



Ny värmepump – utvärdering ur ett livscykelperspektiv



Ny värmepump – utvärdering ur ett livscykelerspektiv

Forskningsprojekt inom Energimyndighetens forskningsprogram E2B2

Rapportförfattare:

Stefan Olsson (KTH)

Xenofon Lemperos (KTH)

Joakim Nordemo (Bengt Dahlgren)

Nils Brown (KTH)

Projektets styrgrupp:

Johan Tjernström (Akademiska Hus)

Sven Lindahl (Akademisk Hus)

Joakim Nordemo (Bengt Dahlgren)

Erik Dotzauer (Fortum Värme)

Fabian Levin (Fortum Värme)

Klas Berglöf (ClimaCheck)

Jakob Månberg (ClimaCheck)





Förord

”E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende” är ett program där akademi och näringsliv samverkar, både strategiskt och praktiskt.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggentreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknik konsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nyttiggörande av den kunskap som tas fram i programmet.

Ny värmepump – utvärdering ur ett livscykelperspektiv är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av Kungliga Tekniska Högskolan och har genomförts i samverkan med Akademiska Hus AB, Bengt Dahlgren Stockholm AB, ClimaCheck AB och AB Fortum Värme samägt med Stockholm Stad.

Projektets syfte är att med hjälp av en forskningsinsats följa upp och genomföra en förenklad livscykelanalys (LCA) avseende energi och inbyggd klimatpåverkan hos en stor värmepumpsanläggning på KTHs campusområde, som Akademiska Hus har beslutat att investera i. Att studera inbyggd klimatpåverkan från en anläggning där fastighetsägaren går från fjärrvärme och fjärrkyla med en viss bränslemix till en anläggning som drivs med ursprungsmärkt el har tidigare inte studerats eller använts som underlag för investeringsbeslut. Resultat från projektet bedöms kunna ge ytterligare beslutsunderlag inför investeringsbeslut i energitekniska åtgärder ur ett hållbarhetsperspektiv.

Stockholm, 20 december 2016

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Olika material och produkters klimatpåverkan får allt större betydelse när byggnaderna blir mer och mer energieffektiva. Klimatpåverkan över en byggnads livscykel förflyttas från drifts skedet till produktions skedet. Projektets syfte har varit att utifrån ett livscykelperspektiv undersöka klimatpåverkan för ett specifikt kyl- och värmepumpssystemet, installerat på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm.

Klimatpåverkan för material bedöms utifrån så kallad inbyggd klimatpåverkan, det vill säga utsläpp som uppstår till följd av produktion och transporter av material och produkter, klimatpåverkan under driftfasen undersöks också för jämförelse. Klimatpåverkan studeras i form av koldioxidekvivalenter ($\text{CO}_2\text{-e}$). Kyl-/värmepumps-installationen är avsedd att minska mängden köpt fjärrvärme och fjärrkyla för byggnaderna på Campus KTH.

Projektresultaten visar att den inbyggda klimatpåverkan i denna typ av anläggning är liten i förhållande till klimatpåverkan till följd av energianvändning under drifts skedet. Beräkningarna tyder på att "återbetalningstiden" för klimatpåverkan (dvs. inbyggd klimatpåverkan dividerat med årlig minskning av klimatutsläpp) är ca. 2 år. Den initiala inbyggda klimatpåverkan är ca 640 ton $\text{CO}_2\text{-e}$ vilket ska jämföras med ca. 15 000 ton $\text{CO}_2\text{-e}$ från energianvändning under hela drifts skedet (beräknat för 30 år). Detta är under antagandet att medelproduktionsmix används för el och fjärrvärme.

Hur olika energislag miljövärderas, och vad man tror om energimixernas framtida utveckling, har mycket stor påverkan på resultatet. Utifrån ett miljöperspektiv är det en fördel att installera denna typ av kyl/värmepumpsanläggning om man använder medelproduktionsmixer för energi. Vid marginalproduktionsmix för el och fjärrvärme är det en fördel att använda fjärrvärme och fjärrkyla.

Det är också viktigt att få en anläggning som har så stabila driftsförhållanden som möjligt genom att exempelvis säkerställa stabila temperaturnivåer på varma respektive kalla sidan på en kylmaskin eller värmepump. Detta ger förutsättningar för maximal energieffektivitet och livslängd. Att optimera anläggningen till högsta möjliga effektivitet bör prioriteras eftersom detta påverkar energianvändningen under driftfasen som står för en mycket stor andel av klimatpåverkan under anläggningens livscykel.

Beräkningarna visade att köldmedieläckage kan påverka systemets totala klimatpåverkan signifikant. Därför är det viktigt att ta åtgärder för att minimera köldmedieläckaget och att använda ett köldmedium med så låg klimatpåverkan som möjligt. I detta fall användes R134a. Beräkningarna visade också att rörsystemet står för en stor andel av den initiala inbyggda klimatpåverkan. Därför är det viktigt att



hålla nere längden på rör, inte bara ur ekonomisk synvinkel utan även för att minska inbyggd klimatpåverkan.

Nyckelord: livscykelperspektiv, inbyggd klimatpåverkan, miljöbedömning, kylmaskiner, värmepumpar, driftoptimering.



Summary

The relative significance of global warming potential (GWP) due to building materials over the lifetime of a building is increasing as buildings' operational energy demand reduces. The aim of this project has been to investigate the GWP due to a mid-scale refrigeration and heat pump system at KTH Royal Institute of Technology from a life-cycle perspective.

The assessment considers the embodied GWP (the GWP due to the production and transport of materials required for the heat pump - refrigeration system itself) and GWP due to operational energy demand (electricity required to operate the system).

The results of the study show that the integrated climate impact of this type of plant is small in relation to climate impacts due to operational energy demand. The calculations suggest that GWP "payback time" (i.e., the time after which the GWP reduced due to reduced operational energy demand due to the installation of the heat pump/refrigeration system is equal to the initial embodied GWP due to material production) is about 2 years. The initial embodied GWP is about 640 tonnes CO₂-e, compared with about 15 000 tonnes CO₂-e of energy due to the operational energy demand over the lifetime of the system (estimated to be 30 years).

These results assume that the GWP due to operational electricity demand is based on the yearly average production mix for the Nordic electricity network. The study also demonstrated that assumptions about accounting for GWP due to grid-based energy carriers has a significant effect on the calculated lifetime GWP. Compared with an alternative energy supply scenario based on district heating and cooling, the on-site heat pump/refrigeration system has a lower lifetime GWP when assuming the GWP due to bought energy is based on the yearly average production mix for all energy carriers. The district heating and cooling alternative is however better from the perspective of lifetime GWP than the on-site heat pump - refrigeration system when assuming the GWP due to bought energy is based on the marginal supply mix.

A conclusion of the work is that from a GWP perspective, optimization of the heat pump/refrigeration system's operation to ensure a low electricity demand per unit delivered heating and cooling is the highest priority. One way of contributing to this is to ensure stable operating conditions including stable temperature levels between the hot and cold sides of the systems.

A further observation is that refrigerant leakage can have a relatively large contribution to the lifetime GWP that is not due to operational energy demand. Therefore effective refrigeration management is also a high priority. Of the embodied GWP arising due to material production, about half is due to production of pipework required for the new system. Therefore minimizing the length of pipework is not only



efficient from an economic perspective, but also from the perspective of embodied GWP.

Key words: *life cycle perspective, embodied emissions, environmental assessment, chillers, heat pumps, energy optimization.*

Ordlista och förkortningar

COP – 'Coefficient of Performance'. Ett mått på en kylmaskin/värmepumps effektivitet.

Funktionella enheten – En produkt eller tjänsts kvantifierade prestanda som används som referensenhet i LCA.

GWP – Global Warming Potential - klimatpåverkan

Inbyggd klimatpåverkan - I denna rapport syftar detta mot den klimatpåverkan som uppstår från råvaruutvinning, produktion och transport för materialen som behövs för kyl- och värmepumpanläggning.

Inventeringsanalys – se LCI

LCA - Life Cycle Assessment, svensk översättning – livscykelanalys. En sammanställning och utvärdering av inflöden, utflöden och möjliga miljöpåverkan från en produkt eller tjänst under hela dess livstid.

LCI – Life Cycle Inventory. LCA-skede som går ut på att sammanställa och kvantifiera inflöden och utflöden för en produkt eller tjänst under dess livstid.

LCIA – Life Cycle Impact Assessment. LCA-skede som syftar mot att förstå och utvärdera storleken och betydelse av eventuella miljöpåverkan för en produkt eller tjänst under hela dess livstid.

PDC – Centre for High Performance Computing at KTH.

Påverkansbedömningsmetod – översättning av engelska 'impact assessment method'. Se LCIA.



INNEHÅLL

1	INTRODUKTION	9
1.1	PROJEKTBEKRIVNING	9
1.2	PROJEKTMÅL	10
1.2.1	DET STUDERADE SYSTEMET	10
1.3	PROJEKTGENOMFÖRANDE	14
2	METOD	16
2.1	DELPROJEKT DRIFTOPTIMERING	16
2.2	DELPROJEKT MILJÖBEDÖMNING	16
3	RESULTAT OCH MÅLUPPFYLLELSE	23
3.1	ENERGIEFFEKTIVITET I DRIFTSKEDET	23
3.2	BEDÖMNING AV KLIMATPÅVERKAN	26
3.2.1	KLIMATPÅVERKAN FRÅN INBYGGT MATERIAL	26
3.2.2	KLIMATPÅVERKAN FRÅN DRIFTENERGI	29
3.2.3	KÄNSLIGHETSANALYS	32
4	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	36
5	PUBLIKATIONSLISTA OCH PROJEKT-PRESENTATIONER	41
6	REFERENSER	42
	BILAGA 1 – MILJÖBEDÖMNING UR ETT LIVSCYKELPERSPEKTIV	44
	BILAGA 2 – REDOGÖRELSE FÖR DRIFTOPTIMERING	45
	BILAGA 3 – KLIMATPÅVERKAN FRÅN NÅGRA OLIKA MATERIAL	46



1 Introduktion

Frågan om olika material och produkters klimatpåverkan hamnar allt högre upp på dagordningen och börjar diskuteras allt mer i svensk byggsektor. Därför är det viktigt att sprida kunskap om produkters miljöpåverkan och hur dessa kan bedömas ur ett livscykelperspektiv.

Livscykelanalys (LCA) är en metod för att åstadkomma en helhetsbild över den totala potentiella miljöpåverkan under en produkts (eller en tjänst) hela livscykeln. Livscykeln inkluderar oftast fyra skeden; råvaruutvinning, tillverkningsprocesser, användning och avfallshantering, inklusive alla transporter och all energiåtgång i mellanleden (ISO, 2006). LCA är ett relativt nytt begrepp som funnits i ca 20 år och det är fortfarande ovanligt att företag i byggbranschen utför LCA inför investeringsbeslut. Detta beror delvis på att branschen inte varit mottaglig för dess implementering eftersom konkret tillämpning ofta saknats. Ett hinder som nämns är att enklare verktyg för att bedöma ett materials eller produkts klimatpåverkan i tidigt skede saknas (Olsson et al., 2014).

I detta projekt studeras en kyl- och värmepumpsanläggning som installerats på Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm. Syftet med anläggningen är att minska kostnaderna för uppvärmning- och kylbehov. Den nya kyl- och värmepumpsanläggningen ersätter till stora delar leveransen av fjärrvärme och fjärrkyla vilket var den befintliga energitillförseln för KTH.

1.1 Projektbeskrivning

Projektet har två syften. Första syftet är att utifrån ett livscykelperspektiv undersöka klimatpåverkan för det specifika kyl- och värmepumpssystemet som installerats på KTH i Stockholm. Klimatpåverkan för material bedöms utifrån så kallad inbyggd klimatpåverkan, det vill säga utsläpp som uppstår till följd av produktion av material och produkter som behövs för att installera denna kyl- och värmepumpsanläggning, klimatpåverkan under drift fasen undersöks också. Klimatpåverkan studeras i form av koldioxidekvivalenter (CO₂-e). Det finns många andra faktorer och typer av utsläpp som påverkar klimatet men fortsättningsvis i denna rapport används ordet klimatpåverkan synonymt med utsläpp av CO₂-e.

Projektets andra syfte är att genomföra en energiuppföljning och driftoptimering för den aktuella anläggningen. Uppföljning är en kontinuerlig process för att säkerställa energieffektiviteten hos anläggningen, dessutom optimeras anläggningen där olika driftfall och inställningsparametrar för kyl- och värmepumpsanläggningen testas och följs upp. Energieffektivitet jämförs med den före installation av kyl- värmepumpsanläggningen samt uppskattad energianvändning i beslutsunderlaget för investeringen i denna nya kyl- och värmepumpsanläggning. Studien använder tidsperspektivet 30 år och kyl- och värmepumpssystemets prestanda jämförs sedan



med ett fall där fjärrvärme och fjärrkyla fortsättningsvis skulle stå för hela energileveransen till KTH. Vid miljövärdering av köpt energislag så har befintliga data utifrån ett flertal olika antagande används. Det har inte varit ett syfte i projektet att utveckla nya metoder för miljövärdering av köpt energislag. I projektet utarbetas några olika scenarier för miljöpåverkan från olika energislag som appliceras på den specifika anläggningens energianvändning. Andra metoder för att bedöma ett energislags miljöpåverkan än de som används i detta projekt finns.

1.2 Projekt mål

Det övergripande målet med projektet är att ta fram ny kunskap om klimatkonsekvenserna av att konvertera från existerande fjärrvärme och fjärrkyla till elbaserad energiförsörjning genom en egen större kyl- och värmepumpsanläggning. Projektet ska generera ny kunskap om denna typ av anläggnings prestanda avseende energieffektivitet samt klimatpåverkan från inbyggt material.

Målen med projektet är att ta fram ny kunskap om:

- energieffektivitet hos aktuell typ av anläggning,
- anläggningens energiprestanda i förhållande till den i projekteringskedet beräknade energibesparingen,
- data från olika källor när det gäller inbyggd klimatpåverkan från olika material som används i det aktuella installationsprojektet,
- inbyggd klimatpåverkan (CO₂-ekvivalenter) för anläggningens tillkommande material,
- "CO₂-återbetalningstid" för anläggningen utifrån energibesparing och inbyggd klimatpåverkan baserat på en fast tidsperiod, samt
- huruvida det var rätt investeringsbeslut att bygga anläggningen utifrån ett helhets- och hållbarhetsperspektiv.

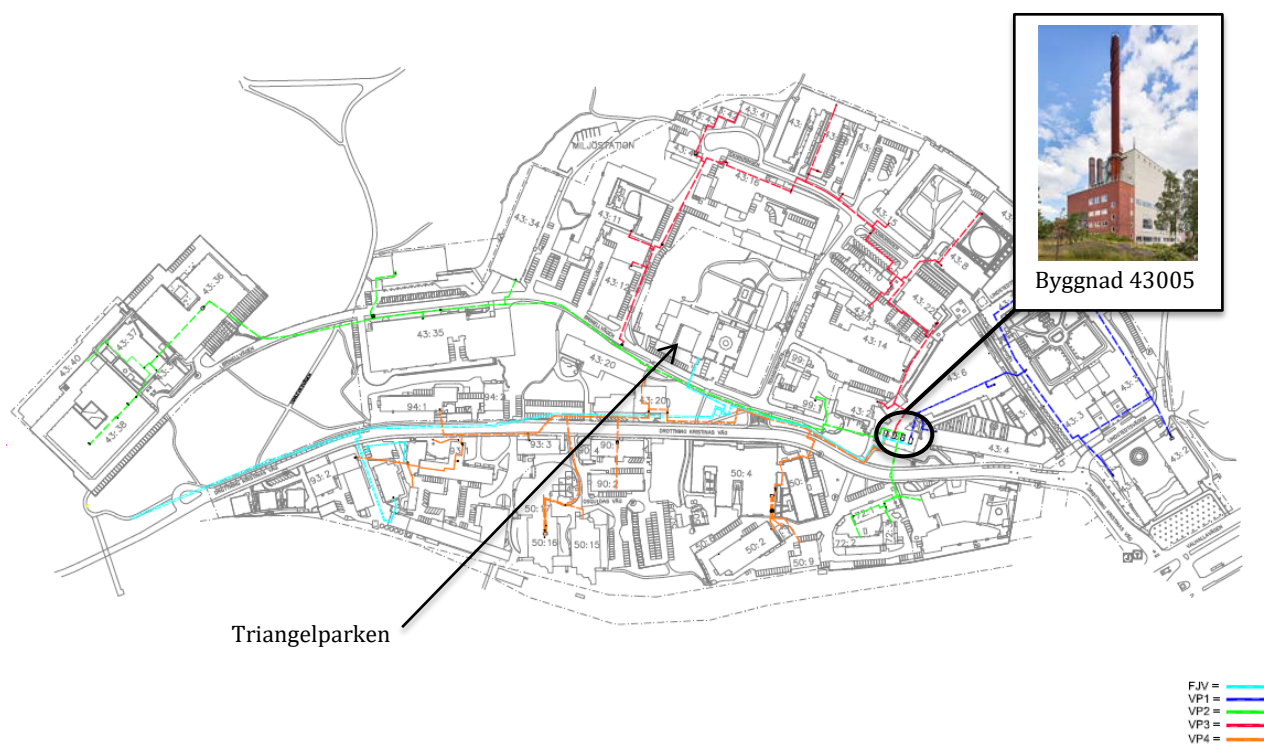
1.2.1 Det studerade systemet

Kungliga Tekniska Högskolan är ett campus som ligger i norra delen av Stockholms stadskärna. Campuset börjar vid Valhallavägen och sträcker sig norrut i en båge, gränsande mot Nationalstadsparken. På området finns drygt ett 50-tal byggnader från olika tidsepoker och av olika storlek. Området är under ständig utveckling med flertalet pågående nyproduktionsprojekt, bland annat totalt ca 600 studentlägenheter. Totalt arbetar, forskar och studerar ca 20 000 personer i området.

Det finns fyra primärvärmekretsar för värmedistribution på campusområdet. Varje värmekrets (VP1 – VP4 i *Figur 1*) är anslutet till Stockholms fjärrvärmenät genom plattvärmeväxlare placerade relativt centralt på området i den före detta värmecentralen i byggnad 43005. Flertalet men inte alla byggnader är anslutna till KTHs interna värmenät. Det interna värmedistributionsnätet på KTH ägs av Akademiska Hus AB. Fjärrvärmenätet i Stockholm ägs och drivs av AB Fortum Värme.



På KTH finns även ett kylnät, detta är dock inte anslutet till alla byggnader på området. Kylnätet var tidigare direktanslutet till fjärrkylnätet med en anslutningspunkt i den så kallade "Triangelparken", se *Figur 1*. I samband med installationen av kyl- och värmepumpsanläggningen beslutades att växla av KTHs lokala kylnät mot fjärrkylnätet genom nya plattvärmexlare installerade i byggnad 43005. Detta innebär att nya anslutningsledningar grävdes ner i marken mellan den tidigare anslutningspunkten till byggnad 43005 och tillbaka igen. Stockholms fjärrkylnät ägs och drivs av AB Fortum Värme.



Figur 1: Värmenätets utbredning (VP1 – VP4) samt fjärrvärmeanslutning (FJV) på KTH Campus. Fjärrkylans anslutningspunkt markerad i Triangelparken.

Effekt- och energianvändningen för fjärrvärme och fjärrkyla för hela KTH Campus framgår av *tabell 1* nedan. Tabellen avser faktiskt uppmätt energianvändning (köpt energi, ej graddagskorrigerad) för perioden första januari 2011 till sista december 2011.

Eftersom det finns ett samtida värme- och kylbehov på KTH har man valt att installera en kyl- och värmepumpsanläggning för att på en lokal nivå bättre kunna utnyttja energiflödena mellan byggnaderna. Installationen genomfördes under sommaren 2014 och drifsets hösten/vintern 2014.

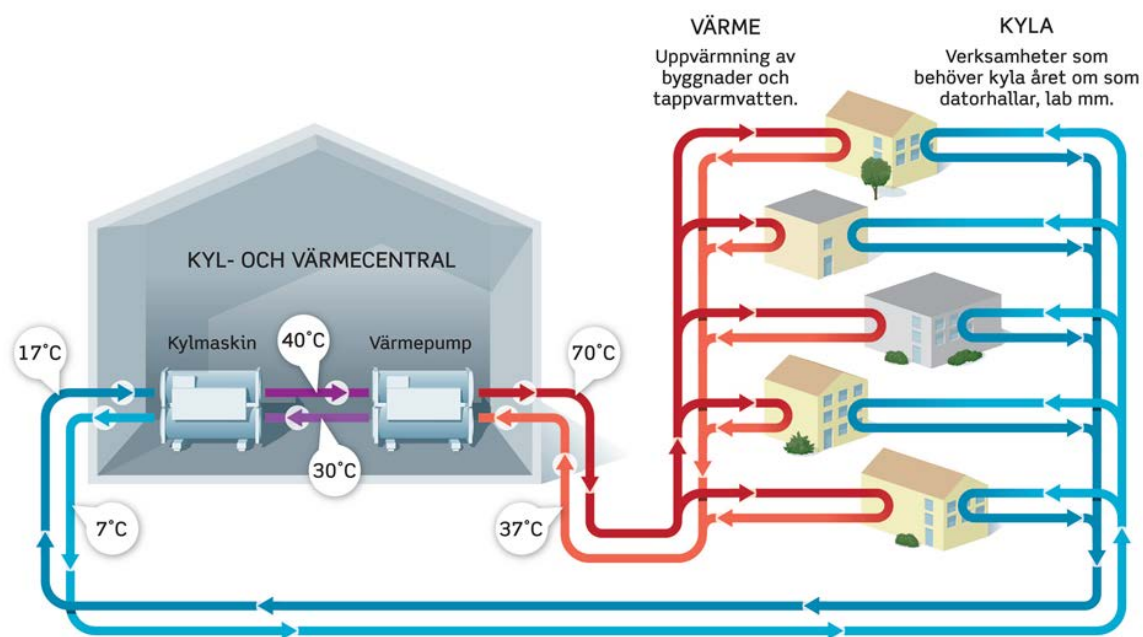


Tabell 1: Faktisk uppmätt energianvändning för hela KTH Campus under perioden 1:a januari 2011 till 31:a december 2011. Observera att denna energianvändning inte är graddagskorrigerad.

Energislag	Värde	Enhet
Fjärrvärme		
<i>Dimensionerande värmebehov</i>	12,7	MW
<i>Värmeanvändning december - mars</i>	20,3	GWh
<i>Värmeanvändning april, oktober - november</i>	7,5	GWh
<i>Värmeanvändning maj - september</i>	3,3	GWh
Total värmeanvändning	31,1	GWh
Fjärrkyla		
<i>Dimensionerande kylbehov</i>	6,9	MW
<i>Kylanvändning maj - september</i>	9,1	GWh
<i>Kylanvändning oktober - april</i>	9,7	GWh
Total kylanvändning	18,8	GWh
Total fjärrvärme och fjärrkyla	49,9	GWh

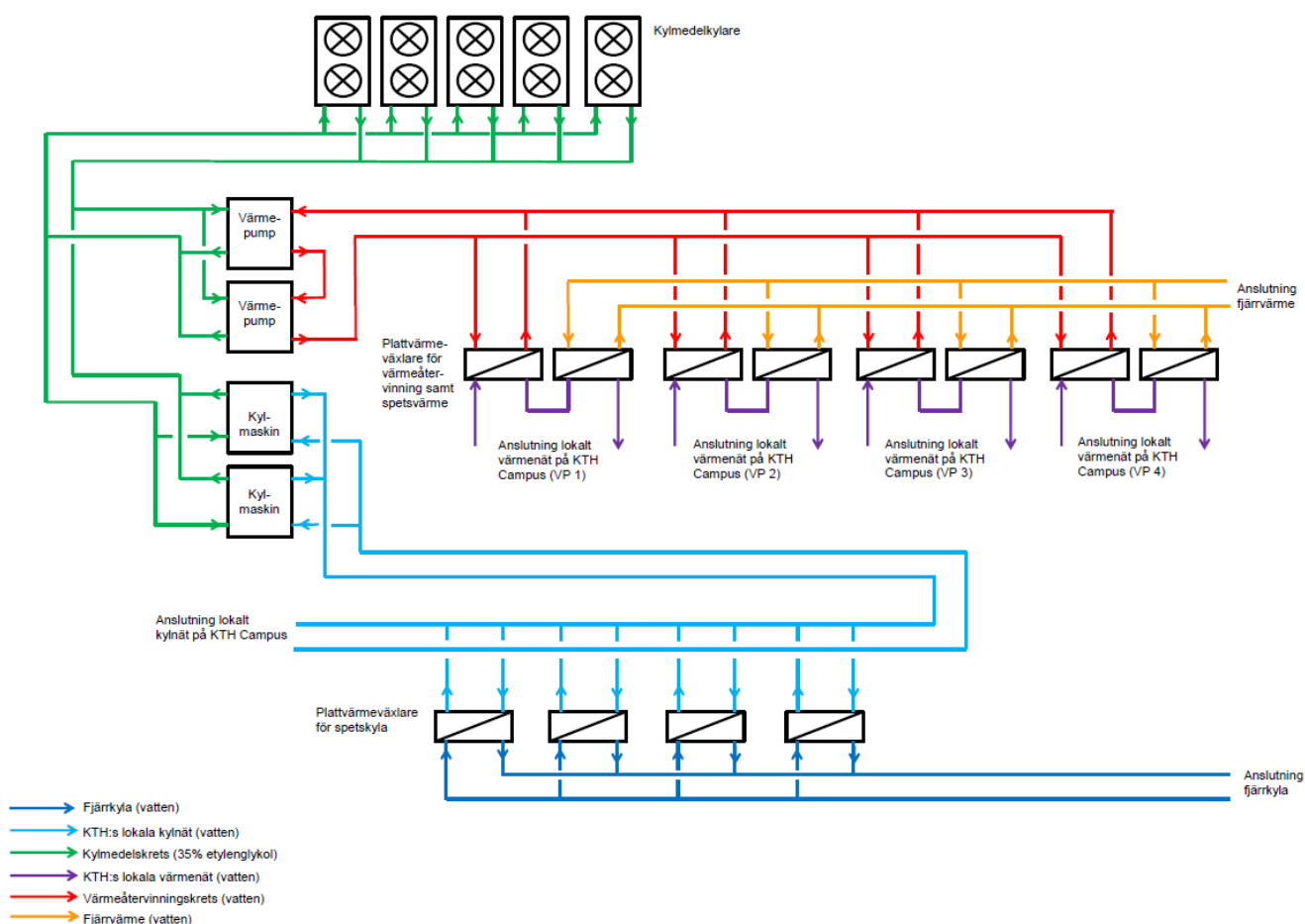
En förenklad principskiss av kyl- och värmepumpsanläggningen kan ses i *Figur 2*. Systemet fungerar så att en kylkrets hämtar överskottsvärme från datorhallar, serverrum, laboratorium och övriga verksamheter som behöver kyla året om. En mellankrets som kyler kylmaskinernas varma sida används som värmekälla till värmepumparna. För att kunna nyttiggöra den lågvärdiga överskottsvärmen från mellankretsen används värmepumparna för att lyfta temperaturen tillräckligt för att kunna producera varmvatten och värme i byggnaderna. När det är som varmast utomhus används kompletterande fjärrkyla och när det är som kallast ute används kompletterande fjärrvärme – från fjärrkyla-/fjärrvärmenätet i Stockholm.

Kylmaskinerna i anläggningen kommer att tillgodose det mesta av kylbehovet på KTH men stora delar av värmebehovet kommer fortsättningsvis att täckas av fjärrvärme. Köldmedium i både kylmaskiner och värmepumpar är R134a. Total fyllnadsmängd är 730 kg.



Figur 2: Principiell uppbyggnad av kyl- och värmepumpsanläggningen installerad på KTH Campus (källa: Akademiska Hus AB).

Figur 3 visar ett mer detaljerat principschema över kyl- och värmepumps-anläggningen med dess olika delkomponenter. Systemet består i huvudsak av två kylmaskiner och två värmepumpar med tillhörande kringutrustning. Den totala installerade kyleffekten är ca 2 MW vilket ungefär sammanfaller med den kyl-baslast som finns på KTH. En stor del av denna baslast utgörs av PDC Centrum för High Performance Computing. PDC tillhandahåller tjänster som till exempel superdatorer och lagringsresurser. Dessa datorer avger värme som måste kylas bort, denna överskottsvärme kan nu med hjälp av kyl- och värmepumpsanläggningen återföras till de olika byggnaderna på KTH.



Figur 3: Principschema för hela kyl- värmepumpsanläggningen installerad på KTH.

Delar av kyl- och värmepumpsanläggningen har kunnat återanvändas från en tidigare installation av kylmaskiner som fanns kvar i byggnad 43005. De återanvända produkterna är främst fyra av de fem kylmedelkylarna som står på taket till byggnad 43005 och vars funktion är att kyla bort överskottsvärme från kylmaskinerna om värmebehovet i byggnaderna på KTH-området inte är tillräckligt stort.

1.3 Projektgenomförande

Akademiska Hus har tillhandahållit ett installationsprojekt i form av en ny kyl- och värmepumpsanläggning på KTH i Stockholm. Projektet har letts från KTH (Avdelningen för miljöstrategisk analys – fms) som samordnar projektet och verkar som projektledare. Projektet har bestått av två relativt fristående delar; en "Miljöbedömningsdel" och en "Optimeringsdel". Projekttiden har omfattat perioden mars 2015 till december 2016. Denna slutrapport sammanfattar de två projektdelarna,



en mer fullständig rapportering för respektive del återfinns i *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv* och *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.

Huvudfinansär är Energimyndigheten. Organisationer som deltagit och medfinansierat forskningsprojektet är (i bokstavsordning): Akademiska Hus, Bengt Dahlgren, ClimaCheck, Fortum Värme, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH).

I miljöbedömnings-delen har inbyggd klimatpåverkan ur ett förenklat livscykelperspektiv tillsammans med klimatpåverkan under drifts skedet studerats. I miljöbedömnings-delen har i huvudsak Fortum Värme och KTH arbetat. I optimeringsdelen studerades och följdes upp olika driftfall och inställningsparametrar för kyl- och värmepumpsanläggningen. I optimeringsarbetet har i huvudsak Akademiska Hus, Bengt Dahlgren AB och ClimaCheck utfört arbete. Carrier som levererat kylmaskiner och värmepumpar har involverats i optimeringsarbete.

Projektmöten med hela projektgruppen har genomförts två till tre gånger per år. Arbetsmöten i de två olika delarna av projektet har genomförts regelbundet, ibland så ofta som varannan vecka.

Delprojektet för miljöbedömning inleddes med att inventera och sammanställa ingående materialmängder. En del antaganden och förenklingar har varit nödvändiga i detta inventeringsarbete. Klimatpåverkan från de inbyggda produkterna och materialen jämfördes sedan med klimatpåverkan från drifts energi. För detaljerad redovisning av arbetet med driftoptimering se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*.

Delprojektet för driftoptimering och energiuppföljning inleddes med prestandaprovning och mätning av anläggningen vilket ligger till grund för energioptimeringen. ClimaCheck mätutrustning finns fast installerad i anläggningen. Utrustningen är en svenskutvecklad metod för analys av värme- och kylprocesser i syfte att optimera funktionaliteten i den dagliga driften. Metoden är utvecklad av AB ClimaCheck. Optimeringsarbetet på kyl-/värme-pumpsanläggningen har genomförts i nära samarbete med Akademiska Hus driftsorganisation på KTH. Optimeringsarbetet har omfattat olika driftfall under framför allt vintern 2015/2016 samt vår/sommar 2016. För detaljerad redovisning av arbetet med driftoptimering se *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.



2 Metod

I detta avsnitt beskrivs, på ett översiktligt sätt, metoder och tillvägagångssätt för forskningsprojektet. En mer fullständig rapportering för respektive projektdel återfinns i *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv* och *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.

2.1 Delprojekt driftoptimering

I inledningsfasen gick projektgruppen igenom anläggningen och driftledaren Sven Lindahl på Akademiska Hus redovisade nuläget i syfte att få en grundlig förståelse hur anläggningen körs idag och var förbättringspotential finns. Detta resulterade i en lista med diskussions-/förbättringspunkter för fortsatt analys. Utifrån denna lista definierades vilka delområden som, utifrån bedömd energisparpotential, bör prioriteras i projektet och vilka analyser som är aktuella och vilka indata som krävs för analys. Mätdata inhämtas från Akademiska Hus överordnade styr- och övervakningssystem, ClimaCheck-utrustningen samt det interna styrsystemet i kyl- och värmepumparna från Carrier.

Utifrån analyserna framkom ett antal förslag på åtgärder att genomföra i anläggningen. Till exempel ändring eller införande av olika reglerparametrar såsom tids- eller temperaturstyrning samt behov av kompletterande komponenter och utrustning. För att se den fullständiga effekten av de driftoptimeringsåtgärderna som genomförs krävs en långtidsuppföljning, denna kommer i huvudsak att genomföras under 2017, det vill säga efter det att E2B2-forskningsprojektet avslutats. För ytterligare information om tillvägagångssätt se *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.

2.2 Delprojekt miljöbedömning

Livscykelanalys (LCA) är en metod för att bedöma potentiell miljöpåverkan av en produkt eller tjänst under hela dess livscykel. LCA omfattar huvudsakligen fyra skeden; definition av målbeskrivning och omfattning, inventeringsanalys, miljöpåverkansbedömning, och tolkning av resultaten. Livscykeln består vanligen av fyra faser; utvinning av råmaterial, produktion, transport och användning, samt avveckling/återvinning (ISO. 2006).

En fullständig LCA inkluderar bedömning av ett brett spektrum av påverkanskategorier till exempel övergödning, förtunning av ozonlagret, klimatpåverkan, human-toxicitet, och ekotoxitet. I detta projekt har endast en påverkanskategori (klimatpåverkan) studerats under delar av livscykeln. Det livscykelskedet som uteslutits är avveckling/återvinning. På grund av att endast en miljöpåverkanskategori studeras under delar av livscykeln kan inte denna studie ses som en LCA utan snarare en miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv.



Figur 4 beskriver de huvudsakliga skedena och dess underkategorier för bedömning av en byggnads miljöpåverkan under livscykeln enligt standarden CEN 15978 (CEN, 2011). Bedömningen av den installerade kyl- och värmepumpsanläggningen avser skedena A1 – A4 samt B2, B4 och B6. Resterande skeden är exkluderade i denna studie. När det gäller bedömningen av fjärrvärme- och fjärrkyla så omfattas endast skede B6 enligt Figur 4. Detta beror på att ett fullt fungerande fjärrvärme-/fjärrkylsystem redan fanns på plats före installationen av kyl- och värmepumpsanläggningen. Allt tillkommande material hänförs således till installationen av kyl-/värmepumpsanläggningen.

A 1-3			A 4-5		B 1-7					C 1-4			
Produktion			Konstruktion		Användning					Resthantering			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4
Råvaruutvinning	Transport	Tillverkning	Transport	Konstruktion – Installationsprocesser	Användning	Underhåll	Reparation	Utbyte	Renovering	Nedmontering	Rivning	Avfallshantering	Bortskaffning
			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
					B6	Energianvändning vid drift							
						S = Scenario							
					B7	Vattenanvändning vid drift							
						S = Scenario							

Figur 4: De olika skedena för bedömning av en byggnads eller en byggnads livscykel så som beskrivet i standarden CEN 15978 (egen översättning).

Mängden inbyggt material och de ingående komponenternas sammansättning beräknades med hjälp av relationshandlingar (daterade 2015-01-16), produktblad från leverantörer samt informationsinhämtning på plats. Beräkningen avgränsas till kyl- och värmepumpsanläggningen med rör, rördelar, rörisolering, pumpar, kompressorer samt köldmedie (R134a). Köldmedieläckage ingår med 1 % av fyllnadsmängden per år. Eventuella byggtekniska åtgärder kommer att utelämnas (kyl-/värmepumpsanläggningen placeras i en befintlig byggnad). Komponenter som exempelvis kablar, styrsystem, ställdon och apparatskåp uteslöts också från

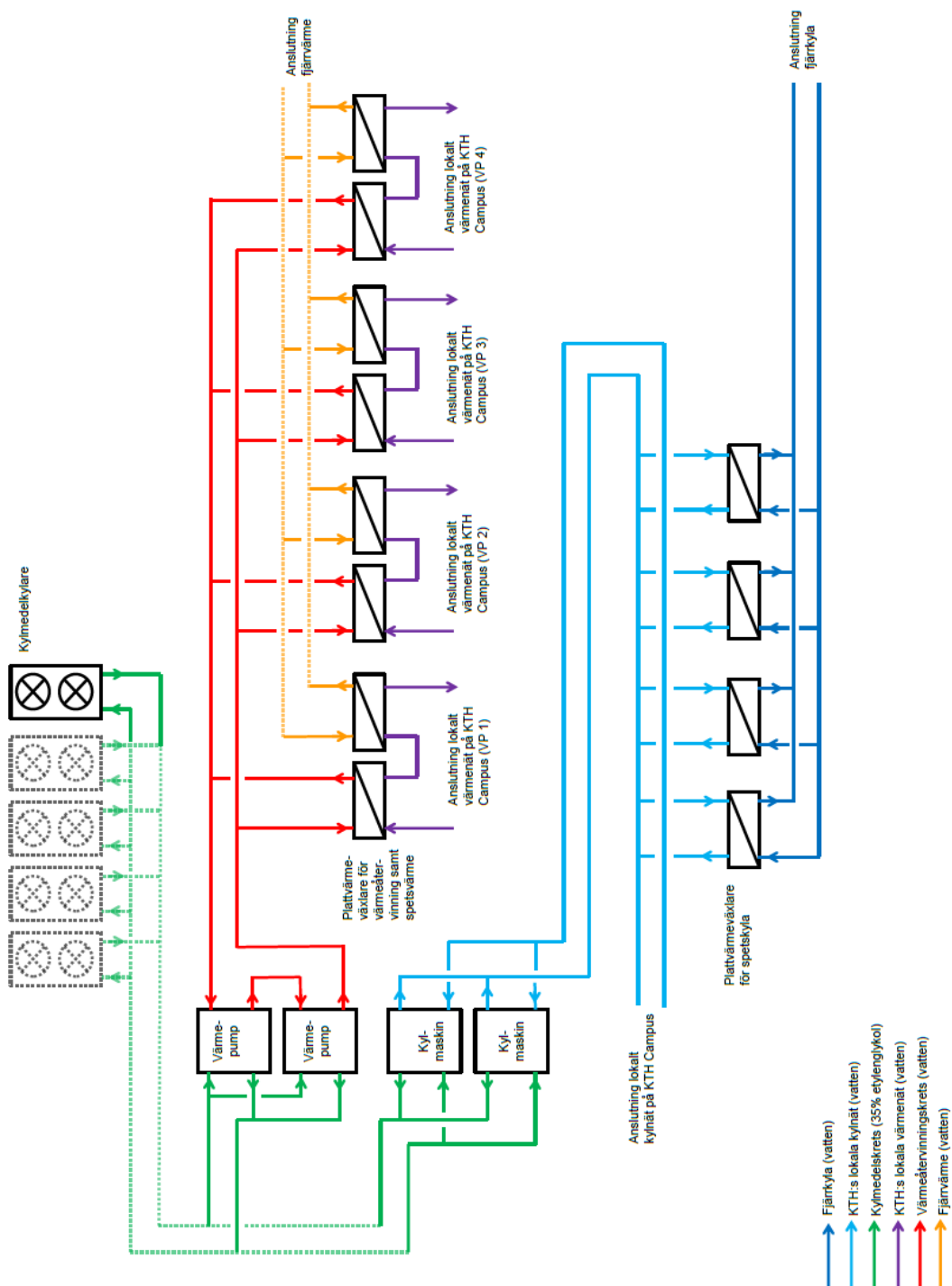


materialinventering. Inbyggd klimatpåverkan i form av CO₂-e beräknas sedan för det inbyggda materialet. För materialspill under själva byggskedet har ett påslag på 10 vikt-% gjorts på komponenter som byggts på plats, det vill säga i huvudsak rörsystemet.

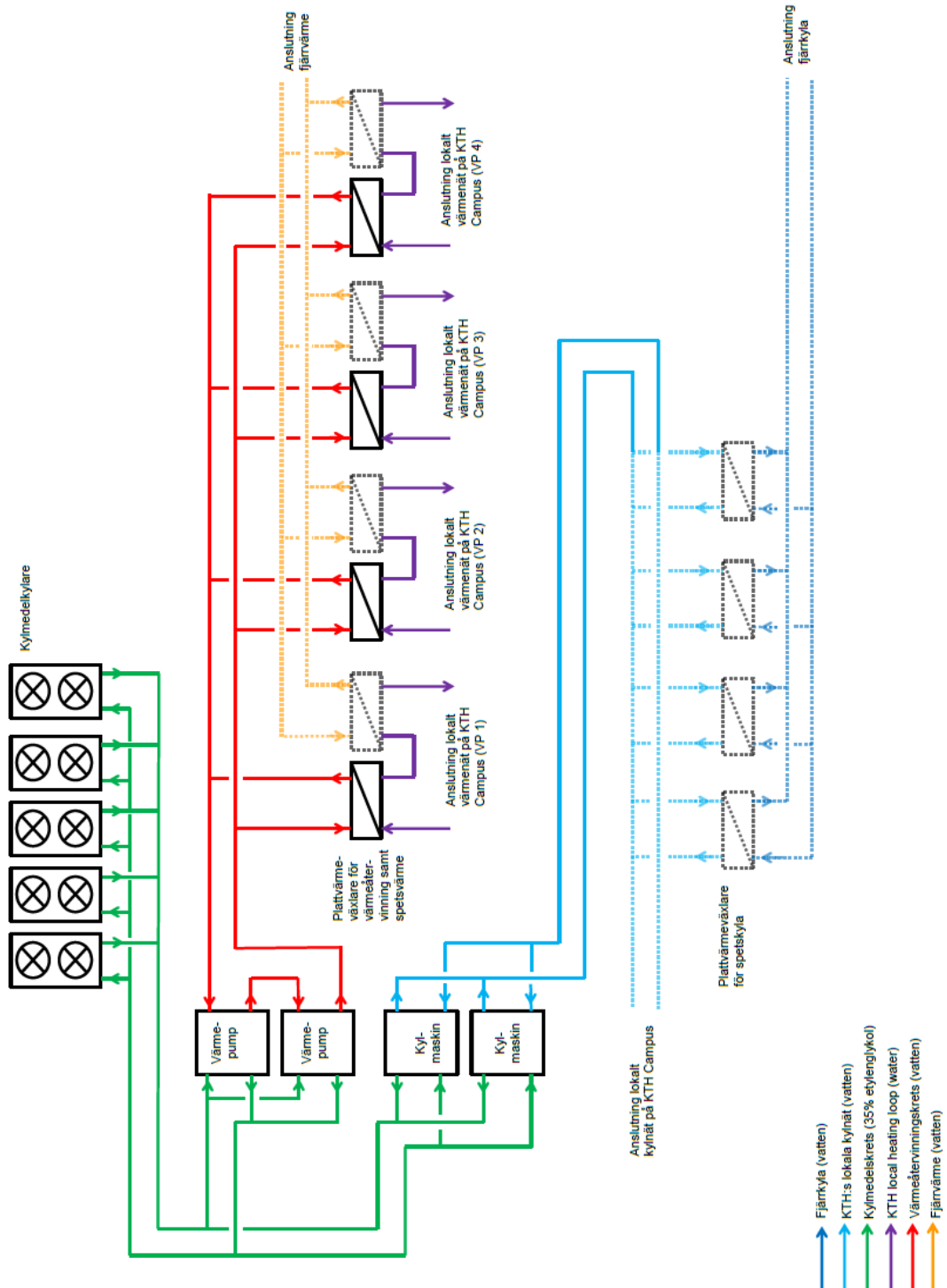
Programvaran som användes för miljöbedömning var SimaPro v.8.1 (PRé Consultants, 2016). Generisk data för resurs- och energibehov och utsläpp från materialproduktion hämtas från databasen EcoInvent v.3.2 (Weidema et al., 2013). Påverkansbedömningsmetod var ReCiPe med mittpunktskaraktärisering (Goedkoop et al., 2009). Endast påverkanskategorin klimatpåverkan (Global Warming Potential, GWP) studerades. Jämförelsen av klimatpåverkan mellan kyl-/värme-pumpsanläggningen och fjärrvärme/fjärrkyla baseras på den funktionella enheten: total mängd energi (värme och kyla) som kyl- och värmepumpsanläggningen producerar under 30 år. För ytterligare information om tillvägagångssätt se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*.

Eftersom installationen av kyl- värmepumpsanläggningen på KTH är väldigt specifik i sitt utförande exempelvis genom att man återanvänt delar av det befintliga kylsystem som fanns på området från tiden före anslutning till fjärrkyla. För att man ska kunna använda resultaten från detta projekt i mer generella fall måste två fall studeras; ett KTH-specifikt fall och ett generellt fall. Denna skillnad påverkar framför allt mängden komponenter som måste installeras och påverkar därmed mängden inbyggd klimatpåverkan. Uppdelningen mellan de två fallen framgår av *Figur 5*, *Figur 6* samt *tabell 2* nedan. Driftskeden antas lika för de två fallen.

Tre scenarier har beaktats avseende var i världen som produkter eller material kommer ifrån. Dessa tre scenarier baseras på global utsläppsdata, Europeiska utsläppsdata och utsläppsdata för övriga världen (exklusive Europa). Variationen i påverkan mellan dessa tre beror huvudsakligen på olika elproduktionsmix samt olika utvinnings- och tillverkningsprocesser.



Figur 5: Principschema för kyl- värmepumpsanläggningen där delar som exkluderats har markerats med streckade och delvis transparenta linjer. Detta schema avser den specifika installationen på KTH. Se även Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv för beskrivning av de två studerade systemen.



Figur 6: Principschema för kyl- värmepumpsanläggningen där delar som exkluderats har markerats med streckade och delvis transparenta linjer. Detta schema avser en generell installation där existerande fjärrvärme-/fjärrkyla-lösning behålls intakt. Se även Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv för beskrivning av de två studerade systemen.



Tabell 2: Systemkomponenter som ingår i KTH installation respektive en mer generell installation, jämför även med Figur 5 och Figur 6. Se även Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv.

Systemkomponent	Antal	KTH fall	Generellt fall
Värmepump	2	Nyinstallation	Ingår
Kylmaskin	2	Nyinstallation	Ingår
Värmeåtervinningsväxlare	4	Nyinstallation	Ingår
Fjärrvärmväxlare	4	Nyinstallation	Exkluderas
Fjärrkylväxlare	4	Nyinstallation	Exkluderas
Kylmedelskylare	(4+1)	4 befintliga, 1 ny-installerad	Ingår
Rör		Nyinstallation	Ingår
Kylkulvert från Triangel-parken		Nyinstallation	Exkluderas

Miljöpåverkan från energianvändning i driftsfasen utvärderas för fyra olika scenarier, med marginalproduktionsmix nu och i framtiden samt medelproduktionsmix nu och i framtiden. Värdena som används i de fyra scenarierna framgår av *tabell 3*.

Syftet med detta projekt har aldrig varit att värdera olika energibärare eller bränsleslag ur ett klimatperspektiv. Snarare har vi i detta arbete utgått från andra studier där klimatpåverkan från olika energislag beskrivs, exempelvis i Gode et al. (2011). Med det sagt så finns det olika metoder för att bedöma klimatpåverkan från ett visst bränsleslag eller energibärare. I denna studie har vi valt att använda en referens eller en viss metod.

Skillnaden i allokeringprinciper blir kanske som allra tydligast när det kommer till avfallsförbränning. Systemet för avfallshantering i Sverige bygger i stor utsträckning på förbränning av avfallet. Denna förbränning sker i kraftvärmeverk som ger el och värme och ger upphov till utsläpp av klimatgaser. Hur detta utsläpp allokeras, om det bokförs "avfallshanteringsprocessen" eller om det bokförs "energiproduktionen" eller en fördelning mellan dem, är föremål för diskussion där många olika förhållningssätt förekommer. I denna jämförande studie har vi valt att använda det utsläpp som anges i Miljöfaktaboken (Gode et al., 2011). Detta visas i *tabell 4*. *Tabell 4* visar också de andra huvudsakliga anläggningarna som finns i Stockholms fjärrvärmenät.



Tabell 3: Klimatpåverkan från el, fjärrvärme och fjärrkyla för de fyra olika studerade scenarierna. COP = Coefficient of performance (energieffektiviteten), HVP = Hetvattenpanna, KVV = Kraftvärmeverk.

Scenarier	Elproduktionsmix [gr CO ₂ -e/kWh _{el}]	Fjärrvärme-produktionsmix [gr CO ₂ -e/kWh _{värme}]	Fjärrkyl-produktionsmix [gr CO ₂ -e/kWh _{kyla}]
Medel (nutid)	97,3 (Gode et al., 2011)	77,1 (Fortum, 2015a)	COP = 6,9 + el. mix (Fortum, 2015a)
Medel (framtid, ref. år 2030)	53,5 (IEA, 2013) (IEA, 2013)	37,0 (Levihn och Nuur, 2015)	COP = 11,4 + el. mix (Fortum, 2016)
Marginal (nutid)	670,0 (Sköldberg och Unger, 2008)	Beräknat, beroende på utetemperatur, se <i>Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv</i>	Beräknat, beroende på månadsmedel-COP, se <i>Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv</i>
Marginal (framtid, ref. år 2030)	400,0 (Levihn, 2014)	Antas bestå av HVP och KVV med biobränsle och avfallsförbränning samt värmepumpar (Fortum, 2016)	Antas lika som i scenariot marginal (nutid) (Fortum, 2016)

För mer detaljerad information se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*.

Tabell 4: Klimatpåverkan för olika energiomvandlingsanläggningar i Stockholms fjärrvärmenät. HVP = Hetvattenpanna, KVV = Kraftvärmeverk. Observera att klimatpåverkan för avfallsförbränning här allokeras energiproduktion, det finns andra metoder för allokering som kan användas, se exempelvis Gode et al. (2015).

Klimatpåverkan från olika typer av anläggningar [gr CO ₂ -e/kWh]					
HVP fossilbränsle	HVP biobränsle	KVV biobränsle	Värmepump	KVV fossilbränsle	KVV avfallsförbränning
301	37	37	32,4	301	101*

*Med nuvarande systemuppbyggnad och drift kommer, i praktiken, inte utsläppen från avfallsförbränning att minska vid minskande värmeuttag i fjärrvärmesystemet, detta på grund av att avfall ändå måste behandlas.



3 Resultat och måluppfyllelse

I detta avsnitt beskrivs resultat av forskningsprojektet och måluppfyllelse kortfattat. För mer detaljerad information avseende inbyggd klimatpåverkan och anläggningens klimatpåverkan ur ett livscykelperspektiv se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*. För mer detaljerad information avseende driftoptimering och energiuppföljning av anläggningen se *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.

3.1 Energieffektivitet i driftskedet

I utredningsskedet inför investeringsbeslut studerades ett flertal olika alternativa installationer. De olika alternativen beskrivs kortfattat i *tabell 5* nedan.

Tabell 5: Beräkningsalternativ som inkluderades i LCC studien.

Nollalternativet:	Nuvarande system med fjärrvärme och fjärrkyla.
Alternativ 1 HFC:	Värmeåtervinning från "Södra slingan" i KP-systemet, KA/VP i drift året runt, HFC köldmedium.
Alternativ 1 CO₂:	Värmeåtervinning från "Södra slingan" i KP-systemet, KA/VP i drift året runt, CO ₂ köldmedium.
Alternativ 2:	Värmeåtervinning från "Södra slingan" i KP-systemet, KA/VP i drift på dellast sommartid, HFC köldmedium.
Alternativ 3:	Värmeåtervinning från "Södra slingan" i KP-systemet, KA/VP i drift året runt samt egen anläggning för byggnad 50:16, HFC köldmedium.
Alternativ 4:	Värmeåtervinning från hela KP-systemet. KA/VP i drift året runt, HFC köldmedium
Alternativ 5:	Frikyla till PDC.
Förklaringar:	KP = Kyla Primär KA = Kylaggregat VP = Värmepump Södra slingan = den del av Kyla Primär systemet som PDC är ansluten till 50:16 = en byggnad ansluten till "norra slingan" av kyla Primär systemet PDC = Paralleldatorcentrum (PDC Centrum för High Performance Computing)



Anläggningens beräknade energianvändning för vart och ett av de studerade alternativen framgår av *tabell 6* nedan.

Tabell 6: Beräknad energianvändning för vart och ett av de studerade alternativen så som de beräknades inför investeringsbeslut, avser ej normalårskorrigerad energianvändning för hela KTH Campus (Bobeck et al. 2012).

	Fjärrvärme [GWh/år]	Fjärrkyla [GWh/år]	El [GWh/år]	Beräknad total COP
Nollalternativet	31,1	18,8	n/a	n/a
Alternativ 1 HFC	19,4	6,8	3,7	5,3
Alternativ 1 CO ₂	18,3	6,8	4,7	6,4
Alternativ 2	19,3	9,5	2,9	7,3
Alternativ 3	19,1	6,3	3,8	6,5
Alternativ 4	18,2	3,1	4,9	5,8
Alternativ 5	31,1	14,9	0,8	48,7

Anläggningens uppmätta energianvändning (faktiska värden) framgår av *tabell 7* och avser perioden första maj 2015 till sista april 2016. Genomsnittligt totalt COP beräknas till 4,36 med formeln [(Värme + Kyla) / El].

Tabell 7: Uppmätt ej normalårskorrigerad energianvändning, avser energianvändning för hela KTH Campus för perioden 1: a maj 2015 – 30:e april 2016.

	Värme [GWh/år]	Kyla [GWh/år]	El [GWh/år]
Total energianvändning	26,4	14,0	5,0
<i>var av "köpt energi"</i>	17,9	0,7	5,0
<i>var av "egen produktion"</i>	8,5	13,3	n/a

Värden i *tabell 6* är inte helt jämförbara med som presenteras i *tabell 7* eftersom den anläggningen som slutligen installerades ser lite annorlunda ut jämfört med vad som antogs i tidigare skeden. De alternativ i *tabell 6* som bäst överensstämmer med det som faktiskt installerades är Alternativ 4 med den skillnaden att endast två utav tre värmepumpar installerades och att värmepumparna inte har varit i



drift sommartid (värmepumparna avstängda under första juni till sista augusti). Det kan konstateras att den beräknade energibesparingen enligt Alternativ 4 uppgick till ca 12,9 GWh (eller 42 %) värme och ca 15,7 GWh (eller 84 %) kyla samt att även effekttopparna kapas för fjärrvärme och fjärrkyla.

Vad gäller jämförelsen mellan tidigare uppmätta, beräknade och efter installation uppmätta värden ska här så klart påpekas att jämförelsen görs med ej normalårskorrigerade värden. Anläggningens komplexitet och energimätningssystemets uppbyggnad gör att en normalårskorrigerad skulle vara en mycket omfattande och tidskrävande insats vilket är anledningen till att vi inte har fokuserat på detta i projektet. Ett alternativ är då att studera procentuell besparing.

Energianvändningen vad gäller köpt energi har minskat väsentligt efter installationen av kyl-/värmepumpsanläggningen, detta trots att endast två av de tre ursprungligen tilltänkta värmepumparna installerades. Det kan konstateras att den uppmätta energibesparingen inte riktigt uppnår den beräknade avseende fjärrvärme (beräknad besparing 42 %, uppmätt 32 %). Detta kan framförallt härledas till att en tredje värmepump inte installerades, vilket beslutades sent under projekteringen. Anledningen var huvudsakligen att det då fanns en osäkerhet kring framtiden för den stora serverhallen (PDC). Osäkerheten bestod i att ägarna av PDC varken var säkra på om de skulle låta datahallen vara kvar på KTH, hur länge den i så fall skulle vara kvar eller i vilken omfattning. Däremot blir kylbesparingen större än beräknat (beräknad besparing 84 %, uppmätt 95 %) vilket kan härröra från flera anledningar, en stor bidragande faktor är PDC:s kylbehov som vi, genom analyser av kylmaskinernas drift, vet har minskat. För mer detaljerad information se *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.

En viktig aspekt som framkommit i arbetet med driftoptimeringen är vikten av att följa upp driftparametrar. En så här komplex anläggning, där många komponenter kapacitets regleras och dessutom mer eller mindre direkt påverkar varandra, behöver ställas in för att driften ska bli stabil. Den aktuella kyl-/värmepumps-anläggningen har framför allt instabil kapacitetsreglering på dellast och pendlar upp till $\pm 20\%$ i effekt på dellast. Systemets tidskonstanter påverkas bland annat av flöden, volymer och effekter i systemen och styrsystemets olika parametrar måste därför ställas in för varje enskild systemlösning och sedan kontrolleras så att drift är acceptabel över hela arbetsområdet för kyl-/värmepumparna. Generellt reglerar styrsystemen ofta för snabbt och hinner ändra börvärde flera gånger innan den första ändringen påverkar temperaturerna ute i systemet. Det här är ett system med stor vattenvolym och massa i kylmaskinerna/värmepumparna vilket gör att de reagerar långsamt på ändringar i styrsystemet. Det är viktigt att få en anläggning som har en så stabil drift som möjligt exempelvis genom att säkerställa stabila temperaturnivåer på varma respektive kalla sidan på en kylmaskin eller värmepump. Detta ger förutsättningar för maximal energieffektivitet och livslängd. Alla typer av instabilitet försvårar injustering och ger ökad energianvändning.



3.2 Bedömning av klimatpåverkan

I detta avsnitt redovisas kortfattat resultat av forskningsprojektets del "Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv av inbyggt material" uppdelat i två avsnitt 3.2.1 *Klimatpåverkan* och 3.2.2 *Klimatpåverkan från driftenergi*. För mer detaljerad information se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*.

3.2.1 Klimatpåverkan från inbyggt material

Den totala vikten av alla i studien inkluderade material är ca. 115 ton för det KTH-specifika fallet och ca 82 ton för ett mer generellt fall. För beskrivning av de två fallen se *Metodkapitlet*, avsnitt 2.2 *Delprojekt miljöbedömning*.

Den inbyggda klimatpåverkan för kyl-/värmepumpsanläggningen presenteras i *tabell 8* för det KTH-specifika fallet och i *tabell 9* för det generella fallet. Färgskalan i tabellerna nedan identifierar den högsta (röd) och lägsta (grön) mängden utsläpp med en färgskala där emellan. Materialåtgången för det KTH-specifika fallet korreponderar mot ett utsläpp av ca 641 ton CO₂-e. Det inbyggda materialet för det mer generella fallet motsvarar ett utsläpp på ca 601 ton CO₂-e.

En jämförelse mellan de olika studerade produktionsplatserna och hur detta kan påverka resultaten kan ses i *tabell 10*. Materialets ursprung (produktionsplats) är baserad på global data, europeisk data, och data för övriga världen exkl. Europa. Det kan konstateras att material med ursprung i Europa har lägst miljöpåverkan när det gäller utsläpp av CO₂-e. Anledningen till skillnaderna är i huvudsak två; olika energimixar och olika effektiva framställningsmetoder.

Figur 7 visar fördelningen av inbyggd klimatpåverkan för anläggningens olika delsystem. Från *tabell 8*, *tabell 9* och *figur 7* kan det konstateras att mer än hälften av den inbyggda klimatpåverkan kommer från rörsystemet. Detta beror i huvudsak på att det är ett stort rörsystem uppbyggt med stora dimensioner, dessutom är rörmaterialen uteslutande stål eller rostfritt stål. Ett annat ämne som kommer högt upp på listan över störst klimatpåverkan är köldmediet (R134a), det bör här noteras att detta endast avser produktion av köldmedium (inte läckage under driftsfasen). Vilka material/ämnen som har störst påverkan på mängden inbyggd klimatpåverkan varierar något mellan det KTH-specifika fallet och det mer generella fallet. I det generella fallet får material såsom aluminium och koppar större betydelse.



Tabell 8: Inbyggd klimatpåverkan (kg CO₂-e) för det KTH-specifika fallet, emissioner baseras på globalt datasett i EcoInvent databasen. Materialen är sorterade i fallande ordning utifrån total klimatpåverkan, kolumnen längst till höger.

Material och processer [kg CO ₂ -e]	Kyl-maskiner	Värme-pumpar	Värmeväxlare (värmeåter-vinning)	Värmeväxlare (värme)	Kylmedel-kylare	Värmeväxlare (kyla)	Rör-sy-stem	Totalt
Rostfritt stål			6 452	31 392		27 755	146 994	212 593
Stål	35 290	13 773	7 283	18 076	2 263	10 532	114 867	202 084
Köldmedium (R134a)	41 950	21 849						63 799
Koppar	28 534	19 136			3 123		1 697	52 490
Asfalt							26 198	26 198
Aluminium					13 646		5 768	19 414
Rörisolering (mi-neralull och cell-gummi)							15 717	15 717
Transporter	4 535	2 071	208	678	644	489	3 889	12 514
Grus							11 131	11 131
Mässing	630	302					8 381	9 314
Plaster							7 762	7 762
Övrigt material	149	83	76	393	153		6 555	7 409
Övriga processer	390	195			119		181	885
Totalt	111 478	57 410	14 018	50 539	19 948	38 775	349 142	641 310

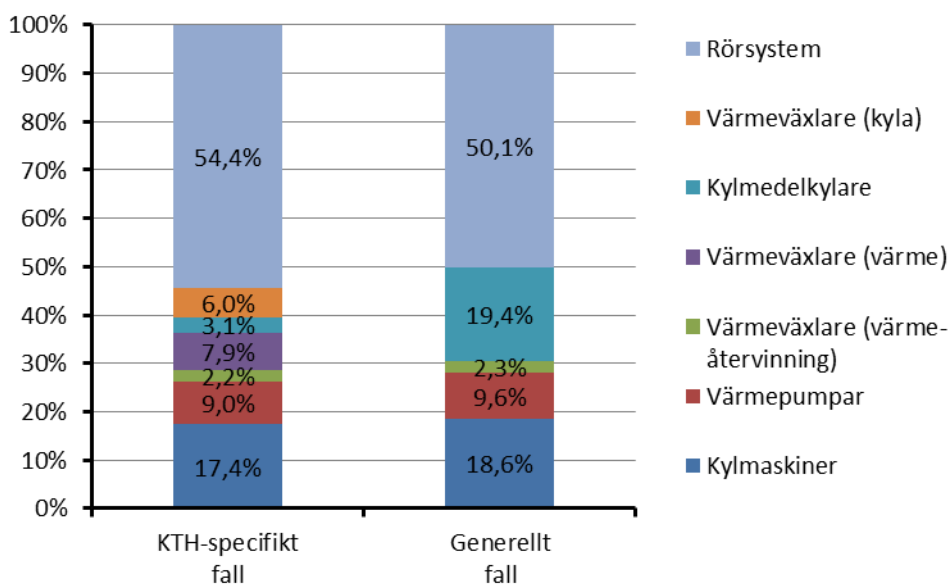


Tabell 9: Inbyggd klimatpåverkan (kg CO₂-e) för ett generellt fall, emissioner baseras på globalt datasett i EcoInvent databasen. Materialen är sorterade i fallande ordning utifrån total klimatpåverkan, kolumnen längst till höger.

Material och processer [kg CO ₂ -e]	Kyl-maskiner	Värme-pumpar	Värmeväxlare (värmeåter-vinning)	Värmeväxlare (värme)	Kylmedel-kylare	Värmeväxlare (kyla)	Rör-sy-stem	Totalt
Rostfritt stål			6 452	0		0	146 994	153 446
Stål	35 290	13 773	7 283	0	13 580	0	66 785	136 711
Aluminium					81 970		5 768	87 738
Koppar	28 534	19 136			18 729		1 697	68 095
Köldmedium (R134a)	41 950	21 849						63 799
Asfalt							26 198	26 198
Rörisolering (mineralull och cellgummi)							15 717	15 717
Transporter	4 535	2 071	208	0	644	0	3 889	11 347
Grus							11 131	11 131
Mässing	630	302					8 381	9 314
Övrigt material	149	83	76	0	1 625	0	6 555	8 489
Plaster							7 762	7 762
Övriga processer	390	195			212	0	181	978
Totalt	111 478	57 410	14 018	0	116 761	0	301 059	600 726

Tabell 10: Inbyggd klimatpåverkan (kg CO₂-e) för det KTH-specifika fallet och det mer generella fallet baserat på material-produktions lokalisering.

Fall	Produktions-plats	Kyl-maskiner	Värme-pumpar	Värmeväxlare (värmeåter-vinning)	Värme-växlare (värme)	Kylmedel-kylare	Värme-växlare (kyla)	Rör-sy-stem	Totalt
KTH	Global	111 478	57 410	14 018	50 539	19 948	38 775	349 142	641 310
	Europa	100 112	51 368	12 398	45 442	12 152	35 144	320 918	577 533
	Övriga världen exkl. Europa	113 796	58 588	14 525	52 341	21 351	40 160	358 540	659 301
Generellt	Global	111 478	57 410	14 018		116 761		301 059	600 726
	Europa	100 112	51 368	12 398		69 939		276 722	510 538
	Övriga världen exkl. Europa	113 796	58 588	14 525		125 185		309 163	621 258



Figur 7: Den inbyggda klimatpåverkan fördelat på anläggningens olika delsystem för de två studerade fallen; KTH-specifikt och generellt.

Inkluderat i studien av inbyggd klimatpåverkan är också visst underhåll under drifts skedet av kyl-/värmepumpsanläggningen. Dessa är i huvudsak kopplade till köldmedieläckage och utbyte av kompressorer i kylmaskiner och värmepumpar efter 15 års drift (ett antagande från den initiala LCC-analysen utförd 2012 av Bengt Dahlgren AB). Den totala mängden inbyggd klimatpåverkan som härrör underhåll är relativt lika för de två alternativen.

Data från olika källor (olika databaser och olika påverkansbedömningsmetoder) när det gäller inbyggd klimatpåverkan från olika material som används i det aktuella installationsprojektet återfinns i *Bilaga 3 – Klimatpåverkan från några olika material*.

3.2.2 Klimatpåverkan från driftenergi

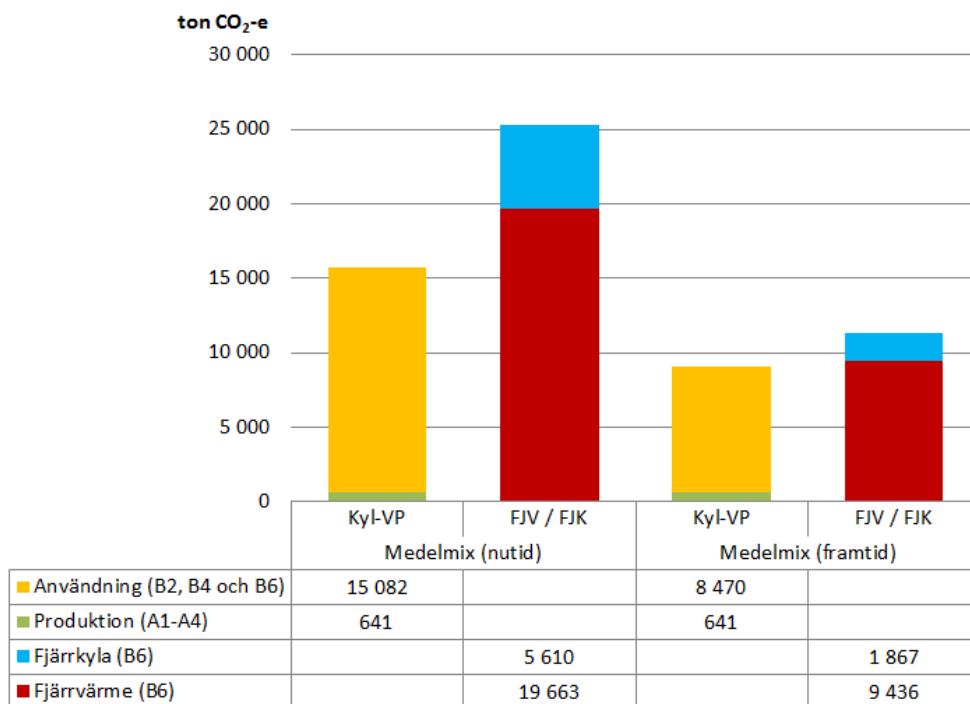
Driftenergin utvärderas för en 30-årsperiod och det antas att under hela denna period är energianvändningen och produktion av värme och kyla för kyl-/värmepumpsanläggningen lika som i *tabell 7*. Endast den delen av Campus KTHs köpt energi som ersätts av kyl-/värmepumpsanläggningen inkluderas i studien. Anläggningens elanvändning och värme- och kylproduktion framgår av *tabell 11* nedan.



Tabell 11: Kyl-/värmepumpsanläggningens energiproduktion och elanvändning.

	GWh/år
Producerad värme	8,5
Producerad kyla	13,3
Elanvändning	5,0

Kategorin "Användning (B2, B4 och B6)" i *Figur 8* och *Figur 9* utgör både elanvändning men också inbyggd klimatpåverkan från utbytesprodukter och material/ämnen som antas krävas under brukstiden, exempelvis köldmediepåfyllnad. Av kategorin "Användning (B2, B4 och B6)" för fallet med nutida medelmix, se *Figur 8*, är ca 97 % av klimatpåverkan förknippad med elanvändningen under drift. För fallet med framtida medelmix är ca 95 % av klimatpåverkan förknippad med elanvändningen under drift. *Figur 8* visar också att installation av kyl-/värmepumpsanläggningen har lägre totala utsläpp än fjärrvärme/fjärrkyla vid antagande om medelproduktionsmix.

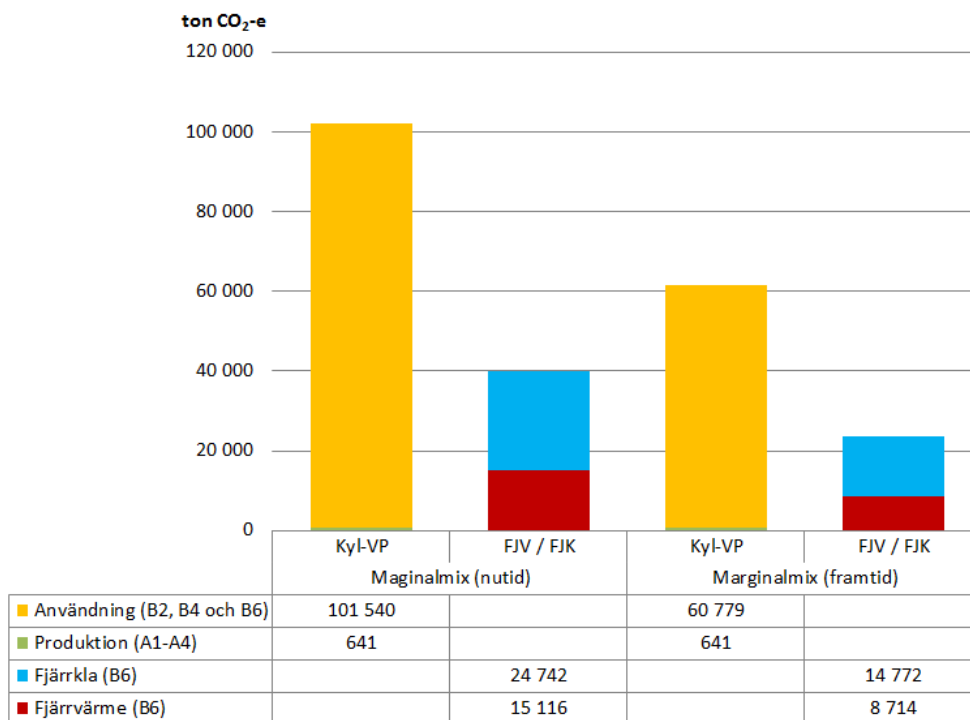


Figur 8: Jämförelse av total klimatpåverkan med medelproduktionsmix för KTH-specifika kyl-/värmepumpsanläggningen och för fjärrvärme/fjärrkyla. Användning (B2,



B4 och B6) inkluderar elanvändning för kyl-/värmepumpsanläggningen.
Kyl-VP = Kyl-/värmepumpsanläggningen, FJV = Fjärrvärme, FJK = Fjärrkyla.

Av kategorin "Användning (B2, B4 och B6)" för fallet med nutida medelmix, se *Figur 9*, är 99,6 % av klimatpåverkan förknippad med elanvändningen. För fallet med framtida medelmix är 99,4 % av klimatpåverkan förknippad med elanvändningen. *Figur 9* visar också att installation av kyl-/värmepumpsanläggningen har högre totala utsläpp än fjärrvärme/fjärrkyla vid antagande om marginalproduktionsmix.



Figur 9: Jämförelse av total klimatpåverkan med marginalproduktionsmix för KTH-specifika kyl-/värmepumpsanläggningen och för fjärrvärme/fjärrkyla. Användning (B2, B4 och B6) inkluderar elanvändning för kyl-/värmepumpsanläggningen. Kyl-VP = Kyl-/värmepumpsanläggningen, FJV = Fjärrvärme, FJK = Fjärrkyla.

Klimatpåverkan från driftenergin för kyl-/värmepumpsanläggningen är mycket beroende av effektiviteten hos värmepumpar och kylmaskiner samt vilken klimat-



påverkansfaktor som används för el. Klimatpåverkansfaktor för marginal-el är betydligt högre än i medel-scenariot vilket i huvudsak påverkar kyl-/värmepumps-anläggningens klimatprestanda.

”CO₂-återbetalningstid” för kyl-/värmepumpsanläggningen utifrån energibesparing och inbyggd klimatpåverkan baserat på medelproduktionsmix (nutid) är ca 2 år, beräknat som inbyggd klimatpåverkan dividerat med årlig minskning av klimatutsläpp. Vid antagande om marginalproduktionsmix kommer kyl-/värmepumpsanläggningen aldrig att återbetala sig ur ett klimatpåverkansperspektiv.

3.2.3 Känslighetsanalys

Jämförelsen av klimatpåverkan från kyl-/värmepumpsanläggningen och det befintliga systemet med fjärrvärme/fjärrkyla innehåller en del förenklingar och antaganden, därför har en känslighetsanalys utförts för ett antal olika parametrar. Det har visat sig att det finns särskilda parametrar som väsentligt kan påverka resultaten och leder till olika slutsatser. I den utförda känslighetsanalysen utvärderas förändring av dessa enskilda parametrar som är; köldmedieläckage, förändring i medelproduktionsmixer, och lokaliseringen av en tänkbar liknande anläggning. Nedan beskrivs de olika känslighetsanalyserna endast kortfattat, för mer detaljerad information se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv*.

Nedanstående känslighetsanalyser har genomförts som fristående förändringar av en parameter. Genom en kombination av samtidiga förändringar av olika parametrar till det bättre eller sämre kan resultatet bli ett annat. Känslighetsanalysen är utförd med medelproduktionsmix.

3.2.3.1 Förändring köldmedieläckage

Två scenarier beaktades som känslighetsanalys, årligt köldmedieläckage motsvarande 1 vikts-% samt 7 vikts-%. Total köldmediemängd i anläggningen är 730 kg R134a. Det aktuella köldmediet har en GWP-faktor (GWP = Global Warming Potential) på ca 1300 kg CO₂-e per kg köldmedium (Weidema et al., 2013). De två scenarierna innebär ett ackumulerat utsläpp på 219 kg respektive 1 533 kg köldmedium under brukstiden 30 år. Detta motsvarar 288 ton CO₂-e för 1 % scenariot och 1 993 ton CO₂-e för 7 % scenariot.

Det kan konstateras att läckagescenariot 1 vikts-% läckage per år motsvarar ca 2 % av total klimatpåverkan under hela brukstiden och nästan 50 % av den inbyggda klimatpåverkan. Ett läckagescenario om 7 vikts-% läckage per år motsvarar ca 12 % av total klimatpåverkan under hela brukstiden. Detta visar på vikten av att minimera köldmedieläckage samt att välja köldmedium med låg GWP-faktor.

3.2.3.2 Förändring av medelproduktionsmix

När det gäller framtida klimatpåverkan från energianvändning baseras denna miljöbedömning på litteratur, rapporter och antaganden om framtida energiproduktionsmixar. Detta innebär en osäkerhet i huruvida dessa värden kommer att följa



den nuvarande trenden, bli bättre eller sämre. Därför gjordes en känslighetsanalys där framtida klimatpåverkansfaktorer för medelproduktionsmix varierar med $\pm 20\%$. Denna känslighetsanalys av förändring av framtida medelproduktionsmixar påverkade inte resultatet (se även *Figur 8*).

Eftersom klimatpåverkan från elanvändning är direkt kopplad är effektiviteten hos anläggningen (COP hos kylmaskiner och värmepumpar) så är förändring av medelproduktionsmix direkt jämförbar med en förändring av COP. En förändring av anläggningens COP med $\pm 20\%$ ger samma resultat som en förändring av framtida klimatpåverkansfaktorer för medelproduktionsmix med $\pm 20\%$ om istället klimatpåverkansfaktorerna varit oförändrade.

3.2.3.3 Förändring av placeringsort

I denna studie utgår vi från att kyl-/värmepumpsanläggningen är placerad i Stockholm, och därmed är utsläppen från fjärrvärme kopplade till de produktionsanläggningar som finns i det specifika fjärrvärmenätet. För el används nordisk elmix. Många städer i Sverige har fjärrvärme och fördelningen av olika energislag som används kan variera stort. En del städer har även fjärrkyla. Detta betyder att klimatpåverkan från energianvändning kan variera stort, både till det bättre och också det sämre, beroende på placeringsort.

Kyl-/värmepumpsanläggningen drivs med el och det samma gäller fjärrkylnätet i Stockholm. Under antagandet att en liknande anläggning producerar lika stor mängd termisk energi och att denna ersätter motsvarande mängd fjärrvärme/fjärrkyla kan klimatpåverkan uttryckas med *Ekvation 1*.

$$H \times f_H = \left(\frac{H+C}{COP_{onsite}} - \frac{C}{COP_{Fortum}} \right) \times f_{el} + Emb. \quad [Ekvation 1]$$

Där:

- H = Producerad värmeenergi från kyl-/värmepumpsanläggningen
- C = Producerad kylenergi från kyl-/värmepumpsanläggningen
- f_H = Klimatpåverkan från fjärrvärme (medelmix)
- f_{el} = Klimatpåverkan från el (medelmix)
- $Emb.$ = Inbyggd klimatpåverkan för kyl-/värmepumpsanläggningen.
- COP_{onsite} = Verkningsgrad för KTHs kyl-/värmepumpsanläggning
- COP_{Fortum} = Verkningsgrad för Fortums fjärrkylnät

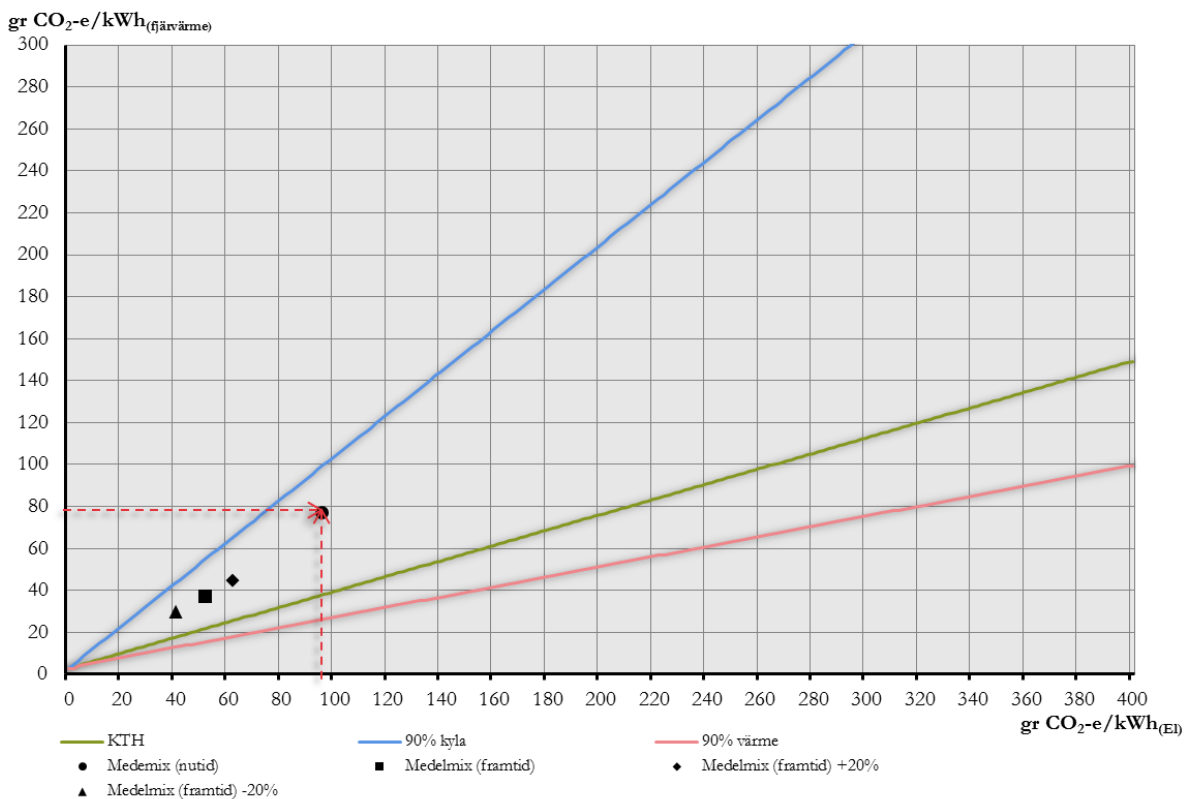


Denna ekvation kan presenteras i en graf, se den gröna linjen i *Figur 10*. Den gröna linjen motsvarar gränsen där klimatpåverkan (uttryckt som CO₂-e) är lika stora för kyl-/värmepumpsanläggningen som för den befintliga systemlösningen med enbart fjärrvärme/fjärrkyla. En kombination av utsläppsfaktorer för el respektive fjärrvärme ger en punkt i diagrammet i *Figur 10*. Vart denna punkt hamnar indikerar om en kyl-/värmepumpsanläggning av samma storlek har högre eller lägre totala utsläpp av CO₂-e jämfört med fjärrvärme. Det vill säga, om punkten hamnar över linjen så har en kyl-/värmepumpsanläggning lägre påverkan än fjärrvärme. Om punkten hamnar under linjen så har en kyl-/värme-pumps-anläggning högre påverkan än fjärrvärme.

Av den totala mängden termisk energi som kyl-/värmepumpsanläggningen på Campus KTH producerar är ca 60 % kyla och 40 % värme. För anläggningar av samma storlek men där fördelningen mellan producerad mängd värme/kyla är annorlunda fås andra linjer i diagrammet i *Figur 10*. Observera att detta gäller för medelproduktionsmixer för el och värme.

För ett fall där en kyl-/värmepumpsanläggning producerar samma totala mängd termisk energi men med fördelningen 90 % kyla och 10 % värme återspeglas av den blåa linjen i diagrammet. Det kan noteras att den blåa linjen ligger över punkten för nuvarande medelproduktionsmix vilket betyder att en kyl-/värme-pumps-anläggning som producerar 90 % kylenergi skulle ge högre total klimatpåverkan under livscykeln än ett system med fjärrvärme/fjärrkyla.

För ett fall där den omvända proportionen skulle gälla, det vill säga 90 % värme och 10 % kyla så representeras detta av den röda linjen i diagrammet.



Figur 10: Diagrammet visar relationen mellan påverkansfaktorer för el och fjärrvärme (medelproduktionsmix). Sambanden gäller för en kyl-/värmepumpsanläggning som producerar samma mängd termisk energi som i KTH-fallet. De svarta symbolerna visar fyra olika scenarier för medelproduktionsmix av fjärrvärme och el.



4 Diskussion och slutsatser

4.1 Miljöbedömning med livscykelperspektiv

Syftet med studien som presenteras här är att undersöka miljöprestanda för en kyl-/värmepumpsanläggning i form av inbyggd klimatpåverkan från tillkommande material för installationen samt under drifts skedet (som är satt till 30 år). Dessutom jämförs anläggningens miljöprestanda med det tidigare alternativet med fjärrvärme/fjärrkyla. Generellt kan det konstateras att högsta möjliga effektivitet (COP) för kylmaskiner och värmepumparna måste ha hög prioritet eftersom detta påverkar energianvändningen under driftsfasen, och det är driftsfasen som står för den absolut största delen av anläggningens totala klimatpåverkan under livscykeln.

Något som skulle kunna påverka resultatet av analysen är att energianvändningen i denna studie inte är normalårskorrigerad. Detta betyder att anläggningens energieffektivitet inte är helt jämförbar från år till år, eller från tiden före installation. Men bedömningen är att det har en mycket begränsad effekt på slutsatserna.

En aspekt som har stor påverkan på den initiala inbyggda klimatpåverkan är rörsystemet. Rörsystemet står för ca 50 % av den initiala inbyggda klimatpåverkan för hela kyl-/värmepumpsanläggningen. Detta innebär att själva placeringen av systemets olika delkomponenter som till exempel kylmaskiner, värmepumpar, kylmedelkylare, värmeväxlare är av stor betydelse för att minska den inbyggda klimatpåverkan. Om kyl-/värmepumpsanläggningen kunde gjorts mer kompakt och rörsystemet exempelvis halverats i längd så skulle den totala initiala inbyggda klimatpåverkan från anläggningen minska med ca 25 % eller i storleksordningen 170 ton CO₂-e. Detta indikerar att det är viktigt att hålla nere längden på rör, inte bara ur ekonomisk synvinkel utan även för att minska inbyggd klimatpåverkan.

Beräkningarna visade också att köldmedieläckage kan vara en stor bidragande orsak till klimatpåverkan. Därför är det viktigt att ta åtgärder för att minimera köldmedieläcketaget och att använda ett köldmedium med så låg klimatpåverkan (GWP-faktor) som möjligt. Att kontrollera och minimera köldmedieläckage är något som en driftsorganisation bör ha med sig genom hela förvaltningsprocessen.

Resultaten visar att den inbyggda klimatpåverkan för KTHs nya kyl-/värmepumpsanläggning är så liten att den är nästintill försumbar i förhållande till klimatpåverkan från elanvändningen i drifts skedet. Det visas också att KTHs nya kyl-/värmepumpsanläggning har en lägre total klimatpåverkan under livstiden än den tidigare lösningen med enbart fjärrvärme och fjärrkyla. Dock enbart om man antar medelproduktionsmix för el, fjärrvärme och fjärrkyla.

Om kylenergiproduktion exkluderas, som i båda fallen är mer eller mindre el-baserad, så är värmeenergiproduktionen från Campus KTHs värmepumpsanläggningen är ca 8,5 GWh/år. Det betyder att uttaget från fjärrvärmenätet minskar med mot-



svarande mängd energi. Detta är en mycket liten del av Fortum Värmes totala värmeleverans som år 2015 var ca 6,6 TWh (Fortum, 2015b). Minskningen av värmeanvändning på Campus KTH motsvarar lite drygt 0,1 % av Fortum Värmes värmeproduktion. Detta är en så liten andel att det inte bedöms påverka fjärrvärmesystemet i sin helhet. Men om många fastighetsägare genomför motsvarande installation som på Campus KTH så måste systemgränsen utvidgas och ändringar i hela fjärrvärmesystemet måste ingå i analysen.

I dagsläget används i stor utsträckning lågvärdiga bränslen i fjärrvärmenätet, exempelvis hushållsavfall och returträ som just nu inte har avsättning någon annanstans i samhället. Om behovet av värme i fjärrvärmenätet minskar mycket så måste alternativa behandlingsmetoder för t.ex. avfall beaktas. Ett alternativ är att fortsätta förbränna avfallet och helt enkelt kyla bort överskottsvärme med havsvatten vilket inte ger minskade klimatutsläpp, utan snarare tenderar att öka utsläppen på grund av tillkommande el-användning för de lokala kylmaskinerna/värmepumparna. Andra alternativ är att lägga avfallet på deponi eller att öka andelen av avfallsmängden som kan återanvändas eller återvinnas. Påverkan från dessa alternativa avfallsbehandlingsmetoder måste inkluderas i studien om andelen fjärrvärme i nätet minskar.

Detta innebär att det inte går att generalisera från denna studie och säga att det alltid är en fördel ur klimatperspektiv att installera värmepumpar i en byggnad i ett befintligt fjärrvärmesystem. Resultat från detta E2B2-projekt tyder på att den enskilda installationen är ekonomisk lönsam. Projektresultaten visar också att den inbyggda klimatpåverkan från tillkommande material för en kyl-/värme-pumpsanläggning av detta slag är väldigt begränsad i förhållande till klimatutsläpp från driftenergin.

Däremot, beroende på hur man värderar olika energislag, om man använder antingen marginal- eller medelproduktionsmix för fjärrvärme och el blir slutsatsen olika. Med det marginalperspektivet som används i studien är fjärrvärme och fjärrkyla bättre än elbaserad lokal värme- och kylproduktion medan medelproduktionsmix är en kyl-/värmepumpsanläggning av detta slag miljömässigt fördelaktig.

Syftet med detta E2B2-projekt aldrig har varit att miljövärdera olika energislag. Fokus har varit att bedöma den inbyggda klimatpåverkan i förhållande till klimatpåverkan från drifts skedet. Det finns olika metoder för att allokerat utsläpp och klimatvärdera olika energislag och i dessa frågor får varje organisation själva ta ställning till val av metoder.

En annan aspekt är användandet av ursprungsmärkt el. Om en fastighetsägare skulle köpa ursprungsmärkt el (vilket Akademiska Hus faktiskt gör) med koldioxidutsläpp motsvarande 5 gr CO₂-e/kWh så skulle klimatpåverkan för driftsel under hela utvärderingsperioden på 30 år bli ca 750 ton CO₂-e. Detta skulle innebära att driftenergin stod för 42 % av den beräknade totala klimatpåverkan över hela utvärderingsperioden och inbyggt material och köldmedieläckage skulle då stå för



58 % av den beräknade totala klimatpåverkan över hela utvärderingsperioden. Denna möjlighet att hänvisa till ursprungsmärkt el vid antagande om klimatpåverkan från elproduktion är å andra sidan en fråga utsatt för diskussion, se till exempel Kåberger och Andersson (1998) eller Dotzauer (2010).

Om man studerar *Figur 10* ser man att en anläggning som skulle producera samma mängd termisk energi som KTH-anläggningen men där 90 % är kylenergi skulle ge högre total klimatpåverkan under livscykeln än ett system med fjärrvärme/fjärrkyla. Det är dock inte sannolikt att kylenergi på årsbasis enbart produceras med kylmaskiner, den kalla delen av året finns möjligt till frikylfunktion vilket innebär att kyla produceras med betydligt högre system-COP vilket gör att elanvändningen blir lägre för samma mängd termisk energi som i exemplet i figuren.

4.2 Driftoptimering

Oavsett på vilka grunder man väljer att installera en större kyl-/värme-pumpsanläggning så finns det driftsparametrar som är viktiga att beakta. Det finns i denna typ av projekt med relativt komplexa systemlösningar och utrustning ett antal parametrar som är förinställda på olika sätt och av olika anledningar. Det finns samtidigt ofta anledning att se över och eventuellt testa att förändra. Annars lever dessa förinställningar kvar trots att anläggningen från början inte varit utformad för dessa värden alternativt att anläggningen under tid förändras. Det är viktigt att få en anläggning som har så stabil drift som möjligt då detta ger förutsättningar för maximal energieffektivitet och livslängd. Alla typer av instabilitet försvårar injustering och ger ökad energianvändning. I detta projekt har funnits utrymme att gå igenom och analysera ett antal nyckelparametrar. Projektgruppens övertygelse är att detta arbete i slutändan kommer att smaka mer än vad det kostat. Nedanstående områden med förbättringspotential har definierats inom projektet. Se *Figur 3* för betydelse av de olika termerna som används.

Kylmedeltemperaturen: Att anpassa kylmedeltemperaturen till utetemperaturen och behovet av värmepumpdrift är en nyckel för att spara elenergi för kylmaskinerna. Företrädesvis sommartid samt nätter vår, höst, sommar då ett minskat värmebehov gör att fokus bör flyttas till kylmaskinernas drift. Tester med lägre kylmedeltemperaturer under sådana tider har genomförts som påvisar en betydande besparing av elenergi till kylmaskinerna.

Vätskeflöde i värmeåtervinningskretsen: anläggningen bör ha en kapacitet att köra ett flöde genom värmepumparnas kondensorer som gör att dessa går så bra och på så hög kapacitet som möjligt. Detta var inte fallet när projektet inleddes men hösten 2016 installerades en större cirkulationspump vilket ger en betydligt större potential att utnyttja värmepumparnas kapacitet.

”Mellankretsens” temperatur (kylmedelkrets i *Figur 5* och *Figur 6*), denna påverkar energieffektiviteten hos både värmepumpar och kylmaskiner och en styrning av denna utifrån värme- respektive kylbehov kommer att påverka anläggningens to-



tala effektivitet (COP). Tester av förändrade styrparametrar för detta har inte genomförts när denna rapport skrivs men detta har bedömts som ett viktigt område att jobba vidare med.

Start/stopp av värmepumpar: Att stoppa värmepumparna under sommaren bör inte vara hårt satt efter datum, vilket den initialt var i kyl-/värmepumpsanläggningen, utan bör istället regleras efter vilket värmebehov som finns. Analyser påvisar att värmepumparna stått still ett antal dagar när det funnits värmebehov.

Värmeproduktionens kapacitet: under arbetet med att analysera energianvändningen kunde det konstateras att det under vintertid kylades bort en ansenlig mängd värme via kylmedelkylarna från kylmaskinerna trots att det fanns ett stort värmebehov på området. Anledningen till detta var den begränsning i kapacitet som fanns hos de två värmepumparna. Anläggningen var dock från början designad för totalt tre värmepumpar, men endast två installerades vilket beslutades sent under projekteringen. Anledningen var huvudsakligen att det då fanns en osäkerhet kring framtiden för den stora serverhallen PDC. Osäkerheten bestod i att ägarna av PDC:n varken var säkra på om de skulle låta datahallen vara kvar på KTH, hur länge den i så fall skulle vara kvar eller i vilken omfattning. Det fanns också en budgetfråga i projektet att ta hänsyn till och sammantaget gjorde detta att beslutet togs att bara installera två av de ursprungligen tänkta tre värmepumparna. Eftersom analysen påvisade att det finns ytterligare potential att återvinna spillvärme beslutades det att göra en LCC-utredning i syfte att utröna lönsamheten i att installera en eventuell tredje värmepump. Då utredningen visade på bra lönsamhet beslutades att genomföra denna nyinstallation (installation ej genomförd, endast beslut att gå vidare är taget).

Några ytterligare slutsatser från uppföljningsarbetet är:

- ett noggrant arbete i förstudie-fasen ger bra riktlinjer avseende den framtida energiprestandan samt möjlighet att tidigt specificera eventuella risker i installationsprojektet,
- en rekommendation är att i ett tidigt skede fastställa en driftstrategi för anläggningen, gärna tillsammans med den driftorganisation som kommer att handha anläggningen efter färdigställande. Driftorganisationens erfarenheter är också en viktig utgångspunkt för systemdesign,
- varje timme som driftorganisationen kan lägga på intrimning och justering efter färdigställande betyder mycket för energianvändningen. Detta gäller också uppföljningsarbetet efter genomförande av förändringar/åtgärder,
- det är viktigt att under projektering fastställa en plan för vilka mätningar som är viktiga för att kontinuerligt kunna arbeta med energieffektivisering och felsökning. Alltså att de nödvändiga mätpunkterna och mätarna installeras.
- ett komplement till det arbete driftorganisationen gör skulle kunna vara att fastighetsägaren anlitar en extern resurs som lägger uppskattnings 2-4 tim-



mar/vecka att endast jobba med analys av energianvändningen och de parametrar som påverkar denna. Arbetet ska ske i nära samordning med driftorganisationen och är extra viktigt de första 2–3 driftåren.

Den övergripande slutsatsen från energiuppföljnings- och optimeringsprojektet är att tack vare detta E2B2-projekt så har anläggningens drift- och energiprestanda analyserats på en betydligt djupare nivå än annars. Detta projekt visar att det finns mycket att vinna på en noggrann uppföljningsfas. I detta fall har detta mer djupgående uppföljningsprojekt resulterat i uppskattningsvis ca 1,5 GWh/år ytterligare värmebesparing (minskad fjärrvärme) samt ca 0,15 GWh/år minskad elanvändning. Det minskade energibehovet kan bidra till att minska anläggningens totala LCC med cirka 5 %.

För ytterligare diskussion och slutsatser se *Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv* och *Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering*.



5 Publikationslista och projekt- presentationer

Utöver denna slutrapport (i kronologisk ordning).

December 2015, presentation av forskningsprojektet på E2B2s forskarmöte arrangerat av IQ Samhällsbyggnad. Presentation hölls av Nils Brown från KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

December 2015, populärvetenskaplig artikel i tidskriften *VVS-forum* (nordens största VVS- och energitidsskrift) <http://www.vvsforum.se/nyheter/2015/december/konvertering-fran-fjarrvarme-till-varmepump-utreds/>

December 2016, presentation av forskningsprojektet på E2B2s forskarmöte arrangerat av IQ Samhällsbyggnad. Presentation hölls av Xenofon Lemperos från KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

December 2016, manus till en populärvetenskaplig artikel skickad till tidskriften *VVS-forum* (nordens största VVS- och energitidsskrift).

December 2016, manus till en vetenskaplig artikel under bearbetning.



6 Referenser

- Bobeck, M.; Nordemo, J. och Olsson, S. 2012. *Bilaga 1 – LCC-analys kylsystem*. Bengt Dahlgren AB, Nacka, Sverige.
- Dotzauer, E. 2010. Greenhouse gas emissions from power generation and consumption in a nordic perspective. *Energy Policy*, 38(2), 701-704. doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.066.
- CEN. 2011. Comité Européen de Normalisation. *EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. European Committee for Standardization, Bryssel, Belgien.
- Fortum. 2015a. *Fortum Värmes miljövärden 2015*. AB Fortum Värme, Stockholm, Sverige.
- Fortum. 2015b. *Årsredovisning 2015 AB Fortum Värme Holding samägt med Stockholm stad (publ)*. AB Fortum Värme, Stockholm, Sverige.
- Fortum. 2016. Personlig kommunikation med Fabian Levihn och Erik Dotzauer i maj 2016, AB Fortum Värme, Stockholm, Sverige.
- Gode, J.; Lätt, A.; Ekvall, T.; Martinsson, F.; Adolffsson, I. och Lindblom, J. 2015. *Miljövärdering av energilösningar i byggnader: Metod för konsekvensanalys*. Rapport nr. B 2240. IVL – Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, Sverige.
- Gode, J.; Martinsson, F.; Hagberg, L.; Öman, A.; Höglund, J. och Palm, D. 2011. *Miljöfaktaboken 2011: Uppskattade emissionsfaktorer för bränslen, el, värme och transporter*. VÄRMEFORSK Service AB, Stockholm, Sverige.
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Scryver, A.; Srujns, J. och Van Zelm, R. 2009. *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, First edition*. Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Nederländerna.
- IEA. 2013. International Energy Agency (IEA). *Nordic Energy Technology Perspectives: Pathways to a Carbon Neutral Energy Future*. Norden – Nordic Energy Research, and IEA - International Energy Agency.
- ISO. 2006. International Organization for Standardization (ISO). *ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organization for Standardization, Genève, Schweiz.
- Kåberger, T. och Karlsson, R. 1998. Electricity from a competitive market in life-cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*, 6, 103-109.
- Levihn, F. 2014. CO₂ emissions accounting: Whether, how, and when different allocation methods should be used. *Energy*, 68, 811-818. doi: 10.1016/j.energy.2014.01.098.



- Levihn, F. och Nuur, C. 2015. Co-benefits of primary energy conservation, reduced emissions and costs through biomass and waste incineration CHP in district heating. *International Journal of Energy Production and Management*, 1(1), 87-98. doi: 10.2495/eq-v1-n1-87-98.
- Olsson, S.; Liljenström, C. och Malmqvist, T. 2014. *Miljöstyrning av Renoveringsprocessen: Intervjustudie samt Litteratur- och Projektsammanställning*. KTH Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden.
- PRé Consultants. 2016. SimaPro Life Cycle Analysis. www.pre-sustainability.com.
- Sköldberg, H. och Unger, T. 2008. *Effekter av förändrad elanvändning/elproduktion - Modellberäkningar*. Elforsk Rapport 08:30.
- Weidema, B. P.; Bauer, C.; Hischier, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J. och Wernet, G. 2013. *The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. (Ecoinvent Report; No. 1, Vol. 3).



Bilaga 1 – Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv

Life cycle based evaluation of an onsite thermal energy production system

“Ny värmepump – utvärdering ur ett livscykelperspektiv” (31 sidor)

Denna bilaga utgör rapportering av projektdelen ”Miljöbedömning ur ett livscykelperspektiv”. Bilagan utgör ett artikelutkast som har skickats till den vetenskapliga tidsskriften *Building and Environment - The International Journal of Building Science and its Applications*.

I arbetet med att få artikeln publicerad i tidsskriften genomgår artikeln en granskningsprocess varför den publicerade versionen kan komma att avvika från den versionen som biläggs här.



Bilaga 2 – Redogörelse för driftoptimering

E2B2 Forskningsprojekt - Energiuppföljning

Energiuppföljning och driftoptimering av kyl-/värmepumpsanläggning på Campus KTH - Ny energicentral

(37 sidor)

Denna bilaga utgör rapportering av projektdelen "Energiuppföljning- och optimering".



Bilaga 3 – Klimatpåverkan från några olika material

En del av projektmålen var att sammanställa data från olika källor när det gäller inbyggd klimatpåverkan från olika material som används i det aktuella installationsprojektet. Data från fyra olika materialdatabaser har sammanställts i nedanstående tabell, för en av databaserna har tre olika påverkans-bedömningsmetoder kontrollerats. Det finns en viss spridning i datasammanställningen och detta visar på svårigheten med LCA och klimatpåverkansbedömningar eftersom resultatet är beroende av vilka ingångsdata som används. Det är därför mycket viktigt att man i sin bedömning av klimatpåverkan tydligt redovisar vilka källorna är.

Vid fabrik avser när en produkt eller ett material lämnar tillverkningsplatsen, detta synsätt kallas ibland "vagga till grind" vilket kan jämföras med "vagga till garv" som avser hela livscykeln.

Material	Materialdatabas	Påverkansbedömningsmetod	Klimat-påverkan [kg CO ₂ -e/kg mtrl]	Kommentar
Stål (plåt, varmvalsad)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	1,90	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	1,90	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	1,89	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	2,02	Globalt medelvärde, vid fabrik
	ÖKOBAUDAT	-	2,14	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	1,95	Globalt medelvärde, vid fabrik. Innehåller 39 % återvunnet material



Material	Materialdatabas	Påverkansbedömningsmetod	Klimatpåverkan [kg CO ₂ -e/kg mtrl]	Kommentar
Rostfritt stål (plåt)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	4,51	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	4,51	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	4,51	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	2,49	Globalt medelvärde, vid fabrik
	ÖKOBAUDAT	-	3,81	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	6,15	Globalt medelvärde, vid fabrik (Institute of Stainless Steel Forum, ISSF)
Koppar (rör)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	6,62	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	6,61	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	6,39	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	1,30	Globalt medelvärde, vid fabrik
	ÖKOBAUDAT	-	1,97	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	2,71	Medelvärde inom Europeiska Unionen (EU). Innehåller 37 % återvunnet material. Globalt medelvärde förväntas vara högre




Material	Materialdatabas	Påverkansbedömningsmetod	Klimatpåverkan [kg CO ₂ -e/kg mtrl]	Kommentar
Järn (gjutgods)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	1,75	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	1,75	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	1,74	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	Uppgift saknas	
	ÖKOBAUDAT	-	2,70	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	2,03	Baserat på litet dataunderlag
Mässing (gjutgods)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	6,24	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	6,24	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	6,07	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	Uppgift saknas	
	ÖKOBAUDAT	-	1,46	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	2,64	Baserat på litet dataunderlag



Material	Materialdatabas	Påverkansbedömningsmetod	Klimatpåverkan [kg CO ₂ -e/kg mtrl]	Kommentar
Aluminium (plåt)	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	18,71	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	18,71	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	18,53	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	3,22	Globalt medelvärde, vid fabrik
	ÖKOBAUDAT	-	10,69	Globalt medelvärde, vid fabrik
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	9,16	Avser produktion i Storbritannien, vilket innebär 25,6 % extruderad, 55,7 % valsad och 18,7 % gjutgods. Innehåller 33 % återvunnet material.
Köldmedium R134a	EcoInvent v.3	ReCiPe Mid-point	87,40	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	EPD 2013	87,34	Globalt medelvärde, vid fabrik
	EcoInvent v.3	ILCD 2011	87,30	Globalt medelvärde, vid fabrik
	European Life Cycle Database (ELCD) v3.1	ReCiPe Mid-point	Uppgift saknas	
	ÖKOBAUDAT	-	Uppgift saknas	
	Inventory of Carbon & Energy (ICE) v.2.0	-	Uppgift saknas	



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

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på www.E2B2.se.