utveckla dimensioneringsanalys för olika designförutsättningar, såsom tilluftsflöde, framledningstemperatur till kylsystemet, uteklimatet och energikostnad.

1.3.4. Rapport

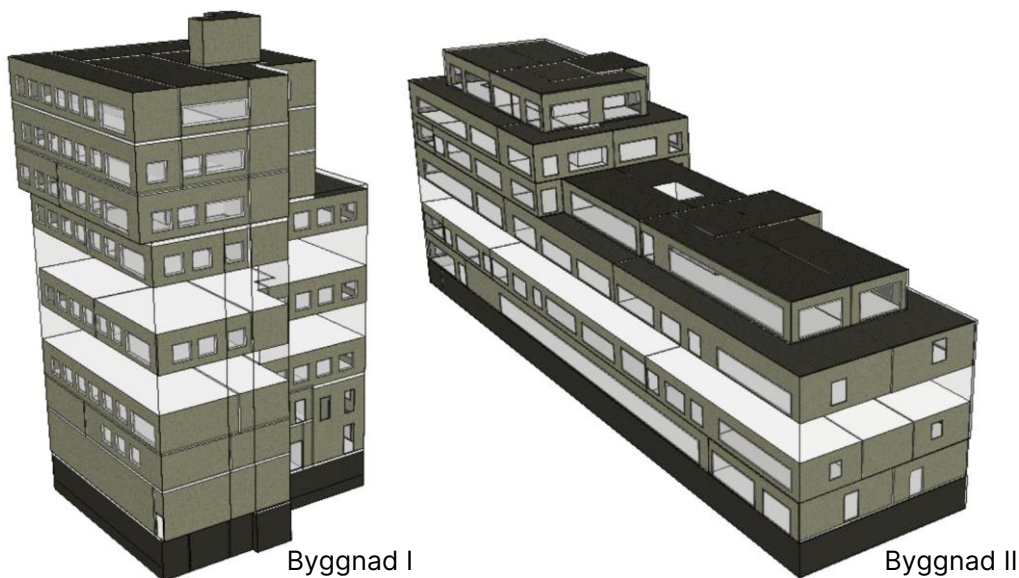
Projektet rapporteras i form av en slutrapport och resultaten kommer att vidareföras till våra samarbetspartners och relevanta branschaktörer såsom Svensk Ventilation, Installatörsföretagen, installatörer och installationskonsulter. Förutom slutrapporten har även ett examensarbete genomförts på uppdrag av Bengt Dahlgren. Arbetet finns bifogat till detta dokument som ett komplement till slutrapporten.

2. Metod

Kapitlet inleds med en presentation av de två fallstudier som skall genomföras, följt av en beskrivning av kylsystemet och de använda metoderna för att undersöka LCC-analysen. Slutligen sammanfattas den metod som används i studien.

2.1. Byggnadsmodeller

Två byggnadsmodeller har använts i denna studie. Modellerna har skapats och utvecklats av projektutförare på Bengt Dahlgren. Byggnaderna är kontorsbyggnader som finns i Göteborg. Byggnaderna visas i Figur 2.



Figur 2. Byggnadsmodeller i IDA ICE.

Som det kan ses har byggnaderna olika formfaktorer och fönsterstorlek. Byggnad I har nästan lika stor bredd som längd och den totala fönsterytan är mindre jämfört med Byggnad II. Byggnad II representerar en modern kontorsbyggnad med stora fönster där de flesta zoner är ytterzoner. Detta innebär att extern värmelast (solinstrålning) har en betydande inverkan på byggnadens kyl- och värmebehov. Tabell 1 presenterar viktiga parametrar om byggnadernas form.

Tabell 1. Sammanställning av byggnaders nyckelindata

	Byggnad I	Byggnad II	Byggnad II / Byggnad I
A_{temp} (m ²)	6 860	8 621	1,26
A_{om} (m ²)	4 666	7 166	1,53
Formfaktor (%)	68	83	1,22
Fönster/vägg (%)	24	37	1,54
Belysning (kWh/m ²)	14,0	16,3	1,16
Utrustning (kWh/m ²)	11,4	13,2	1,16
Personer (st/m ²)	0,067	0,077	1,15

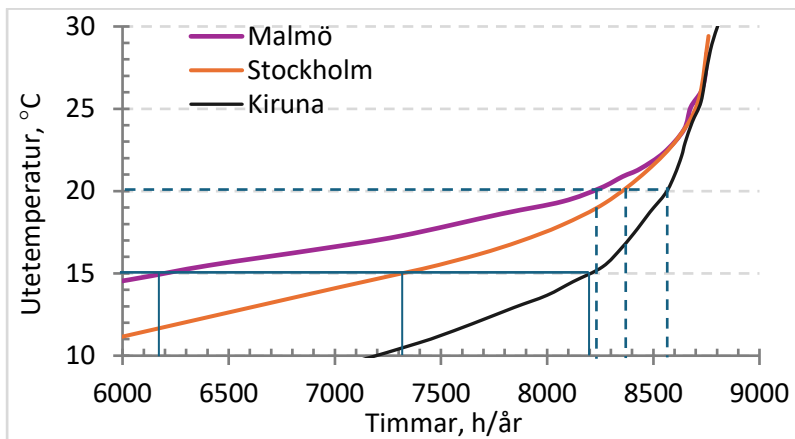
Det totala g-värdet för fönsterglas, som inkluderar både glasets g-värde och det invändiga solskyddets g-värde, är 0,24 för alla fönster i båda byggnaderna. Tabell 2 presenterar detaljer om byggnadernas klimatskal.

Tabell 2. Sammanfattning av byggkonstruktions U-värde.

Byggnadskonstruktion	Byggnad I	Byggnad II	Byggnad II / Byggnad I
Väggar ovan mark (W/m ² ,K)	0,15	0,13	0,87
Yttertak (W/m ² ,K)	0,19	0,16	0,84
Golv mot mark (W/m ² ,K)	0,12	0,25	2,08
Fönster (W/m ² ,K)	0,81	0,71	0,88
Totalt (W/m ² ,K)	0,54	0,45	0,83

2.2. Klimat

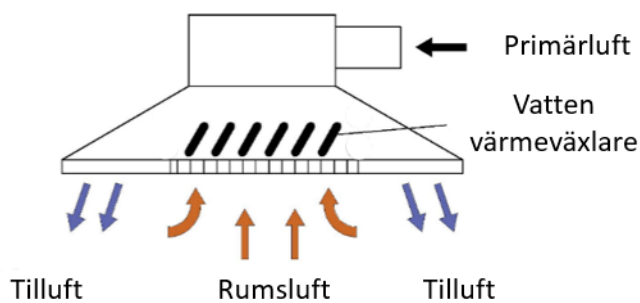
Som klimatdata för normalåret användes Svebys klimatdatafiler vilka baseras på SMHI klimatdata för åren 1991–2020, se Figur 3. Detta är det senaste normalåret som finns tillgängligt på Svebys hemsida [6].



Figur 3. Varaktigdiagram för utetemperatur för normalår 1991-2020 för Luleå, Stockholm och Malmö enligt Svebys klimatdatafiler [6].

2.3. Kylsystem i undersökta byggnaderna

Kyla levereras till zonerna genom kylbafflar. Det är ett energieffektivt kylsystem som ofta används i kommersiella och kontorsbyggnader för att skapa ett behagligt inomhusklimat. Kylbafflar är smala, takmonterade enheter som kyler luften genom antingen naturlig eller forcerad konvektion. Kylvatten med en relativt hög temperatur, över 14 °C, cirkulerar inuti ett värmeväxlingsbatteri i baffeln vilket kyler den varma rumsluften när den passerar över batteriet, se Figur 4. Detta skapar en sval luftrida som sedan sjunker ner i rummet och kyler det.



Figur 4. Schematiskt diagram av en kylbaffel.

Kylbafflar klassificeras som vattenburna kylsystem eftersom vatten används som köldbärarvätskan. Även om luften också spelar en roll i värmeöverföringen är dess huvudsakliga funktion att säkerställa luftkvaliteten i rummet. För att förbättra energiprestandan och minska storleken på kanalerna och aggregatet rekommenderas det att hålla användningen av primärluftflödet till kylbafflarna så låg som möjligt [8–11]. På grund av lågt primärluftflödet är systemets kyleffekt också lägre jämfört med VAV-system. Å andra sidan utnyttjar detta system inte frikyla från uteluften i samma utsträckning som VAV-system till följd av det minskade primärluftflödet.

I denna studie används 1800 mm långa kylbafflar med en framledningstemperatur på 15 °C eller 20 °C. Det dimensionerande tryckfallet för kylbafflarna är 100 Pa. Den dimensionerade primärlufttemperaturen är 16 °C under sommars designförhållanden, men temperaturen ökar till 19 °C under vintern för att minska ventilationsvärmeförlusterna. Primärluftflödet för varje baffel är 60 l/s, 70 l/s eller 80 l/s och den totala kyleffekten blir 1,7 kW, 1,9 kW respektive 2,1 kW, beroende på kylbehovet i zonerna. Designspecifikationerna för kylbafflarna sammanfattas i Tabell 3.

Tabell 3. Sammanfattning av indata i kylbafflar simuleringar.

Primärt luftflöde (l/s)	60 l/s	70 l/s	80 l/s
Kyleffekt, luft (W)	576	672	768
Kyleffekt, vatten (W)	1118	1244	1291
Total kyleffekt (W)	1694	1916	2059
Framledningsvattentemperatur (°C)	15 eller 20		
Vattenflöde (l/s)	0,1		
Primärluft temperatur (°C)	16		
Total längd (mm)	1800		
Totaltryckfall (Pa)	100		
Rumstemperatur (°C)	24		

Luftbehandlingsaggregatet använder ett värmeåtervinningssystem med en värmeverkningsgrad på 81 % och SFP (eng. Specific Fan Power) för till- och frånluftsfläktarna är 1,5 kW/(m³/s). Aggregatet är i drift från klockan 06:00 till 18:00 på arbetsdagarna.

Värme levereras till rummen genom vattenradiatorerna. Den tillförda värmen till zonerna regleras genom att anpassa framledningstemperaturen och vattenflödet till radiatorerna efter utetemperaturen. Framledningstemperaturen varierade mellan 40 °C och 55 °C i studien.

2.4. Energiförsörjningssystem

Detta avsnitt beskriver de två energiförsörjningssystem som användes för att tillföra komfortkyla till byggnaderna. Det första systemet, kallat kylteknik I, inkluderar en frikyla värmeväxlare som är installerad före värmeåtervinningssystemet i ventilationsaggregatet. Denna värmeväxlare förvärmer den kalla inkommande uteluften med hjälp av varmare returvatten från kylbafflarna. Det andra systemet, kylteknik II,

består av ett borrhål kopplat till en värmepump som används för både uppvärmning och kylning. Följande avsnitt ger detaljerade beskrivningar av dessa två system.

2.4.1. Kylteknik I: Frikyla via frikyla värmeväxlare (F-VVX)

Figur 5 visar konceptet för kylteknik I. Detta system innehåller en luft/vatten värmeväxlare som är placerad mellan uteluftsintaget och värmeväxlaren i ventilationsaggregatet. Uteluften passerar genom värmeväxlaren innan den fortsätter till värmeåtervinningsenheten. På vattensidan cirkulerar vatten genom uteluftsvärmeväxlaren och kan under vissa tider förvärmer den uteluften när returtemperaturen från bafflarna är högre än uteluftstemperaturen. Värme från zonerna avlägsnas med hjälp av kylbafflarna och överförs genom en värmeväxlare som separerar byggnadens kylsystem från förvärmningslingan, se Figur 5. Dessa förhållanden uppstår ibland i byggnader med stora fönster vilket leder till betydande kyllaster under hösten och våren.

Mittslingan möjliggör värmeväxling mellan uteluftsidan och kylbaffelsystemet, se Figur 5. För att styrsystemet ska tillåta vattencirkulation i mittslingan måste uteluftstemperaturen vara lägre än tilloppsvattentemperaturen till kylbaffelsystemet, som i denna studie är satt till 15 °C eller 20 °C. Om uteluftstemperaturen är över kylbafflarnas framledningstemperatur eller om kylbehovet överstiger kylkapaciteten hos uteluftsvärmeväxlaren aktiveras en kompletterande kylkälla. Denna kylkälla, i denna studie, var kylvärmepumpen och kylde vattnet genom en värmeväxlare som visas i Figur 5.

Det är viktigt att notera att frikyla värmeväxlaren endast tillhandahåller kyla till kylbafflarna medan kylbatteriet får kyla från det kompletterande kylsystemet.

2.5. Energikostnader

Energikostnader avser kostnader för den energi som använts under systemets drift och består av två delar: energikostnaden och effektkostnaden. Energikostnaden avser den inköpta energin och varierar månadsvis över året. Effektkostnaden inkluderar två delar, en fast del och en rörlig del. Den fasta delen utgörs av abonnemangavgiften och beräknas utifrån årets topp effekt samt den kategori som effekten tillhör. Den rörliga kostnaden beräknas genom att multiplicera topp effektintensiteten med topp effektkostnaden. Energipriserna i denna studie baseras på priser från Stockholm Exergi år 2024. Tabell 4 redovisar de indata som har använts i energikostnadsanalysen.

Tabell 4. Energikostnader indata år 2024.

Fjärrvärme *	
Energipris, nov-mars	813 kr/MWh
Energipris, apr-okt	309 kr/MWh
Rörlig effektagift (100-499 kW)	1 052 kr/kW
Fast avgift (100-250 kW)	3 147 kr/år
Fjärrkyla **	
Energipris, nov-mars	0 kr/MWh
Energipris, apr, maj, sep, okt	182 kr/MWh
Energipris, jun-aug	502 kr/MWh
Rörlig effektagift (101 - 250 kW)	618 kr/kW
Rörlig effektagift (251 - 500 kW)	483 kr/kW
Fast avgift (101 - 250 kW)	37 580 kr/år
Fast avgift (251 - 500 kW)	66 300 kr/år

* Stockholm Exergi (<https://www.stockholmexergi.se/content/uploads/2023/09/Prislista-Fjarrvarme-Bas-2024.pdf>)

** Stockholm Exergi (<https://www.stockholmexergi.se/content/uploads/2023/09/Prislista-Fjarrkyla-Bas-2024.pdf>)

2.6. Simulering

IDA ICE (version 5,0) har använts i denna studie för byggnadsenergisimulering. IDA ICE är ett välkänt verktyg för byggnadsenergimodellering i Sverige och har validerats mot

experimentella mätningar enligt flera standarder. I denna studie användes IDA ICE för att simulera byggnadernas årliga värme- och kylbehov samt för att analysera den upplevda termiska komforten inomhus.

2.7. Metodologi

Syftet med denna studie är att jämföra driftsprestandan hos två kylsystem för kontorsfastigheter. Studien omfattar analys av systemens energi- och effektanvändning och deras energikostnader. Prestandan utvärderades i två kontorsbyggnader med olika former men liknande egenskaper för klimatskal. Interna värmestillskott, fönsteregenskaper och solskyddslösningar har varit liknande för båda byggnaderna för att kunna jämföra dem. Kylbafflarnas design och dimensioner är också desamma för båda kylteknikerna och deras prestanda har utvärderats med indata i Tabell 3.

För varje byggnad genomfördes en serie simuleringar för att undersöka prestandan hos de två kylteknikerna. Initialt simulerades varje byggnad för Stockholms klimat med hjälp av standardenergisystem, dvs utan att använda någon av kylteknikerna. Syftet med detta steg var att analysera byggnadens värme- och kylbehov. I nästa steg utvärderades varje kylteknik i byggnaden och mängden inköpt energi och effekt utvärderades. Dessutom genomfördes en känslighetsanalys för att kunna generalisera resultaten.

Följande punkter kommer att utvecklas och undersökas i detta projekt:

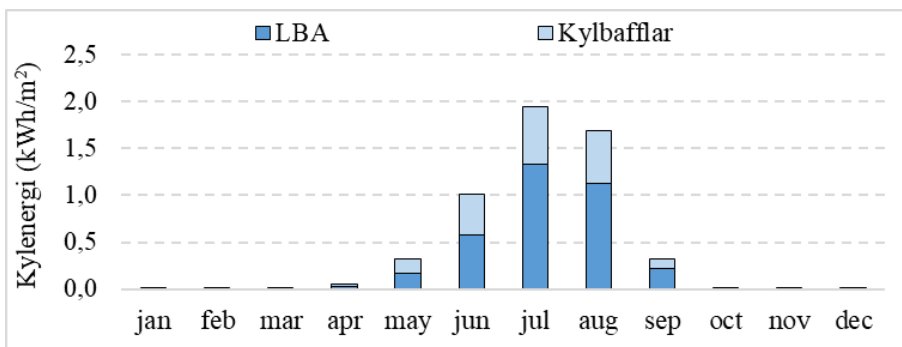
- Energieffektiviseringsanalys: Studien kommer att noggrant undersöka och analysera energianvändning relaterad till uppvärmning, kylning och el för varje kylsystem för tre klimatzoner i Sverige.
- Analys av energikostnader: En omfattande analys av de totala energikostnaderna kommer att genomföras för båda system.
- Designförslag: Denna studie syftar till att ge tillämpbara förbättringsförslag för utformningen av de utvärderade kyltekniker i kontorsbyggnader belägna i kallt klimat.

3. Resultat

Detta kapitel presenterar studiens resultat. Först presenteras och diskuteras resultaten av energiprestanda av systemet med frikyla värmeväxlare, därefter redovisas resultaten från borrhålssystemet.

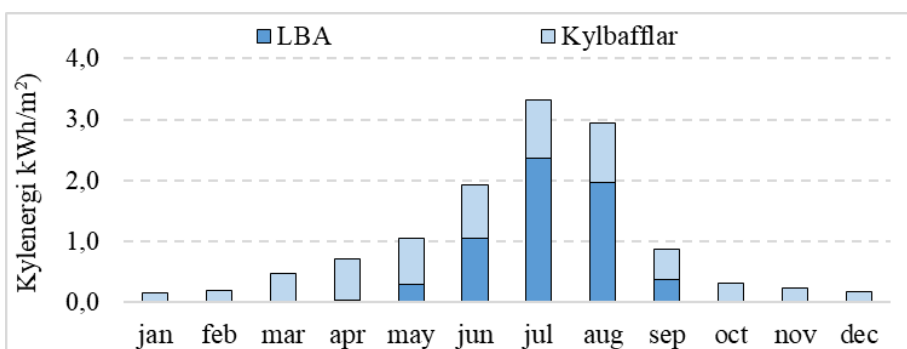
3.1. Levererad energianalys

Figur 6 visar levererad kylenergi för Byggnad I som är uppdelat i kylanvändningen för kylbafflar och för luftbehandlingsaggregatet. Levererad kyla under kalla månader, dvs från januari till april och från oktober till december, är låg eftersom byggnadens kylbehov är lågt då. Hela kylbehovet täcks med uteluften i detta fall. Under varma månaderna större del av behövlig kyla levereras av luftbehandlingsaggregaten.



Figur 6. Månatlig levererad kylenergi för Byggnad I i Stockholm. Total köpt kylenergi är 37 MWh/år.

Figur 7 visar mängden levererad kylenergi för Byggnad II. Enligt resultaten har Byggnad II ett kylbehov året runt. Kylbehov under de kalla månaderna beror på kylbehovet för interna zoner samt mötesrum. Under vår- och höstmånaderna ökar kylbehovet på grund av solvärmelaster genom stora fönsterna.

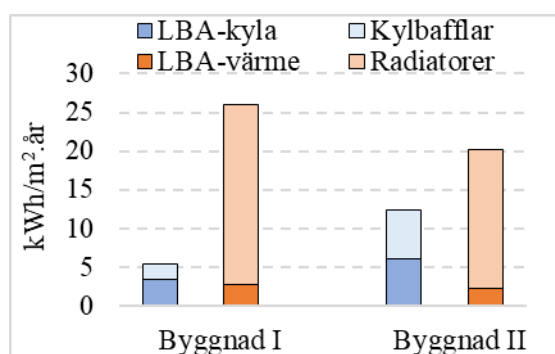


Figur 7. Månatlig levererad kylenergi för Byggnad II i Stockholm. Total köpt kylenergi är 107 MWh/år.

Figur 8 jämför den specifika årliga levererade kyl- och värmeenergin för Byggnad I och Byggnad II. Vid en jämförelse av kylenergin framgår det att Byggnad II har en större

mängd inköpt energi främst på grund av ett större fönster-till-vägg-förhållande och byggnadens utformning. Byggnad II har ett relativt högt fönster-till-vägg-förhållande på 37 % och en stor formfaktor på 83 % vilket innebär att byggnaden är smal och låg, se Tabell 1. Det framgår också att inköpt kyla för Byggnad I huvudsakligen levereras via LBA medan inköpt kyla för kylbafflar är större för Byggnad II. Kyllasterna för Byggnad II består till största delen av externa laster vilket gör att ytterligare kyla från kylbafflarna krävs för att avlägsna värme från zonerna.

Även om U-värdet för byggnadernas komponenter, såsom väggar och fönster, är jämförbara, skiljer sig det totala U-värdet för varje byggnad på grund av olika fasadytor. Byggnad I har ett sämre U-värde vilket innebär ett större värme- och kylbehov jämfört med Byggnad II.



Figur 8. Årlig levererad kyl- och värmeenergi per A_{temp} för Byggnad I och II i Stockholm.

3.2. Systemanalys av LK

Detta kapitel redovisar resultat för byggnader utrustade med LK systemet.

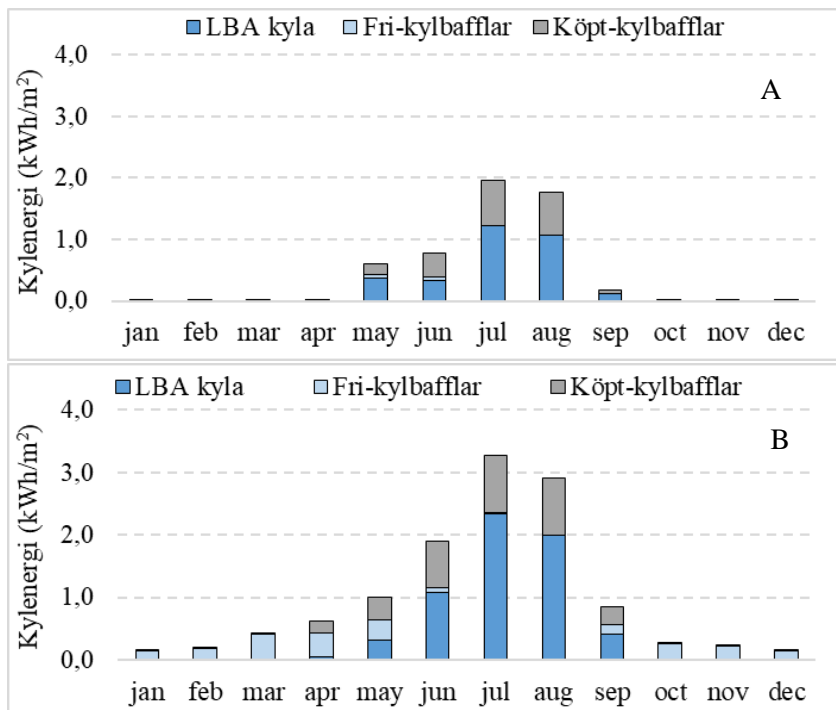
3.2.1. Energianalys

Figur 9A visar månatliga värden för levererad energin för Byggnad I. Energibehovet för varje månad är uppdelat i tre delar: köpt kyla för kylbafflar, frikyla för kylbafflar och köpt kyla för LBA. Resultaten visar att FV VX -systemet endast bidrar minimalt till levererad kyla under maj och juni. I juli och augusti är dock utelufttemperaturen för hög för att kunna kyla returvattnet från kylbaffel systemet.

Den levererade energin för Byggnad II visas i Figur 9B. Under de kalla månaderna levereras en betydande del av kylningen via kylbafflarna genom FV VX -systemet. I likhet med Byggnad I bidrar dock inte FV VX -systemet till minskningen av energianvändningen under juli och augusti.

Jämförelsen mellan figurerna, Figur 9A och Figur 9B, visar att LK system inte nämnvärt minskar mängden köpt kyla under de varma månaderna när utomhustemperaturerna är höga, men systemet kan vara effektivt under vår och höst om det finns ett kylbehov i byggnaden. Dessutom antyder resultaten att detta system inte är en effektiv lösning för att minska energibehovet av kylning eller toppkyleffekter under sommaren oavsett byggnadens design. Systemet kan dock vara fördelaktigt för byggnader med höga

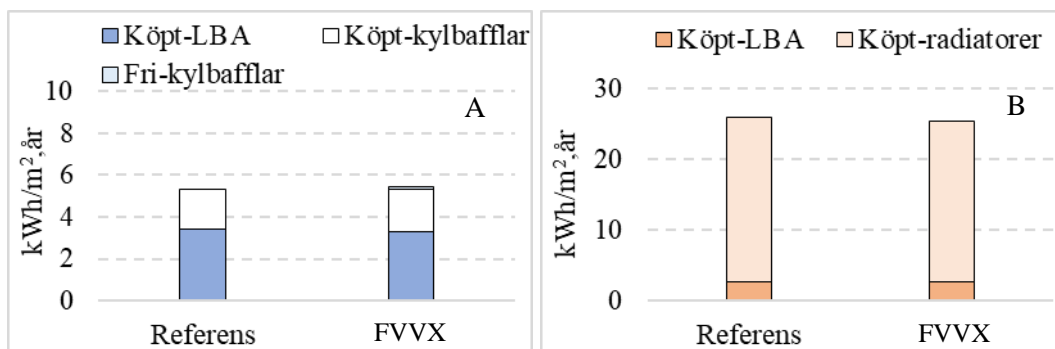
interna kylbehov eller stora fönster eftersom kylning krävs inte bara under varma perioder utan även under kallare perioder då utomhustemperaturerna är tillräckligt låga för att kunna utnyttjas i frikyla värmeväxlaren.



Figur 9. Månatligt kylbehov för A) Byggnad I och B) Byggnad II i Stockholm.

I Figur 10 jämförs den levererade årliga energi för kyla och värme i Byggnad I med referensbyggnaden, dvs Byggnad I utan FVVX -systemet, för att utvärdera effekten av att tillämpa FVVX -systemet. Referensbyggnaden är även utrustad med kylbafflar av samma storlek men kylsystemet är standard och inget system för frikyla är implementerat, dvs fjärrkyla. En stor del av den årliga kylan går åt till luftbehandlingsaggregatet vilket är lika i båda fallen. Det framgår också att endast en liten del av den levererade kylan till kylbafflarna tillhandahålls av FVVX -systemet.

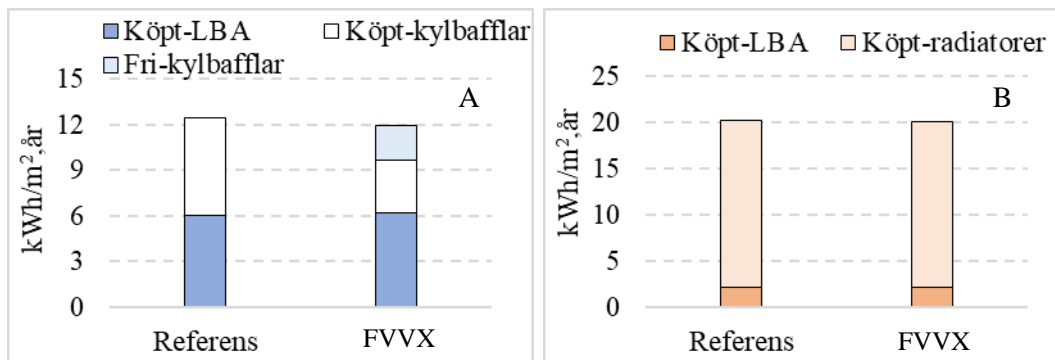
Jämförelsen av den levererade värmen visar att användningen av FVVX -systemet inte har någon betydande effekt på att minska värmebehovet i Byggnad I.



Figur 10. Jämförelse mellan referens och Byggnad I om årlig levererad kyl (A)- och värmeenergi (B).

Figur 11 visar den årliga levererade värme- och kylenergin för Byggnad II och jämför prestandan utan FVVX-systemet (referensbyggnad) och med FVVX-systemet. Analysen visar en betydande minskning av kylenergianvändning, med cirka 20 %, när FVVX-systemet implementeras.

Dock sker det, tvärtemot förväntningarna, nästan ingen förändring i värmeenergi som byggnaden använder trots att en minskning förväntades på grund av värmeåtervinning från kylbaffelsystemet. Vid närmare undersökning visade det sig att den återvunna värmen från kylbafflarna höjer temperaturen på uteluften som kommer in i värmeåtervinningssystemet. Detta leder till att mängden värme som återvinns av värmeåtervinningssystemet minskar vilket resulterar i en nästan identisk lufttemperatur efter återvinningssystemet i båda fallen. I praktiken innebär detta att den värmeenergin som sparas genom att överföra värme från kylbafflarna minskar värmeåtervinningspotentialen hos systemet vilket i sin tur motverkar den förväntade minskningen av värmeenergin.



Figur 11. Jämförelse mellan referens och Byggnad II om årlig levererad kyl (A)- och värmeenergi (B).

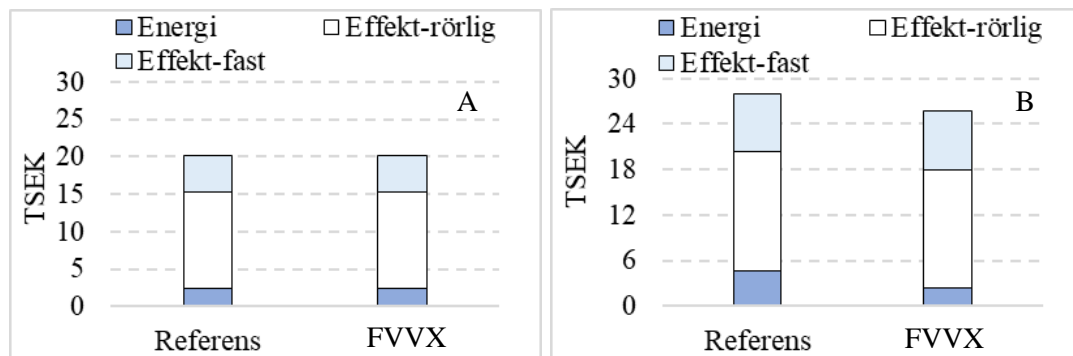
3.2.2. Energikostnader

Figur 12 visar de årliga energikostnaderna för varje byggnad. Energikostnaden för varje system inkluderar kostnader för energi, rörliga och fasta effektkostnader samt elenergi-kostnader. För båda byggnaderna utgör effektkostnaden en större del av totalkostnaden, ca. 55% till 65% beroende på fallstudie, vilket understryker vikten av att inkludera effektkostnader i analysen. Det är också tydligt att den rörliga komponenten av effektkostnaden, som beräknas genom att multiplicera effektintensiteten med kostnaden per kW i SEK, har ett starkare inflytande på den totala kostnaden.

Som väntat, enligt energianalysen för Byggnad I i Figur 10, visar kostnadsjämförelsen mellan referensbyggnaden och byggnaden utrustad med FVVX-systemet mycket liknande resultat. Trots att energianalysen för Byggnad II indikerar betydande energibesparingar genom FVVX-systemet visar kostnadsjämförelsen ingen väsentlig förändring vilket framgår av Figur 12B. Huvuddelen av minskningen av energianvändningen i Byggnad II sker under vår- och höstmånaderna när kostnaden för fjärrkylan är noll, som redovisas på Tabell 4, vilket gör att kylenergi-kostnaden

förblir oförändrad. Dessutom, som tidigare diskuterats i Figur 9B, bidrar FV VX - systemet inte till att minska kyleffekttoppar vilket resulterar i att effektkostnaderna är de samma mellan referensbyggnaden och fallstudien.

Det är viktigt att notera att dessa resultat är baserade på prislistan från Stockholm Exergi AB. Andra energibolag kan ha olika pristariffer för fjärrkyla. Men eftersom fjärrkyla priserna tenderar att vara lägre under de kallare månaderna är det osannolikt att tillämpningen av FV VX -systemet skulle leda till betydande förändringar i de totala kostnaderna.



Figur 12. Kylenergikostnader till Byggnad I (A) och Byggnad II (B) med borrhålsystemet och utan borrhållssystemet (referens fallet).

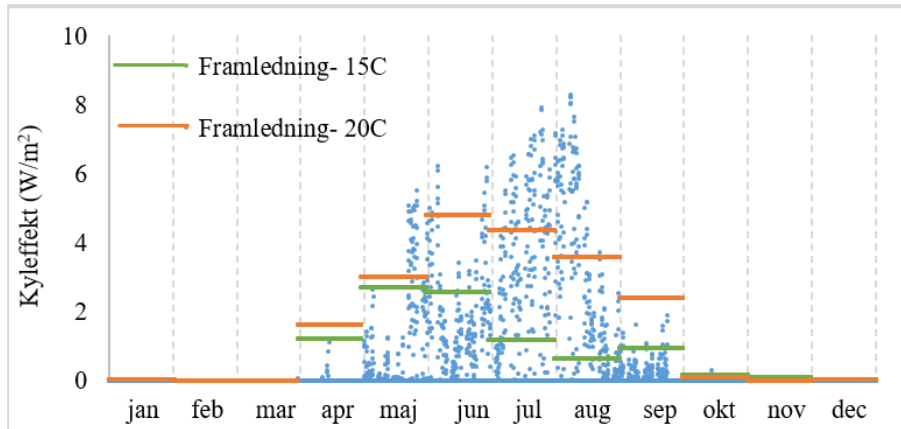
3.2.3. Känslighetsanalys

Detta avsnitt presenterar resultaten av känslighetsanalysen och är uppdelat i två underavsnitt: inverkan av framledningstvattentemperaturen och påverkan av utomhustemperaturen på FV VX-systemets prestanda.

En av de viktigaste parametrarna som påverkar FV VX-systemets prestanda är framledningstemperaturen för kylbafflarna. Framledningstemperaturen bestämmer inte bara kylbafflarnas kylkapacitet utan även styr FV VX-systemets funktionsområde. Högre framledningstemperaturer gör att FV VX-systemet kan fungera under en längre del av året vilket möjliggör ett bättre utnyttjande av kylenergin. I detta avsnitt jämförs och diskuteras resultaten från två olika framledningstemperaturer för kylbafflarna då utetemperaturen varierar mellan 15°C och 20°C.

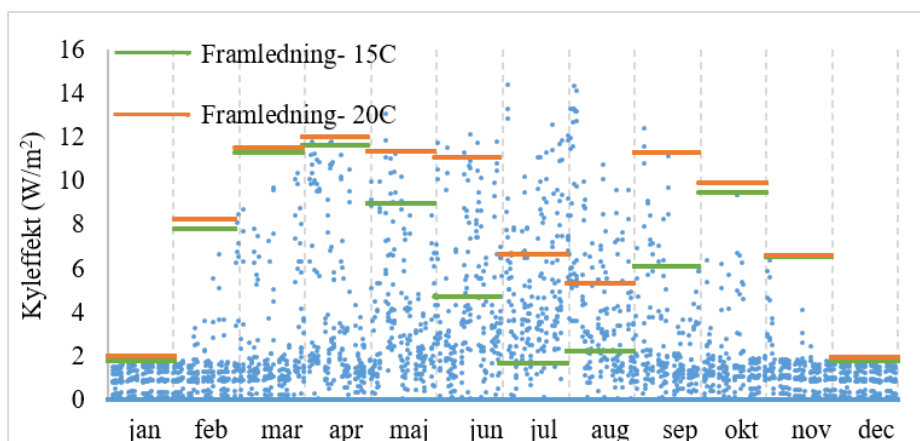
Varje blå punkt i Figur 13 representerar levererade kyleffekten för Byggnad I under en timme medan de gröna linjerna visar den maximala kyleffektavgivning som uppnås genom frikyllning under en specifik månad. Det är viktigt att notera att de gröna horisontella linjerna endast indikerar intensiteten av den maximala frikyllningseffekten och inte dess varaktighet. Resultaten indikerar att en framledningstemperatur på 20°C ger en större kyleffekt under samtliga månader. Under de varma månaderna – juni, juli och augusti – kan en betydande ökning av kyleffektavgivning observeras. Det är också värt att notera att skillnaden i kylavgivningen mellan framledningstemperaturerna 15°C och 20°C blir mer märkbar under maj-augusti. Detta beror på att en högre framledningstemperatur gör det möjligt för FV VX-systemet att vara längre i drift vilket

ökar systemets förmåga att ta hand om högre kyleffekter. Å andra sidan en lägre framledningstemperatur begränsar systemets drifttimmar till perioder med lägre kylbehov vilket i sin tur ökar skillnaden i kylbehovet som kan hanteras med framledningstemperaturerna 15°C och 20°C.



Figur 13. Kyleffekter för Byggnad I (blå punkter) samt de maximala kyleffekter som FV VX-systemet kan leverera vid framledningstemperaturer på 15°C och 20°C.

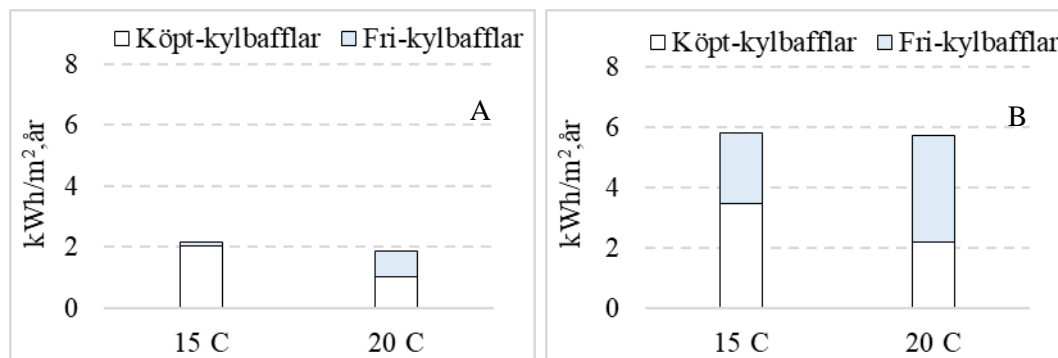
Figur 14 visar levererade kyleffekter för Byggnad II och maximala kyleffekter som förses av FV VX-systemet vid två framledningstemperaturer på 15 °C och 20 °C för varje månad. Resultaten visar att ökning av framledningstemperaturen gör ingen skillnad för att uppnå högre kyleffekter under de kalla månaderna. Detta beror på att byggnadens kylbehov är låg under dessa månader och att både framledningstemperaturerna kan förse byggnaden med tillräckliga kyleffekter. När kylbehovet blir högre under varma månaderna och fungerar systemet med en högre framledningstemperatur bättre.



Figur 14. Kyleffekter för Byggnad II (blå punkter) samt de maximala kyleffekter som FV VX-systemet kan täcka vid framledningstemperaturer på 15°C och 20°C.

Figur 15 visar mängden frikyla som det kan fås genom användning av olika framledningstemperaturer i FV VX-systemet för Byggnad I och II. Resultaten visar en

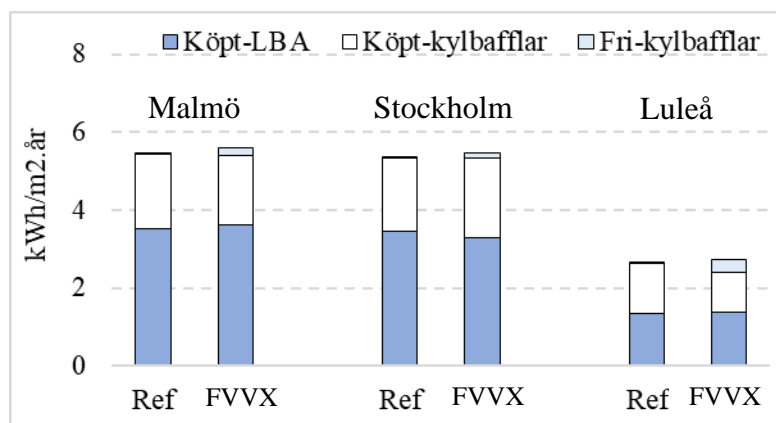
betydande ökning i frikyla användning genom användning av högtemperatur framledningstemperatur. I Figur 15A kan man se en åttafaldig ökning av använd frikyla, dvs från ca 5% i fallet med framledningstemperatur av 15 °C till 44% för framledningstemperatur av 20 °C. Resultaten i Figur 15B visar att använd andel frikyla har ökat från ungefär 39% till 61% vid användningen av framledningstemperatur av 20 °C.



Figur 15. Levererad kylenergi till kylbafflar för Byggnad I (A) och Byggnad II (B).

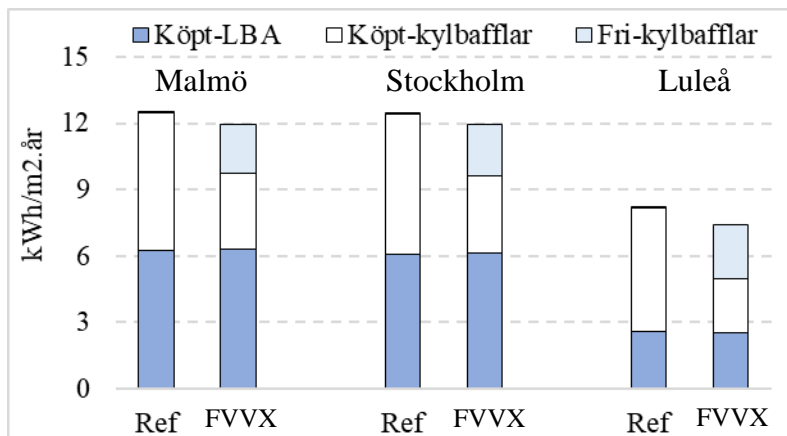
En annan avgörande parameter som påverkar den avgivna kyleffekten från FV VX-systemet är utomhustemperaturen. I denna studie undersöks denna parameter genom att variera byggnadernas placering i tre olika städer i Sverige: Malmö, Stockholm och Luleå. Ett varaktighetsdiagram över utomhustemperaturer är presenterat i Figur 3. Dessa tre städer med sina respektive utetemperaturer representerar tre klimatzoner i Sverige vilket ger en övergripande bild av hur utomhustemperaturen påverkar systemets prestanda.

Figur 17 visar mängden levererad kylenergin för Byggnad I för de tre utvalda städerna. Referensfallet omfattar byggnaden med FV VX-systemet. Resultaten visar att de största energibesparingarna uppnås i Luleå där utomhustemperaturen är lägst. Dock antyder resultaten att användningen av FV VX-systemet inte leder till några betydande energibesparingar för Byggnad I oavsett placering.



Figur 16. Simulering av levererad kylenergi för Byggnad I för Malmö, Stockholm och Luleå.

I Figur 17 framgår det att FVVX-systemet ger en betydande minskning av den köpta kylenergin för Byggnad II. Den största minskningen var för Luleå (2,5 kWh/(m²·år)) och den minsta minskningen på 2,2 kWh/m²·år var för Malmö. Data som presenteras i Figur 17 tyder på att utomhustemperaturen inte har stark påverkan på FVVX-systemets prestanda. Även om en kall stad ger större potential för frikyla på grund av lägre utomhustemperaturer är även kylbehovet i dessa städer lägre och kortare under varma perioderna.

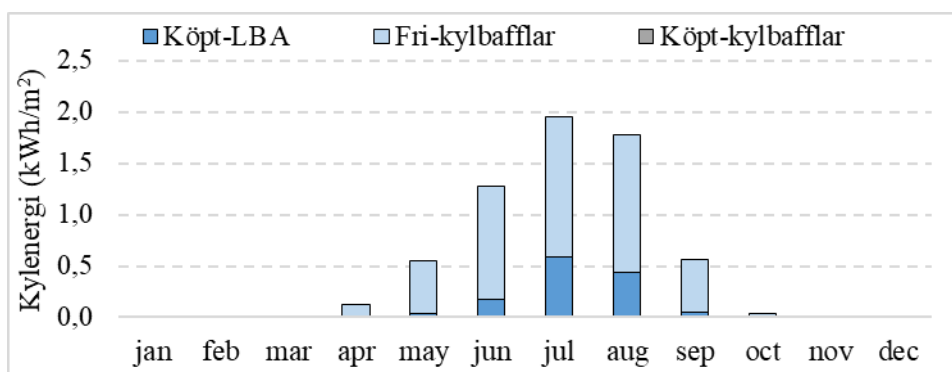


Figur 17. Levererad kylenergi för Byggnad II som simuleras under tre klimat för Malmö, Stockholm och Luleå.

3.3. Borrhål systemanalys

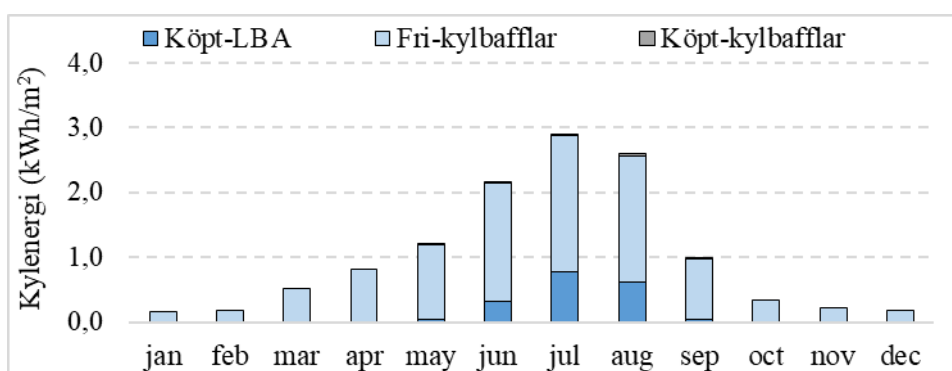
Detta avsnitt presenterar resultaten för Byggnaderna I och II utrustade med borrhålssystemet, vilket beskrevs i avsnitt 2.1. Det är viktigt att notera att borrhålssystemet levererade kyla till både kylbafflar och luftbehandlingsaggregat till skillnad från FVVX-systemet som levererade kyla endast till kylbafflar.

Figur 18 visar månatliga värden av levererad kylenergi för Byggnad I. Frikylan avser den kyla som tillförs både via luftbehandlingsaggregatet och kylbafflarna medan resterande kylenergin är inköpt. Som framgår av figuren levererar borrhålssystemet huvuddelen av kylningen även under de varmare månaderna.



Figur 18. Månatligt kylbehov för Byggnad I.

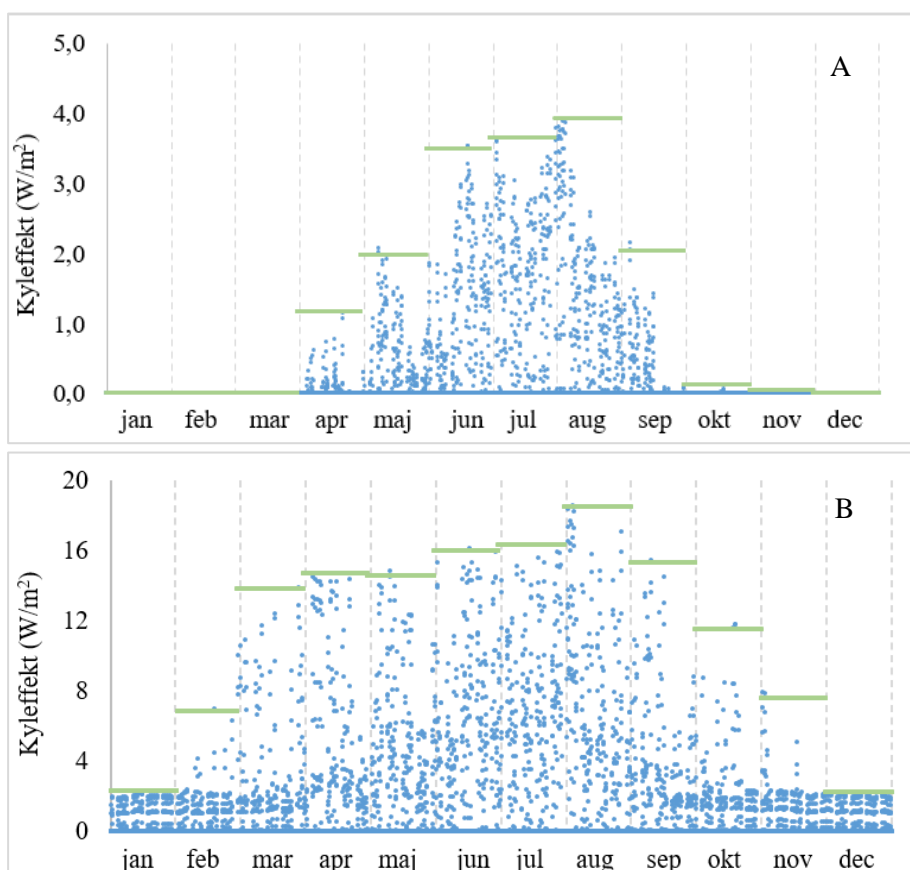
Resultaten för Byggnad II visas i Figur 19. Till skillnad från Byggnad I kräver Byggnad II kylning året runt även om behovet under de kallare månaderna är avsevärt lägre och finns främst i mötesrum och inre utrymmen. Figuren visar också att borrhålssystemet ger största delen av kylningen. Under juli och augusti är dock borrhålssystemet otillräckligt för att täcka kylbehovet för kylbafflarna vilket resulterar i ett inköp av 0,15 kWh/m² respektive 0,58 kWh/m² extra kyla för dessa månader.



Figur 19. Månatligt kylbehov för Byggnad II.

Figur 20A visar timvärden för kylbehovet för Byggnad I, som illustreras av blåa punkter i figuren, och den kyleffekt som levereras av borrhålssystemet, markerat med gröna horisontella linjer. Figuren visar att borrhålssystemet kan leverera tillräcklig kyleffekt även under de varmaste perioderna vilket främst beror på borrhålens utformning. Eftersom värmebehovet för Byggnad I är dominerande är borrhålen dimensionerade för uppvärmning och är därför överdimensionerade för kylning. Det är dock viktigt att påpeka att kyleffekten från borrhålssystemet varierar över både korta och långa perioder. I de fall när kyleffekten från borrhålssystemet inte räcker kompenseras reservkylsystemet för underskottet.

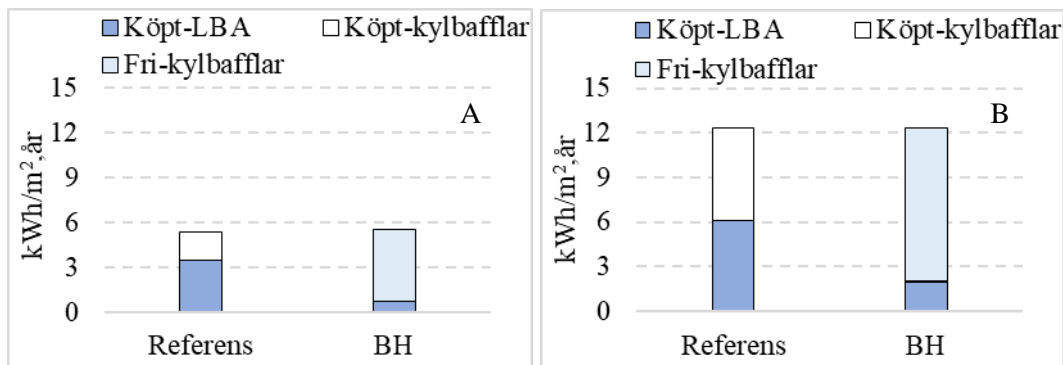
Figur 20B visar kyleffekten för Byggnad II. Även här är borrhålen dimensionerade utifrån byggnadens värmebehov. Figuren indikerar att den tillgängliga kyleffekten är tillräcklig under nästan hela året.



Figur 20. Kyleffekter (blå punkter) för Byggnad I (A) och Byggnad II (B) samt de maximala kyleffekter som borrhålssystemet kan täcka.

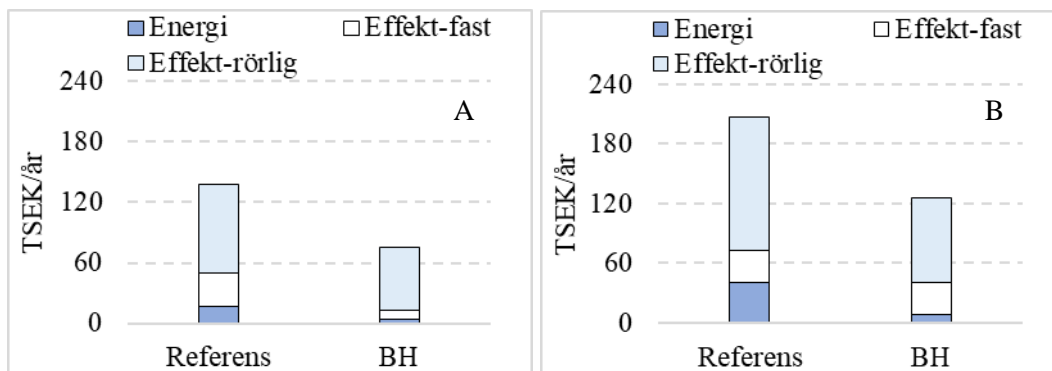
Figur 21A jämför den levererade kylenergin till Byggnad I med och utan (referensfallet) borrhålssystemet. Det framgår att i referensfallet huvuddelen av kylenergin i Byggnad I levereras av luftbehandlingsaggregatet medan kylbaffelsystem står för ca 36% av den totala kylenergin som levereras till byggnaden. När borrhålssystemet implementerades tillfördes en betydande del av kylenergin, ca 88 %, genom frikyla vilket täckte både luftbehandlingsaggregatets och kylbafflarnas behov. Jämfört med resultaten från FVX -systemet, som visas i Figur 10, visar borrhålssystemet en mycket större potential att utnyttja frikyla där andelen ökar från 2 % till 88 %.

På samma sätt indikerar jämförelsen av den levererade energin i Figur 21B för Byggnad II en betydande potential att minska mängden köpt kylenergin genom att använda borrhålssystemet. Borrhålssystemet i detta fall levererade 84% av den totala kylenergin, vilket är betydligt högre än de 16 % som FVX -systemet levererar som visas i Figur 11.



Figur 21. Levererade kylenergin till Byggnad I (A) och Byggnad II (B) med borrhålssystemet och utan borrhålssystemet (referens fallet).

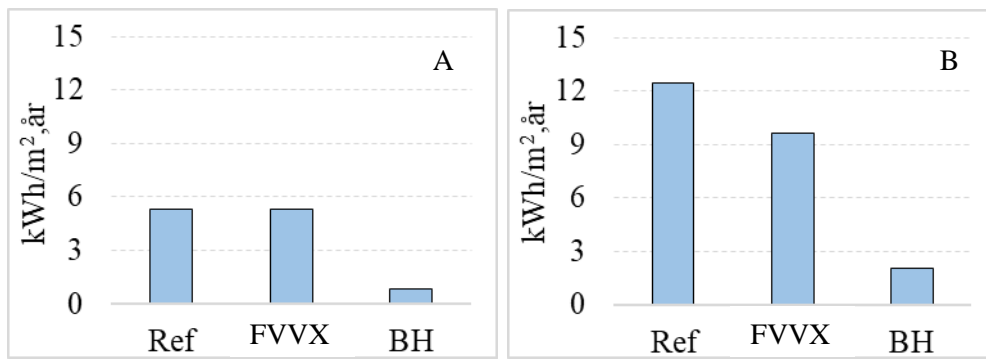
Figur 22 visar en kostnadsjämförelse mellan referensbyggnad (utan borrhålssystemet) och byggnader med borrhålssystemet. Figuren visar tydligt att implementeringen av borrhålssystemet bidrar till att minska både effekt- och energikostnader. Den största kostnadsbesparingen med borrhålssystemet ligger i minskningen av de rörliga effektkostnaderna, främst på grund av en minskning av toppeffekten. Resultaten visar en kostnadsminskning på 54% för Byggnad I och 61% för Byggnad II.



Figur 22. Årliga kylenergikostnader till Byggnad I (A) och Byggnad II (B) med borrhålssystemet (BH) och utan borrhålssystemet (referensfallet).

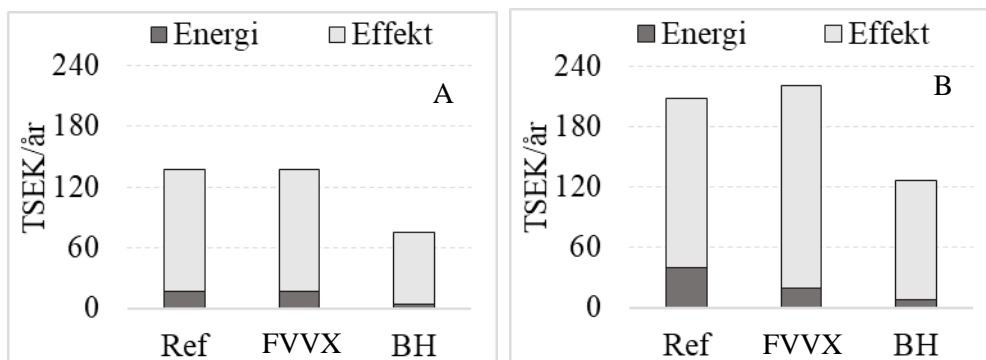
3.4. Jämförelse

Figur 23 jämför mängden köpt kylenergin mellan referensbyggnaden, byggnaden utrustad med FV VX -systemet och byggnaden med borrhålssystemet. Resultaten visar att borrhålssystemet avsevärt kan minska mängden köpt kylenergin för båda byggnaderna. Denna betydande minskning beror dels på den relativt konstanta marktemperaturen jämfört med utomhusluften, dels på att borrhålen är överdimensionerade för kylning eftersom de är dimensionerade för uppvärmning.



Figur 23. Årlig levererad energin för referensbyggnaden, byggnaden med borrhålsystemet (BH) samt byggnaden med FVVX-systemet (LK) för Byggnad I (A) och Byggnad II (B).

Figur 24 sammanfattar energikostnaderna som tidigare presenterats i avsnitt 3.2.2 och 3.3. Borrhålsystemet ger de största kostnadsbesparingarna, med en minskning på 53% för Byggnad I och 61% för Byggnad II jämfört med referensbyggnaden, främst tack vare minskade effekt- och energikostnader. Däremot är FVVX -systemets bidrag försumbart främst på grund av dess begränsade energibesparingspotentialen. Även om användning av FVVX -systemet leder till kylenergisparingar, särskilt för Byggnad II, är kylenergipriserna låga under de perioder då FVVX -systemet minskade mängden köpt kylenergi.



Figur 24. Årliga kostnader för köpt kylenergi för referensbyggnaden, byggnaden med borrhålsystemet (BH), samt byggnaden med FVVX-systemet (LK) för Byggnad I (A) och Byggnad II (B).

4. Diskussion

Denna studie undersökte och jämförde två kyltekniker utifrån deras energianvändningen och energikostnader. Även om dessa aspekter är viktiga finns det även andra viktiga faktorer som måste beaktas för att få en heltäckande bild av systemen innan beslut för investering fattas. Några viktiga faktorer har diskuterats nedan.

Investeringskostnader

En av de mest centrala faktorerna vid utvärdering av olika alternativ är investeringskostnaden. Systemen som analyseras i denna studie skiljer sig avsevärt när det gäller dessa kostnader. Att implementera ett borrhålssystem innebär vanligtvis höga initiala utgifter. Dessa inkluderar borrhning, inköp och installation av markvärmepump, anslutning av borrhål, grävning och byggarbeten för undercentralen samt även eventuellt inköp och installation av kylvärmepumpar. Dessutom medför detta system ökade underhållskostnader och en ökad komplexitet i styrsystemet. Därför bör byggnadsägare vara beredda på högre investeringskostnader när de väljer borrhålssystemet jämfört med ett förevärmebatterisystem.

Å andra sidan är ett borrhålssystem ett välkänt och beprövat system och en av de mest robusta metoderna för att förse byggnaderna med värme och kyla under året. Variationerna i marktemperaturen är betydligt mindre frekventa än temperaturfluktuationerna av utomhusluften vilket resulterar i en stabilare och jämnare tillgång till kylenergi året runt.

Driftskomplexitet och underhåll

Driftskomplexitet och underhållskrav är också viktiga faktorer som bör beaktas. Borrhålssystemet kräver noggrann planering och platsbedömning men när det väl är installerat är underhållsbehoven vanligtvis låga [7]. De stabila marktemperaturerna i Sverige minskar behovet av frekventa efterjusteringar vilket gör dessa system pålitliga på lång sikt. Värme(kyl)förflyttningen i detta system görs med cirkulationspumpar vilket eliminerar behovet av eldrivna kompressorer. Denna utformning leder till lägre underhållskostnader och minskad driftskomplexitet samt förbättrad systemrobusthet.

Frikyla värmepumpsystemet innebär däremot en högre nivå av driftskomplexitet särskilt när det gäller att upprätthålla balansen mellan värme- och kylavgivning. I Sverige, där säsongsförändringarna av utetemperaturer är betydande, krävs att systemet är noggrant kalibrerat för att säkerställa att det fungerar effektivt året runt. Detta ökar behovet av mer kvalificerad underhållspersonal och kan leda till högre driftskostnader särskilt i äldre byggnader som kan kräva ombyggnad.

5. Slutsats

I denna rapport utvärderas energieffektivitet och energikostnader vid frikylning genom bergkyla och genom uteluftskylning, i två svenska kontorsbyggnader. Syftet med rapporten är att jämföra de två frikylningsteknikerna och att resultatet skall kunna användas som underlag vid val av kylsystem.

Följande huvudslutsatser kan dras från det utförda arbetet i projektet:

1. Begränsad effektivitet hos frikyla värmeväxlare systemet (FV VX-systemet): FV VX - systemet ger endast små energibesparingar och kan inte tillgodose hela kylbehovet under varma sommarmånader. Systemet är mest effektivt under vår- och höstmånaderna och behöver ett kompletterande kylsystem under sommaren vilket begränsar dess totala effektivitet under året.
2. Borrhålssystemets prestanda är överlägsen: Borrhålssystemet visar en betydligt högre potential för energibesparingar jämfört med ett FV VX-system-. Genom att utnyttja den relativt låga temperaturen i berggrunden kan borrhålssystemet leverera effektiv kylning året runt. Användning av borrhålssystemet minskade de årliga kylenergi- och effektkostnaderna med upp till 61% i Byggnad II och 54% i Byggnad I jämfört med referensbyggnaderna utan frikyla.
3. Kostnadseffektivitet: Trots att borrhålssystemet innebär högre initiala investeringskostnader erbjuder det betydande långsiktiga kostnadsbesparingar genom minskad energianvändning. FV VX-systemet har en lägre investeringskostnad men ger en mindre kostnadsbesparing, på ungefär 1% under ett år.

Rapporten rekommenderar därför att byggnadsägare som strävar efter långsiktiga energibesparingar och minskad miljöpåverkan överväger att installera borrhålssystem för kylning i kommersiella byggnader i jämförelse med frikyla värmeväxlare system.

Referenser

- [1] A. Maccarini, G. Hultmark, N.C. Bergsøe, K. Rupnik, A. Afshari, Field study of a self-regulating active beam system for simultaneous heating and cooling of office buildings, *Energy Build* 224 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110223>.
- [2] T. Arghand, Direct-Ground Cooling Systems for Office Buildings: Design and Control Considerations, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, 2019. https://research.chalmers.se/publication/510102/file/510102_Fulltext.pdf.
- [3] S. Gehlin, O. Andersson, J.-E. Rosberg, Country Update for Sweden 2020, in: Proceedings World Geothermal Congress, The International Geothermal Association (IGA), Reykjavik, Iceland, 2020. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGASTandard/WGC/2020/01040.pdf>.
- [4] T. Arghand, Direct Ground Cooling Systems for Office Buildings, Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2021.
https://research.chalmers.se/publication/522535/file/522535_Fulltext.pdf
(accessed February 10, 2021).
- [5] R. Kosonen, J. Penttinen, The effect of free cooling and demand-based ventilation on energy consumption of self-regulating and traditional chilled beam systems in cold climate, *Indoor and Built Environment* 26 (2017) 256–271.
<https://doi.org/10.1177/1420326X16683236>.
- [6] Branchstandard för energi i byggnader, SVEBY, (2024). <https://www.sveby.org/>
(accessed August 30, 2024).
- [7] O. Andersson, S. Gehlin, State-of-the-Art: Sweden Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems 2018, Svenskt Geoenergi Centrum, Lund, Sweden, 2018.
http://media.geoenergicentrum.se/2018/06/Andersson_Gehlin_2018_State-of-the-Art-report-Sweden-for-IEA-ECES-Annex-27.pdf.