

CHALMERS

Institution för rymd-, geo och miljövetenskap
Avdelningen för energiteknik
Erik Ahlgren

SLUTRAPPORT

Policy för hållbar värme – behovet av att förstå komplexa system

Finansierat av Energimyndigheten projekt P2022-00922

Sammanfattning

Det överordnade syftet med projektet var att kunna bidra med förståelse för hur byggnaders (med fokus på nybyggnation) värmeval är viktiga för hur nationella långsiktiga klimatmål kan nås, och hur sådan förståelse bör påverka planering och policy för hållbara värmeval framför allt på kommunal nivå. Projektet utgick ifrån att framtida fjärrvärme är centralt framför allt i större städer för att kunna nå de framtida nationella klimatmålen. Fjärrvärmens roll blir då kopplad till den mycket kraftiga ökningen av förnybar el i elsystemet, och fjärrvärmens blir en del inte bara i den lokala värmeförsörjningen utan också viktig för det nationella elsystemet och för att uppnå nationella klimatmål.

Projektets metodik har byggt på scenarioanalys kombinerad med användning av två energisystemsmodeller, en med fokus på ett fjärrvärmesystem och den andra en stadsmodell, vilka bägge bygger på det så kallade TIMES-ramverket. Modellerna representerar både tillförsel- och efterfrågesidorna av energisystemet och har en lång tidshorisont. Samverkan med kommunala aktörer har varit viktigt för scenariokonstruktionen.

Projektet konstaterar att fjärrvärmens kan spela en stor roll för att bidra till att hantera lastvariationer i det nationella elnätet. Det gäller förmodligen framför allt större fjärrvärmesystem med olika typer av värmeproduktionsanläggningar och möjligheter att etablera säsongslager, men också mindre fjärrvärmesystem med säsongslager kopplade till värmepumpar kan säkerligen bidra. Projektet konstaterar också att fjärrvärmens förmodligen står inför markanta utmaningar inte minst när det gäller att vara ett konkurrenskraftigt alternativ i nybyggda bostadsområden. Detta innebär att antingen behöver fjärrvärmens utvecklas och anpassas till högre grad av flexibilitet och samspel, eller så behövs annan typ av styrning och policy för att fjärrvärmens inte ska förbli utan också utvecklas till att spela en aktiv roll i ett alltmer varierande och flexibelt energi-/elsystem.

Projektet sökte också svar på frågan om vilka typer av underlag för välgrundade beslut som framför allt kommunala beslutsfattare behöver för att kunna ta beslut som bidrar till långsiktigt klimatsmart värmeval och som tar i beaktande olika aktörers respektive utgångspunkter. Det konstaterades att det är av största vikt att anlägga breda perspektiv, där de olika delarna av lokala urbana/kommunala betraktas integrerade, det vill säga att sektorskopplingar beaktas både för att identifiera möjligheter, avseende såväl resurs- som kostnadseffektivitet, och eventuella motstridigheter.

Projektplaner och -resultat har presenterats för kommunala aktörer under projektets gång. Projektresultaten presenterades på Termodagen 2024, och kommer fortsatt att presenteras vid olika event under 2025. Projektet har vidare lett till fyra publicerade vetenskapliga tidskriftsartiklar och presenterats vid sex vetenskapliga konferenspresentationer. Slutligen har projektet resulterat i en doktors- och en licentiatavhandling.

Inledning

Den helt övervägande delen av nybyggnation i Sverige sker i eller i närhet till större städer i vilka det redan finns ett centraliserat värmesystem. Värmeförsörjningen i nybyggnationen kan därför antingen bli fjärrvärme eller individuella lösningar, framför allt värmepumpar. Detta nybyggnationens värmeval har stått i fokus för projektet, som byggt på tanken att trots att det svenska elsystemet är i stort sett fossilfritt kan de valda värmelösningarna i nybyggnationen komma att få stor betydelse för hur väl vi kan nå klimatmålen, eftersom integrerade el- och värmesystem ökar förutsättningarna för en stor andel förnybar el, och framför allt fjärrvärmesystemen kan ses som integrerade med det överordnade elsystemet.

Ofta beaktas olika delar av energisystem separat, till exempel studeras tillförsel-/produktionssystemet separat från utvecklingen av efterfrågan/konsumtionen. Det har varit en grundläggande tanke i projektet att en sådan uppdelning av systemet lätt leder till suboptimeringar och därför har ett integrerat systemperspektiv eftersträvat.

Flera aktörer är involverade i värmevalen, och även om värmevalens påverkan på hur vi kan öka nå klimatmålen är stor, har de olika aktörerna andra hänsyn att ta, såväl ekonomiska som organisatoriska. Dessutom saknas kunskap om vad som faktiskt är den bästa värmelösningen för nybyggnation ur klimatsynpunkt. I detta projekt har vi därför undersökt frågor som handlar om vad som är den bästa värmelösningen, om sådan finns, under olika förutsättningar och delvis med hänsyn tagen till olika aktörers perspektiv och ståndpunkter. Osäkerheten kommer att studeras med hjälp av omfattande scenarioanalys.

Syfte

Det överordnade syftet med projektet har varit att kunna bidra med förståelse för hur byggnaders (med fokus på nybyggnation) värmeval är viktiga för hur nationella långsiktiga klimatmål kan nås, och med underlag för hur detta bör påverka planering och policy för hållbara värmeval (framför allt på kommunal nivå). Som beskrivit ovan, har projektet utgått ifrån att framtida fjärrvärme är centralt framför allt i större städer för att kunna nå de framtida nationella klimatmålen. Fjärrvärmens roll är då kopplad till den mycket kraftiga ökningen av förnybar el i elsystemet, och fjärrvärmens roll blir då inte bara den lokala värmeförsörjningen utan också att på olika sätt bidra till ett mer robust system. På detta sätt länkas de kommunala och nationella nivåerna i energisystemet.

Projektet syftade till att kunna svara på dessa frågor:

Hur mycket behöver samhället styra mot klimatsmarta (ur ett nationellt långsiktigt perspektiv) värmelösningar i olika typer av nya bostadsområden (med varierande förutsättningar för fjärrvärme) och olika bostadstyper (med olika värmekaraktäristika)?

Vilka typer av underlag för välgrundade beslut (framför allt på kommunal nivå) behöver beslutsfattare för att kunna ta beslut som bidrar till långsiktigt klimatsmarta värmeval och som tar i beaktande olika aktörers respektive utgångspunkter.

Projektet syftade vidare till att i ett iterativt förfarande med kommunaltjänstemän att kunna förfinna svaren på ovanstående frågor genom att förstå specifika förutsättningar avseende kommunal energiplanläggning. På så sätt kunde projektet bidra till att leverera underlag för välgrundade beslut som i sin tur bidrar till att såväl lokala hållbarhetsmål som nationella klimatmål nås på effektivt sätt.

Målet var vidare att bidra till den internationella forskningsfronten inom detta område; att utveckla en tvärvetenskaplig metodik anpassad till målen ovan; samt utveckla internationellt samarbete inom området.

Vidare skulle projektet resultera i en doktorsavhandling, en licentiatavhandling samt i fyra vetenskapliga tidskriftsartiklar och i tre vetenskapliga konferensbidrag.

Metod

Studien har genomförts med två olika modeller, den ena byggd på en representation av ett fjärrvärmesystem och den andra med ett bredare stadsperspektiv men också den baserad på en detaljerad representation av ett fjärrvärmesystem. Bägge modellerna bygger på det så kallade TIMES-ramverket, ett ramverk som används för sektorsövergripande energisystemanalyser med långa tidsperspektiv. Bägge modellerna bygger på en detaljerad representation av det existerande energisystemet. Modellen är kostnadsoptimerande och det valda modellresultatet är den lösning som har den lägsta totalkostnaden under hela tidshorisonten, vilket innebär fram till 2050. Hänsyn tas till ränta.

Modellen är dynamisk, vilket avser att struktur och infrastruktur av det studerade systemet kan ändras under den studerade tidshorisonten efter vad som ger den lägsta systemkostnaden, vilken alltså inkluderar såväl fasta som rörliga kostnader.

Projektet inleddes med studier baserade på användning av fjärrvärmesystemsmodellen, och senare konstruerades stadsmodellen baserad på fjärrvärmesystemsmodellen, vilket alltså innebär att stadsmodellen är specifikt utvecklad för en stad i vilken det finns ett väl utbyggt och utvecklat fjärrvärmesystem.

Modellen beaktar den långsiktiga utvecklingen av tillförsel- och efterfrågesidan tillsammans och samtidigt, vilket gör att modellen kan bestämma den mest kostnadseffektiva uppvärmningslösningen för olika byggnadstyper vid olika tidpunkter.

Göteborg, fjärrvärmesystemet respektive hela staden, har utgjort fall för de två modellerna. Dialog har förts med representanter för staden under projektets gång, vilket givit viktig input till studierna.

Framtida osäkerheter har representerats med hjälp av olika scenarier, vilka huvudsakligen varit av teknisk karaktär, det vill säga laborerat med olika energiprisscenarier och tillgång till olika typer av ytterligare energiinfrastruktur (säsongsvärmelager, industriell spillvärme, biomassatillgång, övergång till lågtemperaturspillvärme).

För att svara på de två forskningsfrågorna genomfördes tre olika analyser, två med fjärrvärmesystemsmodellen och en med stadsmodellen. I den första analysen användes fjärrvärmesystemsmodellen för att studera kostnadseffektiviteten av säsongslager för värme; i den andra fjärrvärmens framtida konkurrenskraft givet tre olika utvecklingar; och i den tredje användes stadsmodellen för att analysera vilka kostnadseffektiva energiframtider som stadens energi- och klimatpolicy leder till.

Resultat

Delstudie 1

Med tanke på de starka säsongsbetonade uppvärmningskraven är toppvärme viktig under kallare årstider. I stället för toppvärmeverk, skulle säsongsbetonad storskalig termisk energilagring (härefter kallat *säsongsvärmelager*) kunna utnyttjas. Värme kan lagras under varmare årstider och användas vid behov, vilket minskar behovet av toppvärmeverk. Systemmodelleringsstudier av säsongsvärmelager saknas dock i stor utsträckning. Därför användes i projektet fjärrvärmesystemsmodellen för att undersöka kostnadseffektiviteten för säsongsvärmelager och lagrets potentiella roller i ett lokalt värmesystem, men också med avsikt att studera hur säsongsvärmelager eventuellt påverkar behovet av import av el till det lokala systemet. Studien gjordes med antaganden om tre olika kostnader för säsongsvärmelager: låga byggkostnader motsvarande återanvändning av underjordiska oljelager, och mellan och höga byggnadskostnader, motsvarande olika typer av nya underjordiska utgrävningar.

Resultaten visar att säsongsvärmelager med låga byggkostnader är ekonomiskt lönsamma för samtliga antagna framtida elprisfall, och med mellan och höga byggkostnader för de flesta elprisfall. Säsongsvärmelager minskar främst investeringarna i och användning av elpannor och/eller biogaspannor, samtidigt som man ökar utnyttjandet av värmepumpar. Andra teknologier kan påverkas beroende på den framtida utvecklingen av elpriset. Storleken på säsongsvärmelagren motsvarar 3-7 % av det årliga fjärrvärmebehovet, beroende på byggkostnad och elprisutveckling. Fjärrvärmens konkurrenskraft påverkas inte tillräckligt mycket av ett eventuellt säsongsvärmelager för att modellen i större utsträckning ska välja fjärrvärme som värmeval i nya bostäder.

Resultaten av delstudien visar också att investeringar i och utnyttjande av nya fjärrvärmeanläggningar påverkas av investeringar i säsongsvärmelager. Detta understryker ytterligare behovet av att ta hänsyn till möjligheten för säsongsvärmelager när man planerar framtida utveckling av befintliga värmesystem. Uppvärmningssystemens långa livslängd understryker detta ytterligare. Om investeringar görs i säsongsvärmelager är det främst produktionen från värmepumpar som ökar, eftersom säsongsvärmelager fylls på under sommaren. Eftersom värmepumpar representerar den teknik inom värmesystemet som drar mest nytta av investeringar i säsongsvärmelager skulle detta kunna få konsekvenser även för aktörer som framför allt verkar utanför värmesystemet; branscher som har behov av kylning

skulle kunna identifiera affärsmöjligheter kopplade till att tillhandahålla låggradig överskottsvärme för användning i värmepumpar i fjärrvärmesystemet.

Behovet av elimport till det lokala värmesystemet under de kallaste perioderna minskar avsevärt med säsongsvärmelager (om det inte finns biogas tillgänglig). Detta indikerar att säsongsvärmelager är ett alternativ för att öka den tillgängliga elnätscapaciteten. Även om säsongsvärmelager kräver ökad värmeproduktionen från värmepumpar, sker detta under den varma årstiden då elbehovet är lägre. Användning av värmepumpar på ett mer opportunistiskt sätt är därför förmodligen inte en anledning till oro när det gäller elnätets kapacitet. Dessutom skulle denna opportunistiska värmeproduktion kunna öka integrationen av intermitterande förnybar elproduktion. Säsongsvärmelager tillsammans med värmepumpar bidrar därför inte bara i det lokala el-/värmesystemet utan påverkar också det regionala/nationella systemet.

Som nämnt ovan, även om säsongsvärmelager är ekonomiskt fördelaktiga för fjärrvärmesystemet, verkar de inte öka kostnadseffektiviteten i ett systemperspektiv av fjärrvärme som uppvärmningsmöjlighet för nya bostäder. Således, om det finns samhälls- eller kommunala mål att koppla nya bostäder till fjärrvärme, är säsongsvärmelager inte tillräckliga, utan annan policy krävs alltså.

Delstudie 2

Trots att fjärrvärmens bidragit till renare luft och i stor utsträckning bidrar till utnyttjande av annars svårutnyttjat förnybart bränsle, till energieffektivitet genom att utnyttja restvärme och till nödvändig flexibilitet i energisystemet genom kraftvärme och värmepumpar finns det utmaningar för sektorn, inte minst när det gäller anslutningar till nybyggda bostadsområden, och externa faktorer (energieffektivitet, bränsleprisökningar, värmepumpskonkurrens och policyförändringar) kan påverka fjärrvärmens roll och konkurrenskraft framöver. Därför har fjärrvärmens långsiktiga konkurrenskraft studerats. Med hjälp av den utvecklade fjärrvärmesystemmodellen testades tre inte helt osannolika fjärrvärmescenarier: (i) utfasning av biomassa (vilket ska ses som i linje med kaskadprincipen i EU-taxonomin), (ii) inkluderande av ökad tillgång av industriell spillvärme (anpassad till det uppdaterade energieffektivitetsdirektivet) och (iii) lägre systemtemperaturer (anpassade till tanken på mer förnybar energi och spillvärme).

Resultaten bekräftar att en utfasning av biomassa skulle försämra, och ökat spillvärmeutnyttjande och lägre systemtemperaturer förbättra, fjärrvärmeaffären. Resultaten bekräftar också att värmepumpar utgör den främsta konkurrenten till fjärrvärme.

När det gäller hur kostnadseffektivt fjärrvärme är för nya bostäder om biomassa fasas ut, resulterar modelleringen i denna studie i att fjärrvärme inte är ett kostnadskonkurrenskraftigt alternativ för uppvärmning av nya byggnader om det inte finns tillgång till biomassa. Det blir heller inte kostnadseffektivt med utbyggnad av fjärrvärmenätet till nya bostäder om inte låggradig industriell spillvärme utnyttjas eller om fjärrvärmemetemperaturen sänks. Även med integration av spillvärme och en sänkt fjärrvärmemetemperatur, men utan biomassa, är utbyggnaden av fjärrvärmenätet till nya bostäder lägre jämfört med om det finns tillgång till biomassa. Investeringar i säsongsvärmelager kan dock bidra till något högre

fjärrvärmenätsutbyggnad i detta specifika scenario. I termer av policy, identifierar vi ett behov för medvetenhet om potentiellt stor inverkan på kostnadseffektiviteten för fjärrvärme som en konsekvens av inte osannolika framtida förändringar av tillgången på biomassa och dess priser.

När det gäller hur kostnadseffektiv fjärrvärme är för nya bostäder vid utnyttjande av lågradig industriell spillvärme eller vid en sänkning av fjärrvärmemetemperaturen visar modelleringsresultaten att fjärrvärmen är ett kostnadskonkurrenskraftigt alternativ också för uppvärmning av nya byggnader under dessa antaganden. Fjärrvärmeförsörjningen påverkas, och integrationen av industriell spillvärme för användning i värmepumpar är ekonomisk för alla elprisfall och gynnar fjärrvärmenätsutbyggnaden till nya bostäder. En lägre fjärrvärmemetemperatur bidrar också till fjärrvärmenätets expansion. Lågvärdig industriell spillvärme i kombination med lägre fjärrvärmemetemperatur leder till ännu större nätutvidgning.

En sista slutsats är att värmeförsörjningen i framtiden kommer att vara annorlunda än vad den är idag. Spillvärme i kombination med värmepumpar framstår som ett starkt alternativ och speglar den starka sektorskopplingen mellan värme och el. Sektorskopplingar har också identifierats som ett nästa utvecklingssteg av EU, men politiken hänger inte riktigt med. Sektorskopplingar behövs för ett klimatsmart, kostnads- och resurseffektivt energisystem, och styrmedel som underlättar och bidrar är nödvändiga och behöver identifieras. Nuvarande silotänkande behöver luckras upp, och regler och policy som inte tar hänsyn såväl vinsterna som komplexiteten som sektorskoppling innebär behöver modifieras. I denna process rekommenderas policy som stödjer kraftvärmelens bidrag och mervärden på systemnivå. På en övergripande nationell politisk nivå är det viktigt att se fjärrvärme inte bara som en lokal angelägenhet utan som en sammanlänkade del av ett nationellt smart och effektivt elvärmesystem och att förstå att de här undersökta vägarna skulle kunna ha en stark påverkan på den ekonomiska bärkraften för fjärrvärme, särskilt när det gäller nätutvidgning till ny bebyggelse.

Delstudie 3

Städer står inför den stora utmaningen att uppfylla växande stadsbefolkningars energiefterfrågan samtidigt som de ska minska klimatpåverkan (och också anpassa sig till ett ändrat klimat). Urban energiplanering är avgörande för att hantera detta och städer antar ofta energiplaneringsstrategier och utsläppsminskningmål i linje med nationella klimatmål. Städernas energisystem är komplexa system med många interaktioner och ömsesidiga beroenden. Modellering och scenaribedömningar används därför i ökande utsträckning för att stödja sådan stadsenergiplanering. Som inledning till modelleringsstudien genomgicks den vetenskapliga litteraturen grundligt, vilket resulterade i en publicerad review-artikel (se publikationslistan nedan). I den konstaterades att fortfarande är det relativt få publicerade studier som med hjälp av modellering undersöker utvecklingen av städernas energisystem. Granskning av litteraturen visar, föga förvånande, att de publicerade studierna huvudsakligen fokuserat på klimatomställning och policybedömningar, men att vissa aspekter har modellerats i mycket begränsad omfattning, till exempel aktörsperspektiv och lokala luftföroreningar.

I denna delstudie, som byggde på scenarioanalys, utvärderades effekten av stadsenergiplaner på den långsiktiga utvecklingen av stadens energisystem och sektoriella interaktioner

undersöktes. Med tillämpningen av modelleringsramverket TIMES på stadsnivå ger modellresultaten optimala mixar av teknikutbyggnader för långsiktig kostnadseffektiv utveckling av energisystemet. Sektoriella interaktioner studerades utifrån modellens utfall om fördelningen av resurser mellan värme-, transport- och elsektorerna.

För denna delstudie vidareutvecklades den tidigare använda fjärrvärmesystemsmodellen till att bli en stadsenergisystemsmodell. Detta innebar att också transportsektorns energiförbrukning och klimatpåverkan inkluderades. På så sätt möjliggjordes studier av intersektoriella interaktioner och konkurrens om begränsade resurser (både el och bioenergiressurser). Medan vi i de två första delstudierna fokuserade på nybyggnation, inkluderades hela bebyggelsebeståndet i den tredje delstudien. Policy-drivna scenarier utvecklades och testades under systemosäkerheter och priskänsligheter, vilka delvis identifierades vid aktörssamtal.

Resultaten avseende värmesektorn och fjärrvärmeproduktionen visar inte något överraskande utan inkluderar såväl biomassakraftvärme som värmepumpar och energieffektivitet i byggnader. Mer slående är att resultaten visar på en snabb ökningen av biobränsle inom transportsektorn, följt av ökande elektrifiering framför allt senare under den studerade tidshorizonten. Med de tillämpade osäkerheterna, observeras olika kostnadsoptimala fjärrvärmeproduktionsmixar och värmeförsörjningslösningar, vilka kan tolkas som alternativa planeringsstrategier.

Modellresultaten visar också tydlig konkurrens mellan biomassa och el mellan de olika sektorerna, och de kan på så sätt bidra till förståelse av olika övergångsstrategier för energisystemet ur ett långsiktigt perspektiv. Ett införande av stadsenergiplanerna resulterar inte i några väsentliga förändringar i värmesystemsutvecklingen jämfört med referensscenariet, förutom minskade behov av fjärrvärme på grund av mer fokus på renovering av byggnadsbeståndet och därav följande minskande värmebehov. De utsläppsminskningsmål som satts inom stadsenergiplanerna leder dock till en snabb, kortsiktig penetration av biobränslen i transportsektorn, följt av en gradvis elektrifiering efter 2030. När stadsenergiplanerna kombinerades med test av systemosäkerheter och priskänsligheter identifieras olika mixar av fjärrvärmeproduktion och leveranslösningar som kostnadsoptimala. Under antagandet om konstanta framtida bioresurspriser observeras en stor utbyggnad av biomassakraftvärme och penetration av biobränslen i också andra delar av transportsektorn än personbilar. I andra fall observeras olika blandningar av kraftvärme och värmepumpar, vilket ger intressenterna alternerande strategier för energisystemsplaneringen.

Ur ett tvärsektorielt perspektiv ger modellutfallen information om fördelningen av el och biobaserade resurser mellan värme- och transportsektorerna för vårt undersökta fall, Göteborg. Elanvändningen i bostadssektorn, inklusive elbilar och värmepumpar, kan öka med upp till 56 % 2050 jämfört med 2018. Bioresursutnyttjandet kan nå upp till 4,8 TWh 2050 jämfört med 0,9 TWh 2018 under konstanta framtida bioresursprisscenarier. Kombinerad sektoriell utveckling ger en förståelse för behovet av strategisk planering för att säkerställa en effektiv resursallokering mellan sektorer.

Slutsatser

Här används de ovan presenterade svaren på de tre delstudierna för att svara på de överordnade forskningsfrågorna presenterade under Syfte.

Den första frågan besvarades genom delstudie 1 och 2. Projektet konstaterar att fjärrvärmen kan spela en stor roll för att bidra till att hantera lastvariationer i det nationella elnätet. Det gäller förmodligen framför allt större fjärrvärmesystem med olika typer och värmeproduktionsanläggningar och möjligheter att etablera säsongslager, men också mindre fjärrvärmesystem med säsongslager kopplade till värmepumpar kan säkerligen bidra. Projektet konstaterar också att fjärrvärmen förmodligen står inför markanta utmaningar inte minst när det gäller att vara ett konkurrenskraftigt alternativ i nybyggda bostadsområden. Detta innebär att antingen behöver fjärrvärmen utvecklas och anpassas till högre grad av flexibilitet och samspel, eller så behövs annan typ av styrning och policy för att fjärrvärmen inte bara ska förbli utan också utvecklas till att spela en aktiv roll i ett alltmer varierande och flexibelt energi-/elsystem. Hur fjärrvärmen ska få ersättning för att bidra till att möjliggöra en större andel förnybar och intermittent el på nationell nivå har inte studerats i projektet, men utgör en intressant och relevant fråga.

I den tredje delstudien söktes svaret på frågan om vilka typer av underlag för välgrundade beslut som framför allt kommunala beslutsfattare behöver för att kunna ta beslut som bidrar till långsiktigt klimatsmarta värmeval och som tar i beaktande olika aktörers respektive utgångspunkter. Det svar på frågan som studien ger är att det är av största vikt att anlägga breda perspektiv, där de olika delarna av lokala urbana/kommunala betraktas integrerade, det vill säga att sektorskopplingar beaktas både för att identifiera möjligheter, avseende såväl resurs- som kostnadseffektivitet, och eventuella motstridigheter. Det är också av vikt att undersöka olika möjliga framtider genom bred scenarioanalys. Slutligen är det av vikt att förstå hur lokal policy och energi- och klimatplaner förhåller sig till nationell policy för att undvika divergerande mål och planer. Det sistnämnda har inte undersökts i projektet, men är föremål för en ny studie.

Ytterligare projektresultat

Projektet har resulterat i en doktorsavhandling:

Karl Vilén, 6 februari 2024 (*Evolution of Future Heating Systems - Modeling of an Expanding City Using a Dynamic Systems Approach*);

och en licentiatavhandling:

Kushagra Gupta, 21 januari 2025 (*Policy-driven City Energy Systems Planning - Modelling Long-term Strategies*).

Projektet har resulterat i fyra vetenskapliga artiklar (samtliga dessa är öppet tillgängliga):

Karl Vilén, Erik O. Ahlgren (2024). Seasonal Large-Scale Thermal Energy Storage in an Evolving District Heating System – Long-term Modeling of Interconnected Supply and Demand. *Smart Energy* **15**: 100156. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2024.100156>

Karl Vilén, Kristina Lygnerud, Erik O. Ahlgren (2024). Policy Implications of Challenges and Opportunities for District Heating – the Case for a Nordic Heating System. *Energy* **308**: 132831. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132831>

Kushagra Gupta, Kenneth Karlsson, Erik O. Ahlgren (2024). City energy planning: Modeling long-term strategies under system uncertainties. *Energy Strategy Reviews* **56**: 101564. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101564>

Kushagra Gupta, Erik O. Ahlgren (2025). Analysis of City Energy Systems Modeling Case Studies: A Systematic Review. *Int J Sustainable Energy Planning and Management* **43**: 123–139. <http://doi.org/10.54337/ijsepm.9335>

Projektet har också resulterat i sex konferensbidrag.