
Svenskt Vatten

UTVECKLING

Rapport

Nr 2021-26

Värmeåtervinning ur avloppsvatten

Energiåtervinning och påverkan på avloppssystemet

Magnus Arnell
Ramesh Saagi
Christoffer Wärff
Marcus Ahlström
Ulf Jeppsson

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Värmeåtervinning ur avloppsvatten. Energiåtervinning och påverkan på avloppssystemet
TITLE OF THE REPORT	Heat recovery from wastewater. Energy recovery and impact on the wastewater system
FÖRFATTARE	Magnus Arnell, RISE/Lunds universitet, Ramesh Saagi, Lunds universitet, Christoffer Wärff, RISE/Lunds universitet, Marcus Ahlström, RISE, Ulf Jeppsson, Lunds universitet
RAPPORTNUMMER	2021-26
ANTAL SIDOR	58
SAMMANDRAG	Uppvärmning av tappvarmvatten utgör lejonparten av den totala energianvändningen i den urbana vattencykeln, upp till 90 procent. Uppskattningar visar att 780 till 1 150 kWh per person och år används i svenska hushåll i form av varmvatten. Denna energi hamnar huvudsakligen i avloppsvattnet. Variationerna i varmvattenanvändning är stora och det går att göra besparingar på brukarnivå. Ändå finns det stor potential för energieffektivisering genom värmeåtervinning ur avloppsvatten med värmeväxlare och värmepumpar.
SUMMARY	Heating of tap water makes up the lion share of the total energy used in the urban water cycle, up to 90 %. Estimates show that 780 to 1,150 kWh per person and year is used in Sweden for heating water. This energy mainly ends up in the sewers. Even if variations in energy use for this purpose are large and savings are possible, wastewater heat recovery, using heat exchangers or heat pumps, has a large potential.
SÖKORD	Energibalans, matematisk modellering, simulering, resursåtervinning, temperaturdynamik, värmeåtervinning från avloppsvatten, avloppsreningsverk
KEYWORDS	Energy balance, mathematical modelling, simulation, resource recovery, temperature dynamics, wastewater heat recovery, wastewater treatment plant
MÅLGRUPPER	Forskare, VA-organisationer, myndigheter, fastighetsägare
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGSÅR	2021
UTGIVARE	© Svenskt Vatten AB
REFERENS	Arnell M., Saagi R., Wärff C., Ahlström M. och Jeppsson U. (2021). Värmeåtervinning ur avloppsvatten. Energiåtervinning och påverkan på avloppssystemet. SVU-rapport 2021-26. Stockholm, Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	16-106
PROJEKTETS NAMN	Hållbarhetsanalys av värmeåtervinning ur avloppsvatten (HÅVA)
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling, FORMAS, Sweden Water Research, Käppalaförbundet, Tekniska Verken i Linköping, AB Stångåstaden

Förord

Forskningsprojektet *Hållbarhetsanalys av värmeåtervinning ur avloppsvatten (HÅVA)* har pågått från år 2017 till 2020 och slutrapporteras under 2021. Projektet föddes ur insikten att en stor potential för återvinning av spillvärme ur kommunalt avloppsvatten begränsades av att det i praktiken var förbjudet. Detta delvis på grund av bristande kunskap om dess systemövergripande påverkan. Den allmänna strävan mot ett mer hållbart samhälle driver alla aktörer i VA-systemet, VA-organisationer såväl som dess kunder, att arbeta för mer resurseffektiva och cirkulära system. Det ökar trycket på att också återvinna spillvärme ur avloppsvatten.

Frågan väckte stort intresse och projektet samlade ett starkt konsortium av akademiska institutioner, VA-organisationer, fastighetsbolag och branschorganisationer. Partner i projektet har varit Lunds universitet, avdelningen för Industriell Elektroteknik och Automation (Ulf Jeppsson, Magnus Arnell och Ramesh Saagi), RISE Research Institutes of Sweden (Magnus Arnell, Christoffer Wärff, Marcus Ahlström, Emma Lundin och Erik Kärrman), Sweden Water Research (David Gustavsson, Maria Jonstrup och Hans Bertil Wittgren), Käppalaförbundet (Stefan Erikstam, Mikael Nielsen och Ewelina Basiak-Klingspetz), Tekniska Verken i Linköping (Robert Sehlén, Johan Lundén och Jenny Nordenberg) samt AB Stångåstaden (Mårten Danckwardt Lillieström och Ulrica Melin). Representanter i referensgruppen har varit WSP (Roland Jonsson), Fastighetsägarna (Björn Lundborg), Nordic Choice Hotels (Catarina Molén Runnäs och Ulrika Malmin), VVS Företagen (Magnus Everitt), RISE (Kristina Mjörnell), Svenskt Vatten (Karin Ols), Hydropress Huber AB (Simon Warnquist, John Skantze och Pontus Hallbäck) och KTH (Ivo Martinac och Adnan Ploskic).

Författarna vill rikta ett stort tack till alla som bidragit till genomförandet av projektet och deltagit aktivt med stort engagemang och delat med sig av sin kunskap.

Denna rapport presenterar de övergripande resultaten och slutsatserna från projektet. En stor del av forskningen har bestått i metodutveckling av de modeller som använts för analysen. Utöver denna rapport finns ett flertal tekniska rapporter och vetenskapliga publikationer där detta presenteras i detalj. Referenser till dessa återfinns i rapporten och i referenslistan. I princip alla publikationer från projektet är fritt tillgängliga (Open Access). Likaledes är all modellkod som tagits fram inom projektet fritt tillgänglig via Github (<https://wwtmodels.pubpub.org/>).

Projektet har möjliggjorts genom finansiering från Formas (Dnr. 942-2016-80) och Svenskt Vatten Utveckling. Deltagande VA-organisationer har stått för betydande medfinansiering kontant och in-kind. Författarna är mycket tacksamma för denna finansiering.

Linköping, december 2021

Magnus Arnell, Ramesh Saagi, Christoffer Wärff, Marcus Ahlström, Ulf Jeppsson

Innehåll

Förord.....	2
Sammanfattning.....	4
Summary	6
Terminologi och förkortningar	7
Nomenklatur	8
1 Introduktion	9
1.1 Syfte och mål.....	9
1.2 Projektets bidrag till FN:s hållbarhetsmål	9
1.3 Avgränsningar.....	10
1.4 Rapportens omfattning och upplägg	11
2 Bakgrund om värmeåtervinning ur spillvatten	12
2.1 Avloppsvattnets energiinnehåll och temperatur.....	12
2.2 Alternativ för värmeåtervinning.....	13
2.3 Temperatures påverkan på avloppssystemet	14
3 Systemanalys.....	15
3.1 Temperatur i hushålls­spillvatten.....	15
3.2 Energibalans i avloppsledningsnät och avloppsreningsverk.....	16
3.3 Värmeväxlare och värmepumpar för återvinning av spillvattenvärme	17
3.4 Osäkerhetsanalys.....	18
3.5 Påverkan på kraftvärmeproduktion	18
3.6 Simulerade scenarier	20
3.7 Mätningar och datainsamling	26
4 Resultat och diskussion	30
4.1 Avloppsvattentemperatur.....	30
4.2 Värmeåtervinning i flerfamiljshus – energiåtervinning och påverkan på spillvattentemperatur	32
4.3 Effekten av värmeåtervinning på inloppstemperaturen på avloppsreningsverk	34
4.4 Påverkan på avloppsreningsverkets prestanda av värmeåtervinning uppströms.....	36
4.5 Utvärdering av värmeåtervinning och värmeproduktion	41
4.6 Ekonomiska och juridiska avvägningar.....	43
5 Slutsatser	44
6 Framtida forskning	46
6.1 Fastighet.....	46
6.2 Ledningsnät	46
6.3 Reningsverk	47
6.4 Systemperspektiv	47
Referenser	48
Bilaga A Parametrar för osäkerhetsanalysen	53
Bilaga B Kompletterande simuleringsresultat för systemövergripande scenarier.....	54
Bilaga C Kompletterande resultat för integrerad simulering av fastighetsnära värmeåtervinning och kraftvärmeproduktion	55

Sammanfattning

Uppvärmning av tappvarmvatten utgör lejonparten av den totala energianvändningen i den urbana vattencykeln, upp till 90 procent. Uppskattningar visar att 780 till 1 150 kWh per person och år används i svenska hushåll i form av varmvatten. Denna energi hamnar huvudsakligen i avloppsvattnet. Variationerna i varmvattenanvändning är stora och det går att göra besparingar på brukarnivå. Ändå finns det stor potential för energieffektivisering genom värmeåtervinning ur avloppsvatten med värmeväxlare och värmepumpar.

I många kommuner är värmeåtervinning ur kommunalt avloppsvatten i dag förbjuden eller kraftigt begränsad på fastighetsnivå genom skrivningar i Allmänna bestämmelser för VA-anläggning (ABVA). Det krävs bättre förståelse av värmeåtervinningens systempåverkan för att avgöra hur, eller om, detta bör regleras utan att i onödan begränsa en stor potential för energieffektivisering. Syftet med projektet var att bidra till ökad kunskap om värmeåtervinning ur avloppsvatten och hur det påverkar avloppsvattenreningen.

Värmeåtervinning ur avlopp är lovande ur ett energiperspektiv, men det finns också utmaningar på systemnivå där motstridiga målsättningar inte har undersökts fullt ut. Om värmeåtervinningen resulterar i lägre inloppstemperatur för avloppsvattnet till reningsverket kan det leda till försämrad rening och ökade utsläpp till recipienten av framför allt kväve, samt till ökade driftskostnader för energi och kemikalier.

Rapporten redovisar en systemstudie som har utförts för att undersöka vilken effekt som värmeåtervinning i olika positioner (från byggnad till reningsverk) och olika omfattning får på systemet i stort när det gäller energiåtervinning, vattentemperatur och avloppsvattenrening. I det undersökta systemet ingår hela avloppssystemet från uppkomsten av avloppsvatten i fastigheter över ledningsnätet till rening i reningsverk och utsläpp till recipient. Kopplingen till och effekten på den integrerade el- och värmeproduktionen vid kraftvärmeverk har också undersökts. En matematisk modell för flöde, temperatur och föroreningsbelastning av avloppsvatten har byggts upp. Modellen inkluderar generering av hushållsspillvatten, energibalans i byggnad, ledningsnät och reningsverk, drift- och reningsprocesser på reningsverk, samt energiåtervinning med värmeväxlare och värmepumpar i olika delar av systemet. Tre fallstudier har utförts i Linköping, Malmö och Lidingö där olika aspekter av frågeställningen har undersökts. Simuleringar har utförts av värmeåtervinning i fyra principiellt olika positioner och för olika andelar av avloppsvattnet (0 till 100 procent).

Resultaten från mätningar och simuleringar visar att den genomsnittliga opåverkade avloppsvattentemperaturen ut från lägenhetsbyggnader är 18 till 25 °C beroende på bland annat kallvattentemperatur. Simulering i Linköping av värmeåtervinning med värmeväxlare i duschar visar att temperaturen sänks med mellan 1,5 och 4,2 °C (årsmedelvärde) från byggnaden. Vid värmeväxling av det samlade avloppsvattnet från fastighet sänks temperaturen med upp till 2,3 °C (årsmedelvärde). Temperatursänkningen är större vintertid, upp till 3,4 °C. De stora variationerna beror på utrustningens effektivitet och temperaturskillnaden i värmeväxlaren.

I ledningsnätet går energi förlorad till omgivande mark och luft. Inloppstemperaturen till reningsverket skiljer sig signifikant mellan olika platser beroende på bland annat ledningsnätets storlek och status. Simuleringar av värmeåtervinning uppströms reningsverket i antingen byggnader eller ledningsnäten visar att inloppstemperaturen sänks

i varierande grad. Vid värmeåtervinning i byggnader sänks temperaturen mest om åtgärden görs på duschar; vid en inkopplingsandel på 90 procent av duscharna med värmeåtervinning nås i genomsnitt en temperatursänkning på 1,0 °C vid inloppet till reningsverket (simuleringar för Linköping). Större temperatursänkning, 2,5 °C, uppnås bara vid simulering av 60 till 90 procent värmeåtervinning med värmepumpar i det kommunala spillvattennätet. Påverkan på inloppstemperaturen varierar över dygnet, veckan och året.

De temperatursänkningar som uppmättes i studien visade sig inte ha någon signifikant påverkan på reningseffekten i avloppsreningsverket. Med tanke på osäkerheterna i modellen har ingen signifikant ökning av ammonium- och totalkväve i utgående vatten påvisats. Större och jämnare temperatursänkningar än vad värmeåtervinningen visade sig åstadkomma har också simulerats. Med upp till 3 °C temperatursänkning av inkommande avloppsvatten visade simuleringar av Linköpings och Käppalaförbundets avloppsreningsverk viss ökning av ammonium- och totalkväve men utan att överskrida gällande utsläppsvillkor när verken drivs med oförändrad driftstrategi och belastning. Sänkt avloppsvattentemperatur kan, utifrån lokala förutsättningar, i vissa fall påverka avloppsreningsverket utöver den nuvarande reningsprestandan (inklusive kväveavskiljning) som utvärderats i den här studien. Kapacitetsgränsen för anläggningen kan sänkas och sedimenteringsprocesserna kan påverkas negativt.

Mängden återvunnen värme är störst vid värmeåtervinning i duschar, 120 till 330 kWh per person och år. Undantaget är sommartid då värmeåtervinning med värmepumpar på en större del av flödet i ledningsnätet kan ta ut mer energi totalt sett. Simuleringarna med värmepumpar har dock stora osäkerheter eftersom en skalbar generell värmepumpsmodell har använts; platsspecifika faktorer påverkar prestanda mycket i verkliga fall.

Värmeåtervinningen påverkar det integrerade energisystemet på olika sätt beroende på vilken energikälla den återvunna värmen ersätter. Minskat värmeunderlag för kraftvärme leder samtidigt till minskad produktion och försäljning av el och värme, vilket i sin tur leder till sämre ekonomiskt resultat för energibolaget. Samtidigt visar simuleringar av det integrerade energisystemet i Linköping (inklusive kompensatorisk elproduktion för bortfallet lokalt) att växthusgasutsläppen ökar med cirka 63 g CO₂e (koldioxidekvivalenter) per kWh återvunnen avloppsvattenvärme. Detta gäller kraftvärme och inte generellt för andra uppvärmningsmetoder såsom eluppvärmning eller fjärrvärme utan kombinerad elproduktion. Möjliga framtida förändringar av energisystemet har inte beaktats.

Kostnaden för och vinsten med värmeåtervinning tillfaller den som tar ut och återbrukar värmen om inte andra avtal sluts. Det gäller fastighetsägarna i fastigheter och VA-organisationen på reningsverk. Om det inte går att visa att värmeåtervinning påverkar avloppssystemet negativt bör det utredas om det är rimligt att hindra kunderna från att återvinna den energi som de själva värmt upp vattnet med.

Summary

Heating of tap water makes up the lion share of the total energy used in the urban water cycle, up to 90 %. Estimates show that 780 to 1,150 kWh per person and year is used in Sweden for heating water. This energy mainly ends up in the sewers. Even if variations in energy use for this purpose are large and savings are possible, wastewater heat recovery, using heat exchangers or heat pumps, has a large potential.

While the application of wastewater heat recovery is promising from an energy perspective, there are also challenges on a system-wide level where trade-offs between different objectives have not been fully examined. If the recovery of heat lowers the influent temperature of the wastewater to the treatment plant, it can have a negative impact on the biological treatment processes – primarily for nitrogen removal – leading to increased discharge of pollutants. Moreover, operational costs for chemicals and energy can be affected.

The report presents a system-wide study performed to investigate the impact of wastewater heat recovery on energy recovery, wastewater temperature and treatment plant performance. The whole system from the origin of the wastewater in households via the sewers to the wastewater treatment plant is included in the analysis. The impact on the combined heat and power production, interlinked to heat recovery in areas with district heating, has also been investigated. Sub-models have been developed, extended, and combined for households, sewers, wastewater treatment plants and heat recovery equipment. Three case studies are included, i.e. in Linköping, Malmö and Lidingö, where different aspects of the research question has been examined. Simulations have been done for heat recovery in four types of positions (from showers to wastewater treatment plants) and for a varying degree of the population / flow (0 to 100 %).

The results from measurements of the average unaffected wastewater temperature from apartment buildings was 18 to 25 °C depending on, for example, the cold tap water temperature. Simulations of heat recovery from showers with heat exchangers lower the temperature by 1.5 to 4.2 °C (annual average) out from the building. Simulations of heat exchange from the collected wastewater from buildings show that the temperature was lowered by 2.3 °C as annual average (larger reduction for the winter season, 3.4 °C). The large variations were due to varying equipment efficiency and delta temperature in heat exchangers. In the sewer model, energy loss to ambient soil and air was included. The influent temperature to the wastewater treatment plant was reduced by a maximum of 1 °C (recovery in 90 % showers), when recovering heat in buildings (Linköping city-wide simulation). Larger temperature reduction at the plant influent, 2.5 °C, could only be achieved by heat pumps at 60-90 % of the wastewater flow. These temperature reductions did not lead to any significant affect on the treatment performance at the treatment plant. Provided the uncertainty of the simulations, no increase in effluent ammonia was demonstrated. However, a reduced influent temperature can, depending on local conditions, impact the plant beyond the present treatment performance that was simulated in this study.

The most heat can be recovered at the most up-stream location, i.e. in showers, 120 to 330 kWh per person and year. The exception is during summers when a larger amount of energy can be recovered if a large share of the wastewater flow (60-90 %) is utilised for recovery with heat pumps. The heat recovery also affects the interconnected energy system. In areas with district heating (which is standard in Swedish medium to large-size cities) it leads to reduced production of combined heat and electrical power. Simulations of the integrated system of heat recovery and energy production for Linköping show that in this case, beyond financial loss for the energy utility, the greenhouse gas emissions are thereby increased by 63 g CO₂ equivalents per recovered kWh of heat when the compensatory external power production is included. Although combined heat and power production is common, the above result does not hold for other types of systems, e.g. only power production or heat production without combined power production. Potential future changes of the energy system have not been considered.

Terminologi och förkortningar

ABVA	Allmänna bestämmelser för VA-anläggning
ARV	Avloppsreningsverk
ASM1	Activated Sludge Model No. 1
ASS	Aktivt slamsteg
Avloppsvatten	Använt, ofta förorenat, vatten
Avloppssystem	Det kompletta systemet för insamling och behandling av avloppsvatten före utsläpp till recipient, d.v.s. ledningsnät, pumpstationer och avloppsreningsverk
BSM2	Benchmark Simulation Model No. 2
Dynamisk	Varierar över tid (om simulering)
Gråvatten	Avloppsvatten från bad, disk och tvätt i hushåll
HH	Hushåll
HP	Värmepump
MBBR	Biofilmsprocess på rörligt bärmaterial (eng. Moving Bed Bioreactor)
PDF	Sannolikhetsdensitetsfunktion (eng. Probability Density Function)
Pos. 1-4	Position 1-4 för värmeåtervinning ur avloppsvatten: 1) apparater / duschar, 2) fastigheter, 3) avloppsledningsnät och 4) avloppsreningsverk
SCADA	Styr- och övervakningssystem (eng. Supervisory Control And Data Acquisition)
SMHI	Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
Spillvatten	Synonymt med avloppsvatten, se ovan
Statisk	Varierar inte över tid (om simulering)
Svartvatten	Toalettavloppsvatten
VA	Vatten och avlopp
VVX	Värmeväxlare

Nomenklatur

CO_2e	Koldioxidekvivalenter	[kg CO_2]
COD	Kemiskt syreförbrukande ämnen	[mg O_2 /l]
COP	Coefficient of performance	[–]
E	Energi	[J] eller [kWh]
$\dot{m}_i$	Massflöde, index i anger process och / eller flöde som avses	[kg/d]
$\text{NH}_4\text{-N}$	Ammoniumkväve	[mg N/l]
$\text{NO}_3\text{-N}$	Nitratkväve	[mg N/l]
P_i	Effekt, index i anger process och som avses HP eller VVX	[kW]
pe	Personekvivalenter	[st]
TKN	Totalt Kjeldahl-kväve	[mg N/l]
TN	Totalkväve	[mg N/l]
TP	Totalfosfor	[mg P/l]
T_i	Temperatur, index i anger process och / eller flöde som avses	[°C]
Q_i	Flöde, index i anger process och / eller flöde som avses	[m ³ /d]

1 Introduktion

Cirkulär ekonomi är ett begrepp som uttrycker behovet av ekonomiskt hållbara, resurseffektiva och recirkulerande system med låga utsläpp för att skapa hållbara och attraktiva städer och samhällen (Ghisellini *et al.*, 2016; Geissdoerfer *et al.*, 2017). Att sluta system och kretslopp genom återvinning av resurser är nödvändigt för att inte överträda de planetära gränserna (Rockström *et al.*, 2009). Ett område som varit i särskilt fokus för diskussionerna om resurseffektivitet de senaste decennierna är energi. Framställning av användbar energi är resurskrävande och leder till utsläpp till land, vatten och luft på olika sätt. Olika former av energi har olika kvalitet eller värde (s.k. exergi). Till exempel är el flexibelt, lätt att transportera och räknas som högvärdigt medan värmeenergi är mer lågvärdigt, speciellt vid lägre temperaturer. Likväl är det ur ett hållbarhetsperspektiv alltid viktigt att spara energi oavsett energislag (Olsson, 2012; Olsson, 2018).

En betydande mängd energi används för uppvärmning av varmvatten i svenska hushåll. Uppvärmning av tappvarmvatten hos slutanvändarna utgör upp till 90 % av energin i den urbana vattencykeln (Olsson, 2012). Denna energi hamnar huvudsakligen i avloppsvattnet och går normalt förlorad genom värmeförluster i ledningsnät, reningsverk och till recipienten. Användningen av varmvatten varierar mycket och tidigare studier har visat att betydande besparingar är möjliga (Hjerpe & Krantz, 2006; Mangold *et al.*, 2014). En möjlighet för att minska energianvändningen för varmvatten är att återvinna delar av den värme som går ut via avloppet.

Tillämpningen av värmeåtervinning ur spillvatten är lovande ur ett energiperspektiv men det finns också utmaningar på systemnivå där motstridiga målsättningar tidigare inte fullt ut har undersökts. Om värmeåtervinningen resulterar i en lägre inloppstemperatur för avloppsvattnet till reningsverket kan det leda till försämrad rening och ökade utsläpp – framförallt av kväve – till recipienten samt till ökade driftskostnader avseende energi och kemikalier. Energianvändningen för varmvatten är vidare starkt integrerad med energisystemet i stort och det är därigenom inte trivialt att avgöra hur förändrad användning påverkar systemet i ett vidare perspektiv.

1.1 Syfte och mål

Syftet med projektet har varit att bidra till ökad kunskap om värmeåtervinning ur avloppsvatten och hur det påverkar avloppsvattenreningen. Idag är värmeåtervinning i praktiken förbjudet eller kraftigt begränsat på fastighetsnivå i många städer genom skrivningar i Allmänna bestämmelser för VA-anläggning (ABVA). Bättre förståelse av värmeåtervinningens systempåverkan krävs för att avgöra hur, eller om, detta bör regleras utan att begränsa en stor potential för energieffektivisering i onödan.

För att uppnå syftet med projektet har målet varit att:

- beskriva kunskapsläget avseende värmeåtervinning ur avloppsvatten, speciellt med hänsyn till svenska förhållanden,
- genomföra en systemanalys av olika möjligheter för värmeåtervinning ur kommunalt avloppsvatten.

1.2 Projektets bidrag till FN:s hållbarhetsmål

År 2015 enades 193 länder inom Förenta Nationerna om en resolution för hållbar utveckling – Agenda 2030 (United Nations, 2015). Denna ambitiösa agenda sätter upp 17

globala hållbarhetsmål för att uppnå social, miljömässig och ekonomisk hållbarhet till 2030. För de 17 målen har 169 mätbara delmål definierats med tillhörande indikatorer eller nyckeltal för uppföljning. Att uppfylla de 17 målen till 2030 är en global utmaning, också för ekonomiskt högt utvecklade länder som Sverige.

Projektets resultat kan potentiellt påverka sju indikatorer inom fyra av 17 mål i positiv riktning. Indikatorerna är inte översatta till svenska inom arbetet med de globala målen, se <https://www.globalamalen.se>.

Mål 6 – Rent vatten och sanitet för alla

6.3.1 Proportion of wastewater safely treated

6.3.2 Proportion of bodies of water with good ambient water quality

Mål 7 – Hållbar energi för alla

7.1.2 Proportion of population with primary reliance on clean fuels and technology

7.3.1 Energy intensity measured in terms of primary energy and GDP

Mål 9 – Hållbar industri, innovationer och infrastruktur

9.4.1 CO₂ emission per unit of value added

9.5.1 Research and development expenditure as a proportion of GDP

Mål 14 – Hav och marina resurser

14.1.1 Index of coastal eutrophication and floating plastic debris density

1.3 Avgränsningar

Projektets ursprungliga målsättningar innefattade att göra en vidare hållbarhetsanalys inkluderande bl.a. brukaraspekter och att jämföra olika alternativ med multikriterieanalys. Detta delmål har inte uppnåtts. En vidare livscykelanalys, specifik utvärdering av alternativen för använd värme, kvalitativ analys av brukaraspekter och en bredare ekonomisk analys av alternativen skulle behöva genomföras för att möjliggöra hållbarhetsanalysen. Systemanalysen som presenteras utgör ett detaljerat underlag till stöd för att utvärdera de tekniska aspekterna av värmeåtervinning ur avlopp i olika positioner. Med det syftet kan fallspecifika simuleringar med den utvecklade integrerade modellen användas som ett delunderlag för beslut om värmeåtervinning.

I projektet har huvudsakligen värme i avlopp från hushåll beaktats och för värmeåtervinning på fastighetsnivå endast flerfamiljshus. Återvinnig av spillvärme från industriella processer kan vara av stort intresse och relevans och tillämpas också frekvent. Inte minst kan industriella spillvatten vara för varma och behöva kylas före utsläpp till recipient eller kommunalt avloppsnät. Detta har inte ingått i projektet utan endast värmeåtervinning från lägenheter och flerfamiljshus har beaktats.

Andra källor eller strömmar för spillvärme än kommunalt avloppsvatten har inte beaktats i projektet.

På avloppsreningsverk (ARV) har endast värmeåtervinning på renat avloppsvatten i huvudströmmen beaktats även om andra möjligheter finns och används, t.ex. ur uppvärmt avloppsslam efter rötning.

Vad gäller system för uppvärmning av tappvarmvatten för hushåll har endast fjärrvärme studerats i detalj. En övergripande analys av uppvärmning med el eller annan slags primärenergi finns i litteraturstudien (Arnell *et al.*, 2017).

Livscykelanalys för anläggningar för värmeåtervinning, såsom värmeväxlare och värmepumpar har inte genomförts i projektet.

1.4 Rapportens omfattning och upplägg

Rapporten beskriver frågeställningen och bakgrund om värmeåtervinning ur avloppsvatten med hänvisningar till nyckelreferenser i litteraturen (Kapitel 1 och 2). En mer omfattande genomgång av området finns i den tidigare publicerade litteraturstudien (Arnell *et al.*, 2017). En överblick av den omfattande metodutvecklingen och genomförandet av fallstudierna ges i Kapitel 3 men för en uttömmande metodbeskrivning finns hänvisningar till separata tekniska rapporter och vetenskapliga artiklar som har publicerats inom respektive ämne.

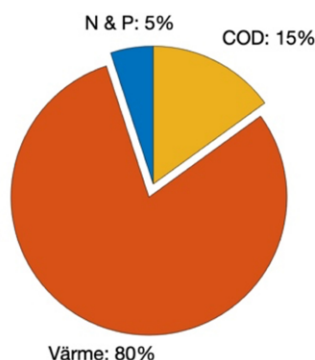
Fokus i rapporten är en samlad presentation och diskussion av projektets resultat (Kapitel 4) och slutsatser (Kapitel 5). Här presenteras resultaten från respektive del av systemet samt de integrerade resultaten från systemövergripande studier. Slutligen ges förslag på möjlig framtida forskning (Kapitel 6).

2 Bakgrund om värmeåtervinning ur spillvatten

Svenska hushåll i flerbostadshus använder i genomsnitt 7 500 kWh energi per person och år, varav 80 % är värme och resten el (Energimyndigheten, 2007, 2020). Inte minst är energianvändningen för uppvärmning av vatten betydande (tappvarmvatten, disk- och tvätt etc.). Uppskattningar visar att 780 till 1 150 kWh per person och år används i svenska hushåll i form av varmvatten (Swedish Energy Agency, 2009). Uppvärmning av vatten hos slutanvändarna utgör därmed lejonparten av den totala energianvändningen i den urbana vattencykeln; upp till 90 % räknat från uttag av råvatten via produktion och distribution av dricksvatten samt insamling och rening av avloppsvatten till utsläpp till recipient (Olsson, 2012). Denna energi går huvudsakligen förlorad genom värmeförluster i byggnader, avloppssystem (ledningsnät, pumpstationer och reningsverk) och slutligen till recipienten om inga insatser görs för att återvinna den längs vägen.

2.1 Avloppsvattnets energiinnehåll och temperatur

Avloppsvatten har historiskt betraktats som ett avfall som behöver hanteras för att skydda människors hälsa och miljön mot skadliga utsläpp. Forskning och utveckling har under de senaste decennierna visat på möjligheten att utvinna resurser för vidare användning ur avloppsvatten, såsom näringsämnen, renat vatten och energi. Energi föreligger både som värme och kemiskt bunden energi i avloppsvattnet. Den kemiskt bundna energin utgörs framförallt av organiskt material – mätt som kemiskt syreförbrukande ämnen, COD – och kemiska föreningar av fosfor och kväve. Figur 2.1 visar på förhållandet mellan dessa energislag i inkommande avloppsvatten till reningsverket (Larsen, 2015). Av det totala energiinnehållet utgör värmen 80 %. Även om COD kan återvinnas som högvärdig energi i form av t.ex. biogas så illustrerar Figur 2.1 tydligt att potentialen för värmeåtervinning är mycket stor.



Figur 2.1

Energiinnehållet i kommunalt avloppsvatten fördelat på värme och kemiskt bunden energi i form av organiskt material (COD) och näringsämnen, kväve (N) och fosfor (P) (Larsen, 2015).

När spillvattnet lämnar en bostadsfastighet har det en temperatur på 20–25 °C (Jonsson *et al.*, 2020; Wärff *et al.*, 2020b) och när det når reningsverket har det (vid nordiska förhållanden) sjunkit till ca. 8 till 12 °C vintertid och 15 till 20 °C sommartid (Henze *et al.*, 2002). Det saknas i betydande utsträckning kunskap om temperatur och förändring av denna i ledningsnätet även om begränsade mätningar och studier har utförts (Dürrenmatt & Wanner, 2008; Abdel-Aal *et al.*, 2014; Cipolla & Maglionico, 2014; Golzar *et al.*, 2020). Inloppstemperaturen till reningsverket varierar med årstiderna och över

dygnet. Skillnaderna mellan olika reningsverk är stor beroende på kallvattentemperatur (grundvatten eller ytvatten), ledningsnätets funktion, storlek och status samt klimat (väder, snösmältning etc.). Tillskottsvatten i form av dagvatten och inläckage har visat sig sänka temperaturen på avloppsvattnet påtagligt (Panasiuk *et al.*, 2019).

Tillgänglig forskning som har identifierats i projektets litteraturstudie har inte kunnat ge svar på frågan hur stor påverkan värmeåtervinning uppströms reningsverket har på inloppstemperaturen med hänsyn till värmeförluster och tillskottsvatten i ledningsnätet. Det finns ett behov av att göra en systemövergripande hållbarhetsanalys som analyserar effekten av värmeåtervinning på olika delsystem samt ger en samlad bedömning av konsekvens och nytta med denna praxis.

2.2 Alternativ för värmeåtervinning

Återvinning av värme ur avloppsvatten är välkänt och välbeprövat (Arnell *et al.*, 2017). Dock har tekniken inte fått något stort genomslag i Sverige. Här finns endast ett fåtal dokumenterade installationer i fastigheter (Blomsterberg, 2015; Jonsson *et al.*, 2020) och i avloppssystemet i stort, framförallt vid reningsverken på renat utgående avloppsvatten (Lingsten & Lundkvist, 2008).

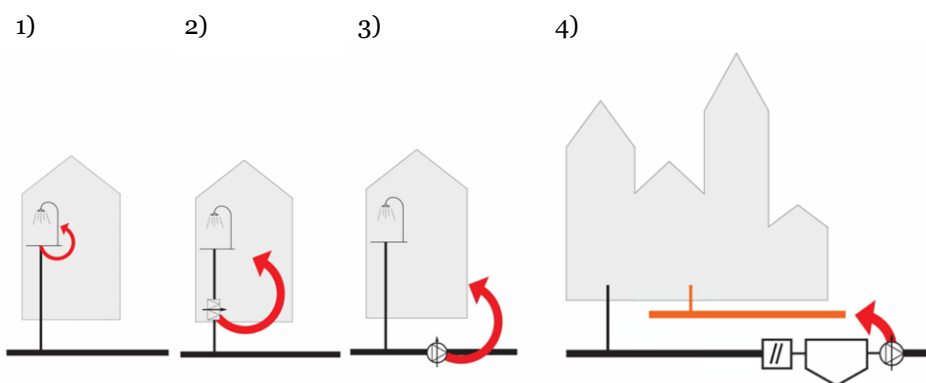
Värmeåtervinning från spillvatten kan utföras med olika typer av utrustning och i olika positioner. Vidare kan den återvunna energin nyttiggöras för olika ändamål. Principiellt kan värmeåtervinning göras i fyra olika positioner (Pos. 1, 2, 3 och 4) i systemet från fastigheten där det uppkommer till när det renade vattnet lämnar reningsverket (Figur 2.2).

Position 1 – På komponentnivå, t.ex. i duschar och disk- eller tvättmaskiner.

Position 2 – På fastighetsnivå, d.v.s. ur det samlade avloppsvattnet (eller separerat gråvatten) från en fastighet.

Position 3 – I ledningsnätet på kvarters- eller stadsdelsnivå.

Position 4 – Vid avloppsreningsverket på samlat renat avloppsvatten före utsläpp till recipient.



Figur 2.2

Principiella positioner för värmeåtervinning i avloppssystemet.

De två huvudsakliga teknologier som tillämpas är värmeväxlare (VVX), där det varma avloppsvattnet växlas mot ett kallare medium, samt värmepumpar (HP) där den lågvärdiga värmen med en insats av elenergi kan temperaturhöjas för mer högvärdiga ändamål. Något förenklat kan det sägas att enbart värmeväxlare är vanligast i Pos. 1 och 2 där flödet är lägre och varierar mer medan värmepumpar används mer nedströms i Pos. 3 och 4 där det samlade flödet är högre och mer konstant (mindre varierande). Exempel

på värmepumpar finns också i större fastighetskomplex (Pos. 2) (Cecconet *et al.*, 2020) och på värmväxlare i ledningsnät (Pos. 3) (Hepbasli *et al.*, 2014) även om det är mindre vanligt till dags dato. Kombinationer av värmväxlare och värmepumpar är också vanliga för att skydda den känsliga kondensatorn i värmepumpen från smutsigt avloppsvatten.

Omfattande litteraturstudier har genomförts som beskriver teknologin för värmeåtervinning och ger exempel på tillämpningar och data från verkliga exempel, se Arnell *et al.* (2017).

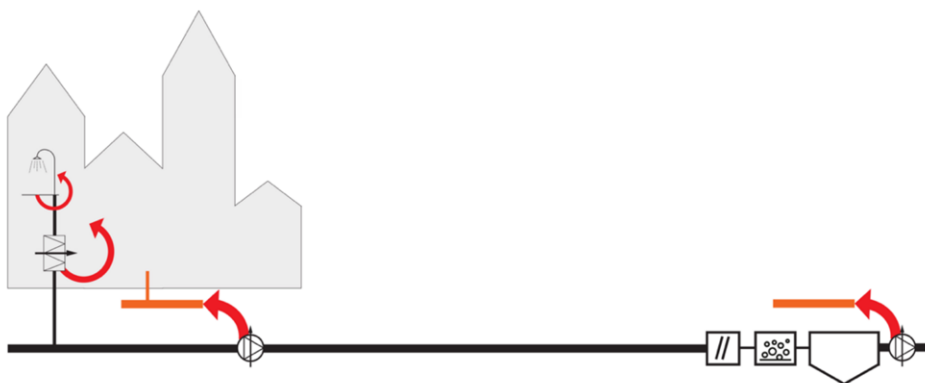
2.3 Temperaturen påverkan på avloppssystemet

Temperaturen på avloppsvattnet påverkar avloppssystemet på flera sätt. Många mekaniska, kemiska och biologiska processer är temperaturberoende. Avloppsledningsnätets avsedda funktion är enbart att transportera avloppsvattnet till reningsverket för vidare behandling och utsläpp men flera processer sker redan här. Det förekommer biologisk aktivitet i ledningar och pumpgropar som bryter ner organiskt material, ibland under syrefria (anaeroba) förhållanden, vilket leder till produktion och utsläpp av svavelväte och metan. Svavelväte är ett problem genom dess korrosiva effekt på t.ex. betong i ledningar och pumpstationer samt att det är giftigt i gasform vid t.ex. pumpstationer. Metan är en växthusgas med 34 gånger större effekt på klimatet än koldioxid (IPCC, 2013). De biologiska reaktionerna är temperaturberoende och går långsammare vid lägre temperaturer. Avloppsvatten innehåller förutom lösta ämnen också partikulärt material, bl.a. fett. Även fettets reologi är temperaturberoende och går mot fast form vid lägre temperaturer. När fettet till större del blir fast tenderar det att fastna i ledningar och pumpstationer vilket skapar igensättning och flödesproblem.

Av huvudsakligen samma orsaker riskerar en lägre inloppstemperatur till avloppsreningsverket att påverka reningsprocesserna på verket och därmed leda till försämrad rening och ökade utsläpp till recipienten, samt till ökade driftskostnader avseende energi och kemikalier. Avloppsrening sker genom mekaniska (sedimentering, filtrering etc.), kemiska (fällning) och biologiska (aeroba, anoxiska och anaeroba) processer. Även om kemiska reaktioner, som t.ex. kemisk fällning, är temperaturberoende är det huvudsakligen de biologiska reningsprocesserna som påverkas av lägre vattentemperatur. Biologiska processer i aktivt slam eller biofilmsprocesser av olika slag och konfigurationer är normalt ett av huvudstegen inom avloppsrening, vilka bryter ner, binder in och avskiljer löst organiskt material och näringsämnen (N och P). Den biologiska avskiljningen av kväve med omvandling av ammonium genom nitrifikation är speciellt känslig för låga temperaturer. Vid 10 °C är nitrifikationshastigheten mindre än hälften så hög som vid 20 °C (Henze *et al.*, 2002). Det gör att en sänkning av vattentemperaturen leder till försämrad kväverening och högre utsläpp, alternativt till att reningsverken behöver större biologiska reningssteg med längre uppehållstid för att uppnå samma reningsgrad. Den största risken föreligger vintertid då temperaturen redan är låg och en sänkning, under vad anläggningen är designad för, riskerar att slå ut nitrifierande mikroorganismer helt. Förändrad temperatur och process påverkar i sin tur också driften av reningsverket där luftning, pumpning och kemikaliedosering kan behöva förändras (minska eller öka) beroende på reningsverkets konfiguration. Ofta finns motstridiga målsättningar där avvägningar behöver göras (Arnell, 2016).

3 Systemanalys

Med målsättningen att analysera värmeåtervinning ur avloppsvatten, dess påverkan på vattentemperaturen och avloppsreningsverkets prestanda har en systemövergripande modell satts upp för analys av olika scenarier. Avloppssystemet som modellerats omfattar generering av avloppsvatten i fastigheter, energibalans i ledningsnätet, reningsprocesser och energibalans på avloppsreningsverket samt olika alternativ för energiåtervinning från Position 1 till 4 (Figur 3.1).



Figur 3.1

Illustration över systemet som ingår i systemanalysen, från fastighet till recipient.

De generiska delmodellerna har kombinerats på olika sätt i tre fallstudier för avloppssystemen i Linköping (Nykvarns ARV), Malmö (Sjölunda ARV) och Lidingö (Käppalaverket).

3.1 Temperatur i hushållsspillvatten

En stokastisk modell (modell med slumpmässiga inslag) har utvecklats för att simulera flöde, sammansättning och temperatur för hushållsspillvatten från flerfamiljshus. Modellen inkluderar vanliga användningsområden för vatten i hushåll: dusch, bad, disk, tvätt, toalett och handfat. De stokastiska ekvationerna kombinerar dagliga användningsmönster/-profiler för de olika användningsområdena med data för flöden, belastning och temperatur per användning (genomsnitt och normalfördelad variation). Dataunderlag för respektive användningsområde inkluderar:

- Vattenvolym per användning,
- Frekvens per dag för användning,
- Medelvärde och standardavvikelse för flöde på genererat spillvattenflöde,
- Medelvärde och standardavvikelse för temperatur på genererat spillvattenflöde,
- Medelvärde och standardavvikelse för varaktigheten av användningen,
- Föroreningsbelastning per användning av organiskt material (COD löst och COD partikulärt), ammoniumkväve ($\text{NH}_4\text{-N}$), totalt Kjeldahlkväve (TKN) och totalfosfor (TP),
- Medelvärde och standardavvikelse för fördelningen av användning under dagen, separat för vardagar och helgdagar. Dagarna delas in i fyra perioder som kombineras för att få en daglig profil (eng. probability density function, PDF).

Som indata till modellen behövs också följande variabler beroende på scenario: antal personekvivalenter (pe, fysiska personer), antal dagar att simulera, kallvattentemperatur och temperatur för tappvarmvatten.

Modellen kombinerar flödes-, belastnings- och temperaturdata med de genererade fördelningsprofilerna (PDF:er) för varje användningsområde och person till en

sammanlagd spillvattenström för samtliga pe. Utdata vid simuleringar är dynamiska (tidsvariabla). Resultatvariabler från modellen är flöde och temperatur för varje användningsområde liksom föroreningsbelastning. Värmeförlust i byggnaden fram till markförlagda ledningar beräknas med en empirisk funktion (Sitzenfrei *et al.*, 2017).

Modellen beskrivs utförligt i en separat teknisk rapport och en vetenskaplig artikel (Wärff, 2020; Wärff *et al.*, 2020b).

3.2 Energibalans i avloppsledningsnät och avloppsreningsverk

3.2.1 Ledningsnät

För att kunna simulera temperaturförändringarna på avloppsvatten genom ledningsnätet (från fastighet till reningsverk) har en endimensionell energibalansmodell tagits fram. Energibalansen inkluderar de huvudsakliga källorna och sänkorna för energi såsom konduktion, konvektion och biologisk värmeutveckling. Modellen har utvecklats i två steg för olika syften.

Mekanistisk modell – Följande processer för värmeöverföring har inkluderats i energibalansen: luft (i självfallsledningar) – vatten, vatten – rörvägg, och rörvägg – omgivande mark. Separata temperaturvariabler ingår för rörvägg och avloppsvatten. Vattenflödet i ledningen modelleras med en kinematisk vågapproximation (Saint-Venant, 1870).

Konceptuell modell – I denna förenklade modell har alla värmeöverföringsprocesser slagits samman till en där värmeöverföringen modelleras som en funktion av vattenflödet med en Monod-funktion (Monod, 1949). Drivkraften är temperaturskillnaden mellan å ena sidan avloppsvatten å andra sidan mark och luft. Vattenflödet i ledningen modelleras som reservoarer i serie.

Båda modellerna kan användas på såväl självfalls- som tryckavloppsledningar. Den mekanistiska modellen kräver detaljerad information om ledningssträckan (material, lutningar etc.) medan den konceptuella modellen kan användas med betydligt mindre indata.

Se Saagi *et al.* (2021) för en utförlig beskrivning och jämförelse av ledningsnätsmodellerna och dess avgränsningar.

3.2.2 Avloppsreningsverk

Avloppsreningsverkets hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska reningsprocesser modelleras med traditionella processmodeller för avloppsreningsverk (Gernaey *et al.*, 2014; Wärff *et al.*, 2020a). Med dessa modeller simuleras reningsprestanda och driftförutsättningar i detalj i dynamiska eller statiska scenarier. Modellekvationerna är temperaturkorrigerade så att t.ex. kvävereningens effektivitet som funktion av vattentemperaturen fångas i simuleringarna.

Ekvationer för energiöverföring har lagts till i samtliga delprocesser i reningsverksmodellen Benchmark Simulation Model No. 2 (t.ex. försedimentering, aktivt slamsteg etc.) (Gernaey *et al.*, 2014) samt i förekommande fall i de fallstudier som genomförts i projektet. Nettoenergiflödet beräknas som summan av solinstrålning, atmosfärisk strålning, konduktion och konvektion, avdunstning, luftning, värmeöverföring (latent och sensibel) samt värme från biologiska reaktioner. Modellerna har anpassats för att klara stora variationer i klimat och temperatur som passar för att kunna simulera årstidsvariationer i nordiska förhållanden.

Modellen kräver, förutom de sedvanliga data på inkommande vatten och reningsverkets design och drift, också data för ett antal meteorologiska variabler, lufttemperatur,

solinstrålning, vindhastighet och luftfuktighet. Dessa kan hämtas från närbelägna meteorologiska mätstationer eller mätas med en väderstation på plats. Framförallt kan solinstrålning variera mycket lokalt vilket gör det fördelaktigt att mäta på plats på det reningsverk som ska modelleras.

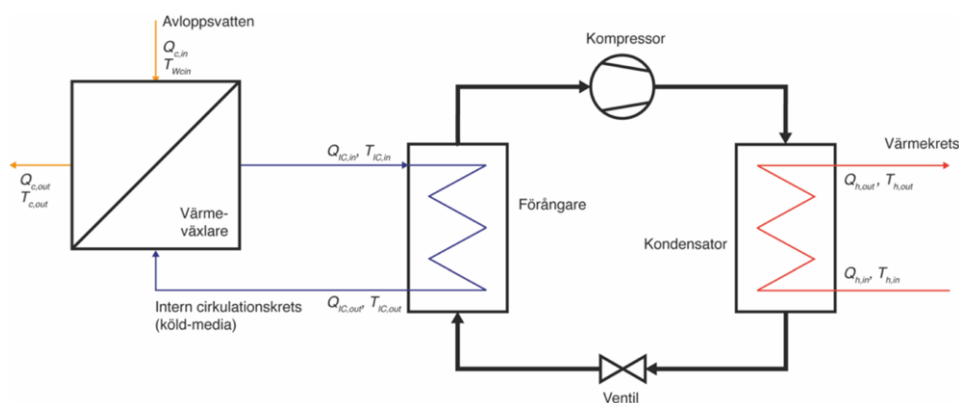
Arnell *et al.* (2021) beskriver modellekvationerna och dess avgränsningar i detalj och hur reningsverket påverkas.

3.3 Värmeväxlare och värmepumpar för återvinning av spillvattenvärme

Eftersom värmeväxlare och värmepumpar används var för sig eller i kombination för värmeåtervinning ur avloppsvatten har modeller för dessa implementerats och testats.

Värmeväxlare – Värmeväxlare finns i en mängd utföranden för olika ändamål. För avloppsvatten är det prioriterat att undvika igensättning på sidan för avloppsvattnet varför utformningar som medger lågt motstånd och liten risk för påbyggnad eller påväxt normalt används. Exempel är stående eller liggande rörvärmeväxlare med en passage, d.v.s. ett avloppsrör med värmeöverföring till ett kallare medium i en mantel. Motströmsvärmeväxlare har modellerats med standardekvationer (Geankoplis, 1993) där temperaturskillnaden mellan det varma vattnet in och det kalla vattnet in ($T_{h,in} - T_{c,in}$) utgör drivkraft och energiöverföringen begränsas av värmekapaciteten hos det minsta flödet ($\min(\dot{m} \cdot c_p)_i$) samt av värmeväxlarens effektivitet (ϵ).

Värmepumpar – En värmepump består av en förångare där värme tas upp ur ett svalare media (vid lågt tryck) och efter tryckhöjning med en eldriven kompressor avlämnar denna i en kondensator till en varmare krets. För installationer på avloppsvatten skyddas ofta förångaren mot smuts genom att en värmeväxlare först överför spillvattenvärmen till en intern krets med något rent medium (vatten eller saltlösning) som drivs med mycket låg temperatur ut från förångaren och in till värmeväxlaren (Figur 3.2). Värmeöverföringen i kondensatorn till det varma mediet drivs av det arbete som sätts in genom el till kompressorn (P_{HP}) och begränsas av värmepumpens verkningsgrad som anges som värmefaktor (COP). Värmefaktorn påverkas i sin tur av bl.a. temperaturskillnaden från förångaren till kondensatorn. Ju varmare avloppsvattnet är i förhållande till den nyttiga temperatur man väljer i kondensatorn desto högre COP. Värmepumpar har modellerats enl. Figur 3.2 med standardekvationer (Geankoplis, 1993).



Figur 3.2

Principiell skiss för en värmepumpsinstallation på avloppsvatten där värmepumpens förångare skyddas av en värmeväxlare.

Vid design av en värmepumpsinstallation finns många val och frihetsgrader som påverkar prestandan. Valet av värmesänka, det vill säga flöde och temperaturer ($T_{h,in}$ och $T_{h,ut}$) i kondensatorn styr till stor del pumpens design, COP och det leder till

vilken temperaturskillnad som är möjlig i förångaren och sedermera värmeväxlaren beroende på spillvattenflöde och dess ingångstemperatur. Om värmen ska höjas till exempelvis 60-80 °C blir resultatet ett helt annat än om mer lågvärdiga ändamål kring 40-50 °C kan användas. Det finns alltså många frihetsgrader vid design av värmepumpinstallationer och sålunda även vid modellering av dessa.

Simuleringar med dessa modeller kräver information om inkommande flöden, vattentemperaturer samt om utrustningens prestanda (ϵ eller COP). För värmepumpar behövs också utgående temperatur på kondensatorsidan.

Implementationen av dessa modeller och kalibrering för tillämpningar på avloppsvatten finns beskrivna i en separat teknisk rapport (Arnell & Saagi, 2020).

3.4 Osäkerhetsanalys

Med tanke på systemets komplexitet och osäkerheten i respektive delmodell så har en rigorös osäkerhetsanalys utförts på hela systemet med Monte Carlo-simuleringar enligt standardiserad metodik (Sin *et al.*, 2009). Ett urval av 22 parametrar gjordes bland indatavärden, modellparametrar etc. som bedömdes osäkra och ha stor påverkan på resultaten (se Bilaga A). Designvariabler för VVX och HP har inkluderats då de är fall-specifika vilket är svårt att simulera på en systemövergripande nivå; alla parametrarna för energibalansen i ledningsnätet har tagits med eftersom den delmodellen är relativt oprövad; marktemperatur ingår då det varit svårt att samla in data för detta och antaganden gjorts i simuleringarna; slutligen har volymer och ytor på reningsbassänger på ARV varierats då dessa har stor påverkan på energibalansen på reningsverket. Varje variabel eller värde har varierats $\pm 25\%$. Denna generella och relativt stora variation har valts för att kunna utvärdera robustheten i simuleringensresultaten generellt.

För simuleringarna har värden för alla variabler i osäkerhetsanalysen genererats medelst modifierad "Latin Hypercube Sampling" (LHS) som tar hänsyn till korrelationer mellan variablerna. Ett jämnt fördelat spann för osäkerheten i varje variabel har antagits. Totalt sett genererades 300 kombinationer (uppsättningar av variabelvärden) för varje scenario varvid Monte Carlo-simuleringar har gjorts för varje uppsättning, totalt 3 000 simuleringar för alla scenarier. Dessa simuleringar har utförts på Lunds universitets superdatorcenter LUNARC (Center for Scientific and Technical Computing at Lund University).

Resultaten från Monte Carlo-simuleringarna utvärderas och visualiseras med grundläggande statistik i box-grafer innehållande medianvärde, 25 och 75 % percentiler, giltiga extremvärden samt eventuella avvikande värden (eng. outliers). För definition av resp. värde se dokumentation för Matlab - boxplot (Mathworks, 2021).

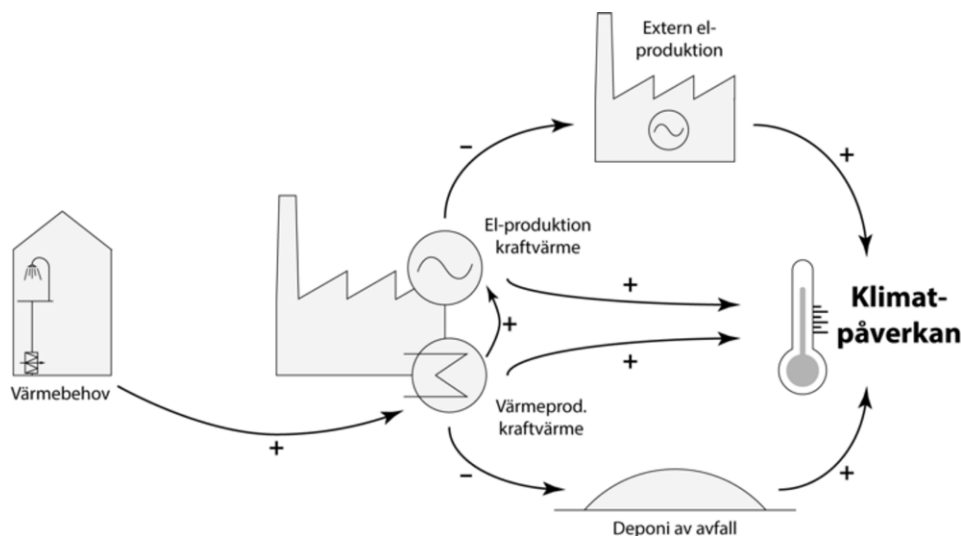
3.5 Påverkan på kraftvärmeproduktion

Återvinning av värme påverkar inte bara värmekällan (avloppsvatten i detta fall) utan också valet av värmesänka får ofta följdverkningar. Återvunnen värme ersätter normalt en annan värmekälla för något befintligt värmebehov. Som beskrivits i bl.a. litteraturstudien påverkar värmesänkan och val och design av utrustning för värmeåtervinning (VVX och HP) resultaten men också den värmeproduktion som återvunnen värme ersätter har betydelse.

Vid värmeåtervinning ur avloppsvatten uppströms reningsverket är det vanligast att värmen används för uppvärmningsändamål i fastigheter. För VVX i Pos. 1, t.ex. duschar, används denna normalt direkt för att förvärma kallvattnet till duschen; för VVX i Pos. 2 förvärms ofta inkommande kallvatten till varmvattenberedning och för HP i Pos. 3 går det i förekommande exempel till uppvärmning av lokaler i närliggande fastigheter.

I Sverige är fjärrvärme det dominerande energislaget för uppvärmning i flerfamiljsfastigheter i större samhällen. För denna studie har det i alla fallen antagits att värmen ersätter fjärrvärme då detta är dominerande i de tre fallstudierna (Avsnitt 3.6). För andra uppvärmningssystem se litteraturstudien (Arnell *et al.*, 2017).

Fjärrvärme kan produceras i renodlade hetvattencentraler eller i kraftvärmeverk med kombinerad el- och värmeproduktion. Enbart värmeproduktion är normalfallet i fjärrvärmenät med mindre underlag, såsom i mindre samhällen, eller spetslastpannor. I städer med större underlag är kraftvärme dominerande. Där kommer det samlade värmebehovet att vara styrande för hur anläggningen kan köras och därmed inte bara hur mycket värme som produceras utan också mängden el. Kraftvärmeproduktion ingår därmed i ett pan-europeiskt energisystem där kompensatorisk elproduktion påverkas liksom alternativ avsättning för de bränslen som används (Figur 3.3).



Figur 3.3

Principiell figur över hur värmebehovet i fastigheter är sammankopplat med energisystemet och dess klimatpåverkan. Pilar markerade med ett plustecken indikerar förstärkande påverkan, d.v.s. att en ökning i den första processen leder till en ökning av den följande. Det omvända gäller för pilar med minustecken, en ökning i den första processen leder till en minskning i den följande.

I systemanalysen har påverkan av värmeåtervinning i Pos. 1 och 2 på energiproduktionen analyserats för fallstudien i Linköping. Tekniska Verken i Linköping använder primärt avfallsbränslen för kraftvärmeproduktion men en mix av produktionsanläggningar och bränslen används för olika driftfall under året (se Bilaga C). Energiproduktionen (el och värme) har simulerats med minskad värmelast enligt Scenario L.P1.I10 till L.P2.I90 (Tabell 3.1) och jämförts med normal värmelast för Linköping utan värmeåtervinning från avloppsvatten. För ändamålet har modellen och metodiken benämnd "Tidsstegen" använts (Gode *et al.*, 2019). Denna modellerar energiproduktionen utifrån ett system av produktionsanläggningar och inkluderar det kompensatoriska systemet för elproduktion men inte för avsättning av bränslen (Figur 3.3). Indata till modellen är värmelast, dygnstemperaturer över året med tillhörande data för bränslemix, produktionsanläggningar och extern elproduktion. Utdata är totala växthusgasutsläpp.

För extern elproduktion som ersätter bortfallet av el från kraftvärme på grund av värmeåtervinning har europeisk marginal-elmix antagits. De specifika växthusgasutsläppen för marginalemixen varierar i simuleringarna över dygn (lägre på natten än på dagen), säsong (lägre på sommaren än på vintern) och år (sjunkande från 2020 till 2040), se Bilaga C (Hagberg *et al.*, 2017). I en scenarioanalys har ett klimatsnålt scenario med snabbare minskning av växthusgasutsläppen för elproduktion från 2020 till 2040 analyserats samt ett klimattungt scenario där det går långsammare.

Fallstudie	Position för värmeåtervinning	Andel med värmeåtervinning utav boende i flerfamiljsfastigheter	Scenario #
Linköping	Pos. 1	10 %	L.P1.I10
		30 %	L.P1.I30
		60 %	L.P1.I60
		90 %	L.P1.I90
	Pos. 2	10 %	L.P2.I10
		30 %	L.P2.I30
		60 %	L.P2.I60
		90 %	L.P2.I90

Tabell 3.1

Sammanställning och indexering av simulerade scenarier med värmeåtervinning för flerfamiljsfastigheter för Linköping.

3.6 Simulerade scenarier

I projektet har fallstudier gjorts för olika alternativ (positioner, indexerade P1 till P4 i respektive scenario) och utbredning (grad av implementation, indexerade I10 till I100 i respektive scenario, där siffran avspeglar andel av totalt antal personer eller flöde med värmeåtervinning) för värmeåtervinning i tre städer: Linköping, Malmö och Lidingö. Med varierande system och tillgång på data har fallstudierna utformats för att svara på olika frågor i relation till projektets övergripande mål. Detaljerna för respektive fallstudie presenteras nedan. En sammanfattning över simulerade scenarier och indexering av dessa redovisas i Tabell 3.1, Tabell 3.3 och Tabell 3.4.

3.6.1 Alternativ för värmeåtervinning

I de simulerade scenarierna har det antagits att värmeåtervinning i fastigheter – Pos. 1 (enbart duschar) och Pos. 2 – görs med värmeväxlare och att återvunnen värme förvärmer inkommande kallvatten till dusch respektive varmvattenberedning. Data för effektiviteten (ϵ) för denna typ av värmeväxlare är inte tillgänglig i stor omfattning. Data från ett mindre antal tester av dylika installationer i labb och fullskala har analyserats och effektiviteten beräknats, se Tabell 3.2.

Tabell 3.2

Effektivitet (ϵ) för värmeväxlare för Position 1 (dusch) och Position 2 (fastighet).

Position	Antal mätningar / studier	Medel	Median	Min	Max	Källa
Pos. 1 – dusch	8	0,52	0,60	0,24	0,69	(McNabola & Shields, 2013): RISE
Pos. 2	5	0,36	0,38	0,1	0,6	(Beentjes et al., 2014; Wallin & Claesson, 2014; Díez Soto, 2015; Wallin, 2017)

Värmeåtervinning med värmepumpar har antagits i ledningsnät (Pos. 3) och på renat avloppsvatten (Pos. 4). En generell design för värmepumpar har antagits baserat på ett realistiskt fall för värmeåtervinning i en huvudavloppsledning vilken använts som mall och skalats om beroende på spillvattenflöde (Arnell & Saagi, 2020). Återvunnen värme antas ersätta värme för uppvärmning av lokaler i fastigheter och ha en framledningstemperatur ($T_{h,ut}$) på 60 °C. En PI-reglering har inkluderats som styr kondensatorflödet ($Q_{h,in}$) mot ett börvärdet på $T_{h,ut}$. Flödet i cirkulationskretsen mellan värmepump och värmeväxlare (Q_{IC}) är fixerat men effekten till kompressorn (P_{HP}) är begränsat för att temperaturen på cirkulationsvätskan ($T_{IC,ut}$) inte ska understiga 0 °C.

3.6.2 Generering av spillvatten och värmeåtervinning i fastighet

Linköping

Flöde, temperatur och sammansättning av spillvattnet från Linköpings 42 579 lägenheter med 78 426 boende (SCB, 2018) har simulerats med den stokastiska modellen för hushållsspillvatten. Som indata användes kallvattentemperaturen för Linköping för år 2017.

Den genererade spillvattenprofilen användes sedan för att simulera värmeåtervinning i fastigheter. I Pos. 1 antogs separat värmeväxling på enbart duschavloppsvatten mot kallvattenflödet till samma duschar. I Pos. 2 antogs värmeväxling på den samlade avloppsstammen mot inkommande kallvatten till varmvattenberedning (momentanflöde) just innan vattnet lämnade byggnaden. I båda positionerna har simuleringar gjorts med värmeåtervinning på 10, 30, 60 och 90 % (I10 till I90) av alla boende i lägenheter. Scenarier L.P1.I10 till L.P2.I90 (Tabell 3.1).

Resultaten har utvärderats avseende avloppsvattentemperatur, energiåtervinning och reducerat effektbehov.

Malmö

På samma sätt som för Linköping har en avloppsvattenström simulerats med modellen för hushållsspillvatten. I Malmö gjordes analysen på ett separat delområde av stadens avloppsledningsnät, Spillepengen (Figur 3.5). Inom området finns 80 000 boende och det utgör 23 % av det totala flödet till reningsverket. Som indata användes kallvattentemperaturen för Malmö för år 2019.

Värmeåtervinning i Pos. 1 och Pos. 2 har simulerats med samma antaganden som för Linköping. Av det totala spillvattnet till Sjölanda avloppsreningsverk har 11 % (I11) respektive 23 % (I23) kunnat simuleras för värmeåtervinning i fastigheter. Scenarier M.P1.I11 till M.P2.I23 (Tabell 3.3).

Simuleringsresultaten har utvärderats avseende avloppsvattentemperatur och energiåtervinning.

Fallstudie	Position för värmeåtervinning	Andel av totalflöde till ARV / Andel av totalt antal personer	Scenario #
Linköping	Pos. 1	13 % / 16 %	L.P1.I13
		32 % / 42 %	L.P1.I32
		60 % / 77 %	L.P1.I60
	Pos. 2	13 % / 16 %	L.P2.I13
		32 % / 42 %	L.P2.I32
		60 % / 77 %	L.P2.I60
	Pos. 3	13 % / 16 %	L.P3.I13
		32 % / 42 %	L.P3.I32
		60 % / 77 %	L.P3.I60
		86 % / 82 %*	L.P3.I86
	Pos. 4	100 % / ET	L.P4.I100
Malmö	Pos. 1	11 % / ET	M.P1.I11
		23 % / ET	M.P1.I23
	Pos. 2	11 % / ET	M.P2.I11
		23 % / ET	M.P2.I23
	Pos. 3	11 % / ET	M.P3.I11
		23 % / ET	M.P3.I23
		73 % / ET	M.P3.I73
		100 % / ET	M.P3.I100
	Pos. 4	100 % / ET	M.P4.I100

* I fall L.P3.86 inkluderas en större andel områden med industriellt avlopp jämfört med fall med mindre implementationsgrad varför andelen av flödet ökar mer än andelen av personer.

Tabell 3.3

Sammanställning och indexering av simulerade scenarier med värmeåtervinning för systemövergripande simuleringar för Linköping och Malmö. ET markerar Ej tillämplig.

3.6.3 Energibalans på ledningsnät

Linköping

En isolerad överföringsledning mellan pumpstationerna Västra Lund och Ginkelösa (2,1 km) har modellerats med den mekanistiska energibalansmodellen för avloppsvattenledningar. De första 200 m är en tryckavloppsledning med en diameter på 225 mm följt av en självfallsledning med en diameter på 400 mm.

Hela ledningsnätet i Linköpings tätort har modellerats med den förenklade konceptuella modellen för att simulera energibalansen och temperaturförändringar på avloppsvattnet från fastigheter till inloppet på avloppsreningsverket med och utan värmeåtervinning i olika positioner. Ledningsnätet i den tätbebyggda delen av Linköping delades in i 34 mindre delområden baserat på ledningsnätets struktur och med hänsyn till knutpunkter på större samlingsledningar (Figur 3.4). Hushållsspillvatten genererades för varje delområde utifrån antalet boende (pe, fysiska personer). Industribelastningen sattes till 20 % av totala flödet baserat på historiska data. Inläckage av grundvatten antogs vara 10 % av spillvattenflödet från hushåll. Endast torrvädersflöde har simulerats.

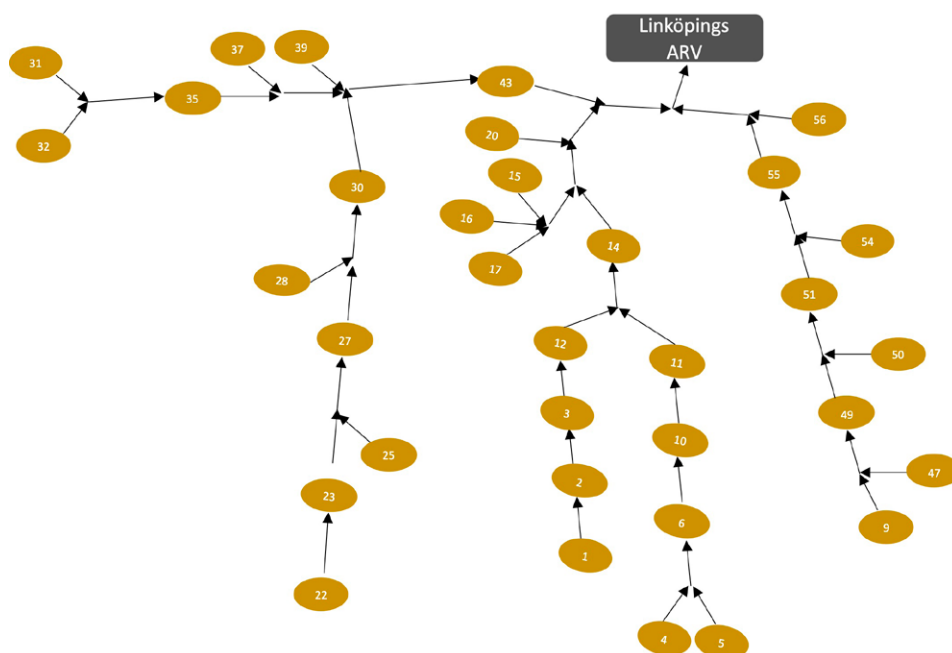
För simulering av värmeåtervinning analyserades storleksfördelningen på delområdena. Det medgav implementationsgraderna 13, 32 och 60 % av reningsverkets totalflöde.

Värmeåtervinning för delområden med enbart boende (ingen industribelastning) simulerades i Pos. 1 och 2 enligt Scenarier L.P1.I13 till L.P2.I60. Detta motsvarar 16, 42 respektive 77 % av det totala antalet personer i hela avrinningsområdet.

Värmeåtervinning i ledningsnätet (Pos. 3) har simulerats med värmepumpar anpassade för flödet i varje delområde (34 olika platser för 100 % av flödet) i ledningsnätet. Den generella värmepumpsmodellen (se Avsnitt 3.6.1) har skalats om för det genomsnittliga

flödet i varje position och det har antagits att värmen kan avsättas i fastigheter i direkt anslutning till varje installation. Scenarier L.P3.I13 till L.P3.I86 (Tabell 3.3).

Simuleringsresultaten har utvärderats avseende avloppsvattentemperatur och energiåtervinning.



Figur 3.4

Indelning av Linköpings avloppsledningsnät i 34 delområden för konceptuell modellering.

Malmö

Malmö ledningsnät är indelat i sex delområden varav fyra rinner till Sjölanda ARV och två till Klagshamns ARV (Figur 3.5). I denna fallstudie har avloppsvattnet till Klagshamns ARV inte ingått. Av de fyra områdena som studerats har Spillepengen minst andel ovidkommande vatten varför det valdes ut för analys av värmeåtervinning och energibalansen i ledningsnätet. Spillepengens ledningsnät delades in i tio mindre delområden. Hushållsspillvatten genererades utifrån antalet boende (pe) i varje delområde. Flödet från den industri som fanns inom området var känt och historiska data (2019) användes som indata till modellen. Inläckage av grundvatten antogs vara 30 % av spillvattenflödet från hushåll. Endast torrvädersflöde har simulerats.

För simulering av värmeåtervinning analyserades storleksfördelningen på delområdena. Det medgav implementationsgraderna 11, 23, 73 och 100 % för fallstudien i Malmö.

Värmeåtervinning i Pos. 1 och 2 simulerades för 11 och 23 % enligt M.P1.I11 till M.P2.I23.

Värmeåtervinning i Pos. 3 simulerades på samma sätt som för Linköping med maximalt fyra flödesanpassade HP-modeller i samlingspunkten (pumpstation) för respektive delområde i ledningsnätet. Scenarier M.P3.I11 till M.P3.I100 (Tabell 3.3).

Simuleringsresultaten har utvärderats avseende avloppsvattentemperatur och energiåtervinning.



Figur 3.5

Övergripande indelning av Malmös avloppsledningsnät. Sjölanda ARV tar emot vatten från Hammen, Turbinen, Rosendal och Spillepengen. Klagshamns ARV tar emot vatten från Limhamn och Klagshamn.

Käppala

Till Käppalaverket leds avloppsvatten från 11 kommuner i norra Stockholmsregionen. Respektive kommun äger och driver ledningsnätet inom sitt område. Avloppsvattnet samlas och leds sedan till Käppalaverket genom ett system av avloppstunnlar som ägs och drivs av Käppalaförbundet.

Tunnelsystemet och sjöledningarna (från Nacka och Värmdö) har modellerats avseende flöde och temperatur med den konceptuella modellen. På grund av bristande tillgång och kvalitet på data för tunnelsystemet har betydande antaganden fått föras gällande temperatur och i viss mån flöde till tunnelsystemet.

I denna rapport fokuseras fallstudien för Käppalaverket på påverkan på reningsverket, se vidare Avsnitt 3.6.4. Hela fallstudien är detaljerat beskriven i en separat teknisk rapport (Saagi & Arnell, 2021).

3.6.4 Energibalans och påverkan på avloppsreningsverk

Linköpings ARV

En reningsverksövergripande processmodell över Linköpings avloppsreningsverk (Figur 3.6a) (Arnell, 2016) har använts för att simulera temperaturförändringarna på reningsverket samt påverkan på rening och drift vid värmeåtervinning uppströms. Modellen omfattar alla betydande reningssteg och processer och inkluderar energibalans (Avsnitt 3.2.2). Modellen har uppdaterats med nya processteg och en förnyad karakterisering av inkommande avloppsvatten samt kalibrering av modellen har genomförts (Arnell *et al.*, 2021).

Simuleringar har körts med inflöde från scenarierna med värmeåtervinning uppströms L.P1.I10 till L.P3.I90 (Tabell 3.1). Därtill har tre simuleringar med konstant reducerad inloppstemperatur testats för att utvärdera effekten av större temperatur-sänkningar (Tabell 3.4):

$$T_{\text{ARV,in-red}} = T_{\text{ARV,in-std}} - i; i = 1, 2, 3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

där $T_{\text{ARV,in-red}}$ är den reducerade inloppstemperaturen till reningsverket och $T_{\text{ARV,in-std}}$ är motsvarande okorrigerad temperatur.

Värmeåtervinning på renat avloppsvatten (Pos. 4) har simulerats på hela flödet med en flödesanpassad HP-modell. $T_{\text{h,ut}}$ har även här antagits till 60 °C och att värmen kan avsättas på ARV eller till ett närliggande fjärrvärmenät utan vidare förluster.

Resultaten har utvärderats avseende energibalans och vattentemperatur genom reningsverket; påverkan på kväverening (nitrifikation och denitrifikation) i de biologiska reningsstegen och utgående vatten; driftparametrar såsom luftning och dosering av extern kolkälla; samt energiåtervinning.

Belastning och reningskrav för reningsverket återfinns i Tabell 3.5.

Fallstudie	Minskning av inloppstemperaturen	Scenario #
Linköping	- 1 °C	LT1
	- 2 °C	LT2
	- 3 °C	LT3
Käppalaverket	- 1 °C	KT1
	- 2 °C	KT2
	- 3 °C	KT3

Tabell 3.4

Sammanställning och indexering av simulerade scenarier för temperatur-sänkning på avloppsreningsverk för Linköping och Käppalaverket.

	Belastning	Reningskrav			
	[pe]	BOD [mg/l]	P-tot [mg/l]	N-tot [mg/l]	NH4-N [mg/l]
Linköpings ARV	216 000	10	0,25	10	2,5 (medel juni-okt)
Käppalaverket	559 000	8	0,3	10	Ej tillämpligt

Tabell 3.5

Belastning och reningskrav (årsmedelvärden om inget annat anges) för reningsverken i fallstudierna för Linköping och Käppala. För Malmö har inte befintligt reningsverk modellerats och gällande villkor är irrelevanta för fallstudien.

Malmö – BSM2

För Malmö har inte en specifik processmodell för Sjölunda ARV använts. Istället har den generella reningsverksmodellen Benchmark Simulation Model No. 2 (BSM2, Figur 3.6b) (Gernaey *et al.*, 2014) anpassats till flöde och belastning och använts för att simulera rening av avloppsvattnet från de fyra delområdena av Malmös avloppsledningsnät. BSM2 har kompletterats med ekvationerna för energibalans (Avsnitt 3.2.2).

Simuleringar har körts med inflöde från scenarierna med värmeåtervinning uppströms M.P1.I11 till M.P3.I86 (Tabell 3.3).

Värmeåtervinning på renat avloppsvatten (Pos. 4) har simulerats på hela flödet med en flödesanpassad HP-modell. $T_{h,hut}$ har även här antagits till 60 °C och att värmen kan avsättas på ARV eller till ett närliggande fjärrvärmenät utan vidare förluster.

Resultaten har utvärderats avseende energibalans och vattentemperatur genom reningsverket; påverkan på kväverening (nitrifikation och denitrifikation) i de biologiska reningsstegen och utgående vatten; driftparametrar såsom luftning och dosering av extern kolkälla; samt energiåtervinning.

Käppalaverket

En reningsverksövergripande processmodell över Käppalaverket (Figur 3.6c) (Arnell, 2016) har använts för att simulera påverkan på rening och drift vid reducerad inloppstemperatur. Modellen har uppdaterats och kalibrerats och en förnyad karakterisering av inkommande avloppsvatten har genomförts. Då verket är överbyggt och därmed inte utsatt för väder och vind har inte energibalanskvationer (Avsnitt 3.2.2) inkluderats i detta fall (även om energitillskottet från de biologiska reaktionerna kan antas höja temperaturen med ca. 1 °C).

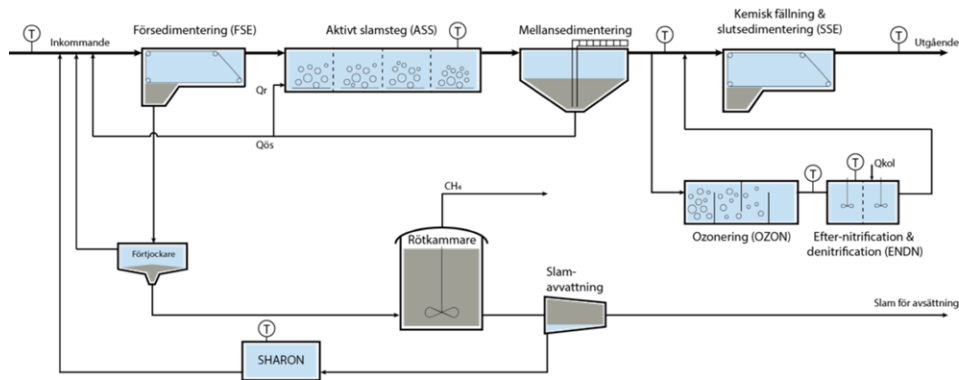
Tre simuleringar har körts med konstant reducerad inloppstemperatur enligt Ekvation (1) för att utvärdera effekten av temperatursänkningar (Tabell 3.4).

Resultaten har utvärderats avseende energibalans och vattentemperatur genom reningsverket; påverkan på kväverening (nitrifikation och denitrifikation) i de biologiska reningsstegen och utgående vatten; driftparametrar såsom luftning och dosering av extern kolkälla; samt energiåtervinning.

Belastning och reningskrav för reningsverket återfinns i Tabell 3.5.

Fallstudien för Käppalaverket är detaljerat beskriven i en separat teknisk rapport (Saagi & Arnell, 2021).

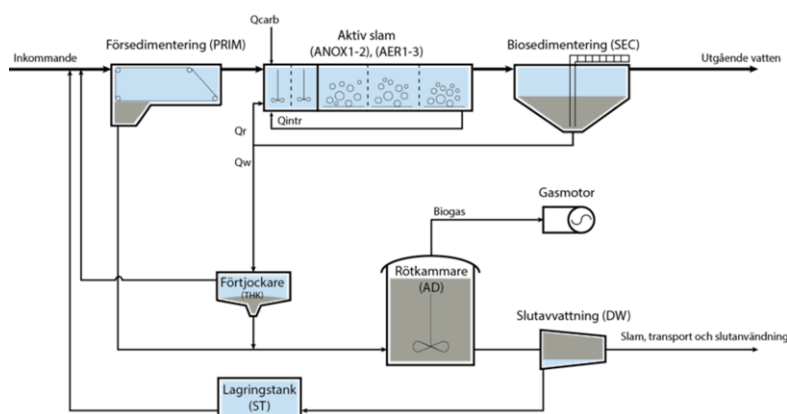
a.



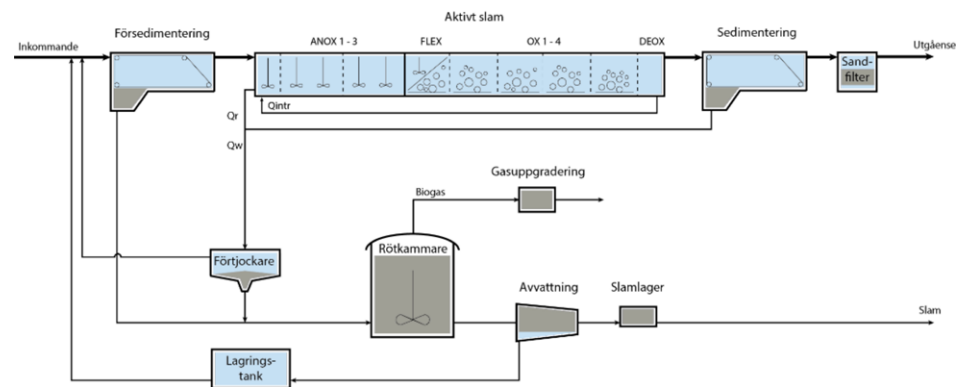
Figur 3.6

Processflödesschema för modellerna av a) Linköpings avloppsreningsverk, b) Benchmark Simulation Model No. 2, och c) Käppala-verket.

b.



c.



3.7 Mätningar och datainsamling

För att testa, kalibrera och validera modellerna som utvecklats, samt för simuleringarna i fallstudierna, har omfattande datainsamling och begränsade mätkampanjer genomförts.

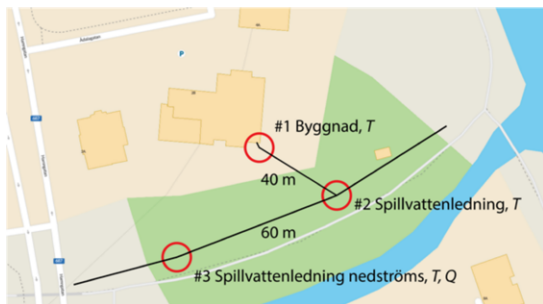
3.7.1 Mätningar av flöde och temperatur på avloppsvatten

Fastighetsnära mätningar i Linköping

Temperatur och flöde har mätts i avloppsledningsnätet i fastighetsnära positioner i centrala Linköping under olika perioder. Figur 3.7a visar ungefärligt läge för mätbrunnarna, avstånden mellan dem och vilka parametrar som mätts i respektive punkt. För mätning av temperatur har sensorer med kapslade termistorer och 10-meters kabel (PB-5015-10M) använts vilka mäter från $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Data har sparats lokalt med logger (Tinytag Plus 2 TGP-4020) (Figur 3.7b). Flöde mättes med nivå/hastighetsmätare (Mainstream OCFM med hastighetssensor: V-prob 3220 och nivåsensor: Keller 48217).

Temperaturdata i läge #1 och #2 mättes under perioden 2018-08-08 – 2019-11-04 med kortare störningar och avbrott på grund av översvämning i brunn #2 och trasig logger i brunn #1. Flöde och temperatur i brunn #3 mättes under perioden 2019-04-09 – 2019-06-10. Denna mätning avslutades efter att flertalet byggnader som belastar ledningen med avloppsvatten var tvungna att utrymmas i början av juni 2019, varefter ytterligare mätningar inte bedömdes meningsfulla.

a.



b.



Figur 3.7.

a) Mätning av temperatur och flöde i fastighetsnära positioner i centrala Linköping.

b) sensor och logger för mätning av temperatur i avloppsbrunnar.

Överföringsledning i Linköping

Mätningar av avloppsvattentemperatur har utförts på en isolerad 2,1 km lång överföringsledning utanför Linköpings tätort mellan pumpstationerna Västra Lund och Ginkelösa. Temperatursensorer och logger av samma typ som beskrivits ovan användes för att mäta temperaturen på avloppsvattnet i respektive pumpstation och i en brunn 200 m nedströms Västra Lund för att mäta lufttemperaturen i ledningen. Flödesdata erhöles från fast monterade flödesmätare ut från vardera pumpstation. Mätningar och datainsamling gjordes under perioden 2018-11-26 – 2018-12-10 och 2019-02-08 – 2019-03-05 för spillvattentemperatur och 2019-02-08 – 2019-03-05 för lufttemperatur i ledningen.

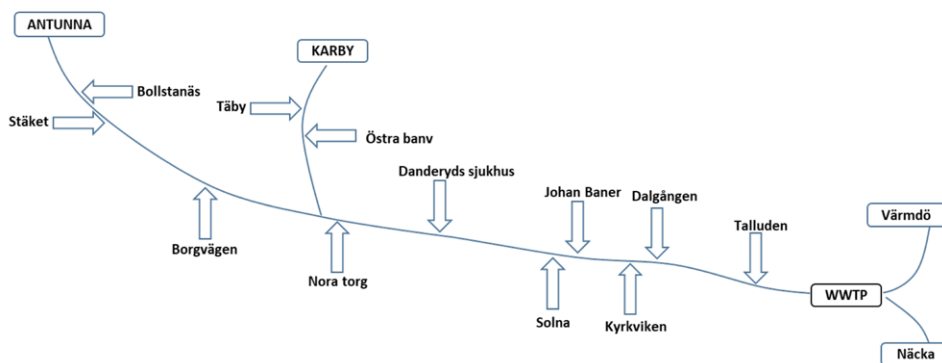
Central huvudledning i Malmö

I Malmö har mätningar utförts på en centralt belägen 1,5 km lång huvudledning. Utrustning för mätning av flöde och temperatur fanns fast monterad i nedströms ände medan temperatursensorer och loggar av samma typ som ovan installerades uppströms för mätning av avloppsvattentemperaturen och lufttemperaturen i ledningen i denna punkt. Mätning och datainsamling gjordes under perioden 2019-03-10 – 2019-03-26 (Reyes, 2019).

Käppalaförbundets tunnelsystem

Mätningar av temperatur och flöde är tillgängliga på flera platser i tunnelsystemet (Figur 3.8) och vid inloppet till reningsverket. Utav de 17 inloppen saknades flödesdata för Solna för den aktuella simuleringsperioden medan 14 inlopp inte hade temperaturdata för januari 2019. För augusti 2019 saknade 13 inloppspunkter temperaturdata. Temperaturdata från Stäket, Täby och Nacka användes på flera platser för att kompensera detta bortfall. För sjöledningarna från Värmdö och Nacka fanns flödesmätningar

nedströms. Detta flöde användes som uppströmsdata för modellen (för tryckavlopp är uppströms och nedströms flödeshastigheter lika). Temperaturdata uppströms och nedströms fanns tillgängligt för ett av de parallella rören i sjöledning från Nacka till reningsverket. Följaktligen används samma temperatur som ingång för alla de tre sjöledningarna. Omgivande vattentemperatur för sjöledningarna sattes till 7 °C vintertid och 10 °C sommartid enl. uppgift från Käppalaförbundet. Givet underlaget är det många anslutningspunkter där temperaturen har antagits vilket bidrar till ökad osäkerhet för denna fallstudie (Saagi & Arnell, 2021).



Figur 3.8

Schematisk bild över Käppalaförbundets tunnelsystem och de anslutningspunkter som inkluderats i modellen. Figur från (Saagi & Arnell, 2021).

3.7.2 Underlag för ledningsnät

För simuleringar med den mekanistiska energibalansmodellen för ledningsnät har flödes- (upp- eller nedströms) och temperaturdata (upp- och nedströms) mätts och samlats in tillsammans med lufttemperaturen i ledningsnätet. Då data för marktemperatur saknats har denna antagits och justerats för kalibrering. För flödesmodelleringen krävs längd, diameter och lutning på ledningen.

Den konceptuella modellen kräver mindre data i färre punkter. Det urbana avrinningsområdets finmaskiga delar (med mindre ledningsdimensioner) delades in i mindre delområden med känt antal personer per område och en spillvattenprofil genererades per område (Avsnitt 3.1). Information om större ledningar från och mellan delområdena ner till reningsverket inhämtades liksom flöde, temperatur och belastning för det samlade inkommande vattnet till reningsverket. Tillskottsvatten och industribelastning uppskattades baserat på tidigare årsgenomsnitt då realtidsdata saknades. Temperaturerna på dricksvattnet och inkommande spillvatten till verket användes för validering. Marktemperaturen för ett år på 0-10 m djup modellerades med en förenklad hydraulisk markmodell (Hydrus 1D, Version 4, PC Process, Prag, Tjeckien). Till denna anpassades sedan en sinus-funktion vilken användes som indata till simuleringarna för de avrinningsområdesvisa simuleringarna i Linköping och Malmö.

3.7.3 Datainsamling och mätningar av temperatur och meteorologiska data på avloppsreningsverk

Linköping

För kalibrering och validering av processmodellen för Linköpings ARV har en stor mängd data samlats in och mätts på inkommande avloppsvatten, koncentrationer och flöden i olika positioner på verket liksom utgående vatten. Även anläggningsdata såsom volymer och areor för bassänger, data på maskinutrustning och styr- och reglerkretsar har använts för att sätta upp modellen.

Insamling av meteorologiska data till energibalansmodellen för avloppsreningsverket i Linköping har gjorts med en för ändamålet installerad väderstation (Davis Instruments

Vantage Pro2™, #6162-EU). Väderstationen mäter lufttemperatur, luftfuktighet, nederbörd, vindhastighet, vindriktning, solinstrålning och UV-ljus. En mängd sekundära variabler beräknas utifrån dessa. Mätningar gjordes under perioden 2019-04-29 – 2020-04-29 med kortare bortfall på grund av full logger under sommaren 2019. Luckor i dessa dataserier har kompletterats med mätdata från SMHI:s närbelägna stationer Malmslätt (i Linköping) och Norrköping.



Figur 3.9

Väderstation Davis Instruments Vantage Pro2 för mätning av meteorologiska data på Linköpings avloppsreningsverk 3 maj 2019. Vindmätaren syns inte på bilden. I bakgrunden syns mellansedimenteringsbassängerna samt Tekniska Verken i Linköpings laboratorium.

Insamling av temperaturdata för perioden 2019-04-29 – 2020-04-29 har gjorts från reningsverkets SCADA-system på inkommande vatten, i aktivt slamstegen samt i MBBR-bassängerna nära utgående utsläppspunkt. Därutöver har kortare perioder av temperaturdata mätts med samma fältutrustning som tidigare beskrivits efter mellansedimentering, före och efter ozonanläggningen samt på utgående renat vatten under augusti till september 2019. Dessa extra mätningar var behäftade med problem då dataloggrarna inte hade tillförlitlig funktion vid montage utomhus. Värdena har använts för jämförelser men inte för den analys som presenteras i resultaten.

Malmö

Meteorologiska indata för Malmö har hämtats från SHMI:s närbelägna mätplatser.

Käppalaverket

För kalibrering och validering av processmodellen för Käppalaverket har en stor mängd data samlats in och mätts på inkommande avloppsvatten, koncentrationer och flöden i olika positioner på verket liksom utgående vatten. Käppalaförbundet har utfört extra provtagning och analys för kalibrering och validering av modellen. Även anläggningsdata såsom volymer och areor för bassänger, data på maskinutrustning och styr- och reglerkretsar har använts för att sätta upp modellen.

4 Resultat och diskussion

4.1 Avloppsvattentemperatur

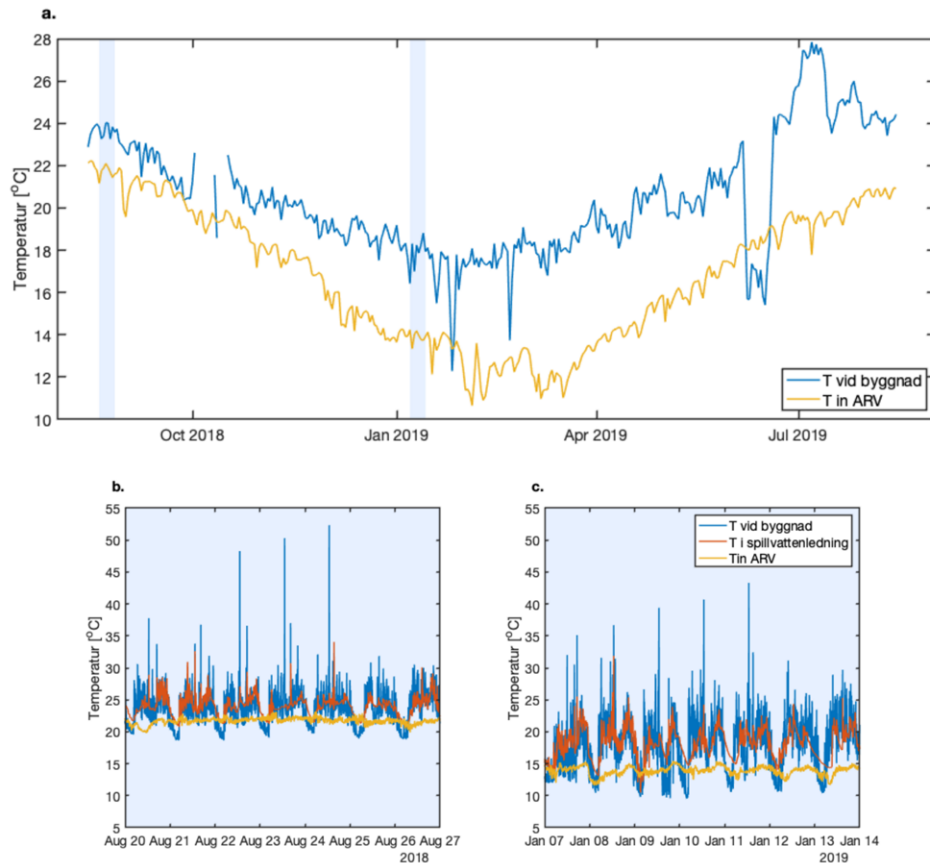
4.1.1 Fastighetsnära mätningar och jämförelse vid reningsverk

Mätningarna i Linköping (Tabell 4.1, Figur 4.1) visar att avloppsvattentemperaturen i direkt anslutning till byggnaden är i genomsnitt 20,6 °C. Det samlade inkommande vattnet till reningsverket har en genomsnittlig temperatur på 16,7 °C. Om man studerar mätdata (momentanvärden med 6-minuters mätintervall) i Figur 4.1b,c kan man se att variationen är mycket stor direkt vid byggnaden men att viss utjämning sker redan kort nedströms i samlingsledningar (mätpunkt efter ca 40 meter, se Figur 3.7a). På inkommande till reningsverket är temperaturen lägre och variationerna relativt sett mycket mindre. Att spillvattentemperaturen ut från byggnaden varierar över året förklaras till stor del av att Linköping tar sitt dricksvatten från ytvattentäkter vilket ger en varierande kallvattentemperatur.

Tabell 4.1

Resultat från temperaturmätningar på avloppsvatten i Linköping.

	Årsmedel 1 okt 2018 - 30 sep 2019 T °C – Medel [min/max]	Sommar 1 juni - 30 sep 2019 T °C – Medel [min/max]	Vinter 1 jan-31 mars 2019 T °C – Medel [min/max]
Byggnad	20,6 [6,2/54,8]	24,4 [17,2/53,7]	17,8 [7,4/51,2]
Samplingsledning i anslutning till byggnad	20,9 [10,5/46,7]	23,2 [18,3/46,3]	18,0 [10,5/31,9]
Reningsverk	16,7 [8,0/23,0]	20,3 [15,0/23,0]	12,8 [8,0/15,6]

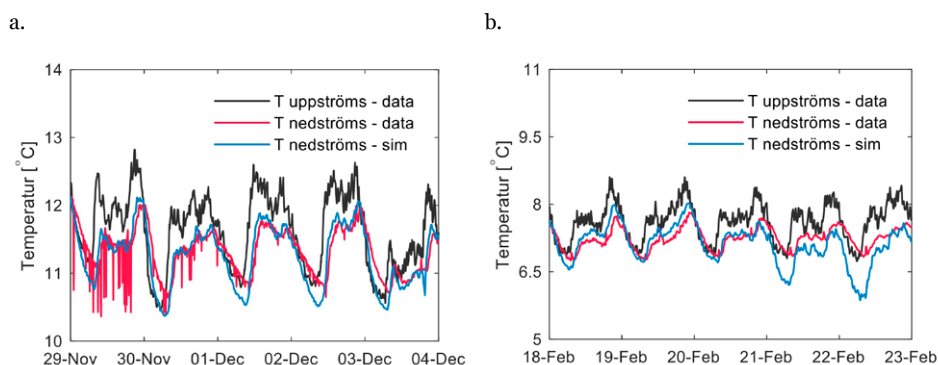


Figur 4.1

Uppmätt avloppsvattentemperatur i Linköping. Dygnsmedelvärden (a) och momentanvärden för en vecka sommar (b) respektive vinter (c). Den tydliga temperatursänkningen vid byggnaden i början av juni 2019 (se delfigur a) beror på att byggnaden tillfälligt fick utrymmas och inget vatten konsumerades.

4.1.2 Temperaturmätningar på överföringsledning

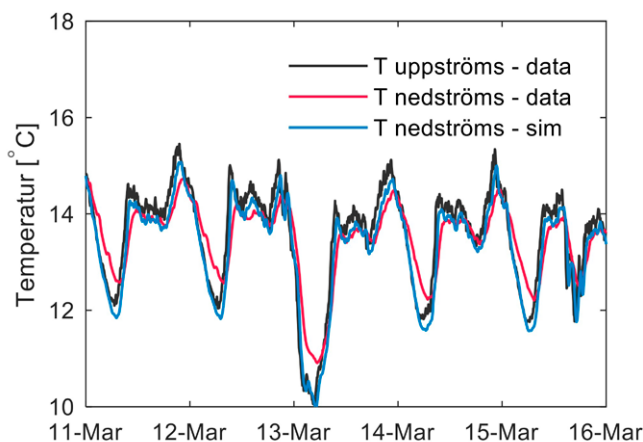
Temperaturmätningarna på en 2,1 km lång sträcka av en överföringsledning i Linköping (Figur 4.2) visar att trots låga temperaturer redan uppströms pumpstationen så sjunker temperaturen ytterligare i ledningen. I genomsnitt sjunker temperaturen med 0,30 °C för första mätperioden och 0,36 °C för den andra. Det är en tydlig indikation på att trots att mycket energi går förlorad i de mer fastighetsnära delarna av ledningsnätet, där temperaturskillnaden mellan vatten och omgivning (mark och luft) är större, så fortgår förloppet även vid lägre temperaturer. Även vid så pass låga temperaturer som kring 7 °C, vilket är lägre än temperaturen på det samlade inloppet till reningsverket (Figur 4.1a).



Figur 4.2

Uppmätt avloppsvattentemperatur (uppströms och nedströms) jämfört med modellerad temperatur (nedströms) för en överföringsledning på 2,1 km i Linköping för två olika mätperioder på 5 dagar – a) nov-dec 2017 och b) feb 2018.

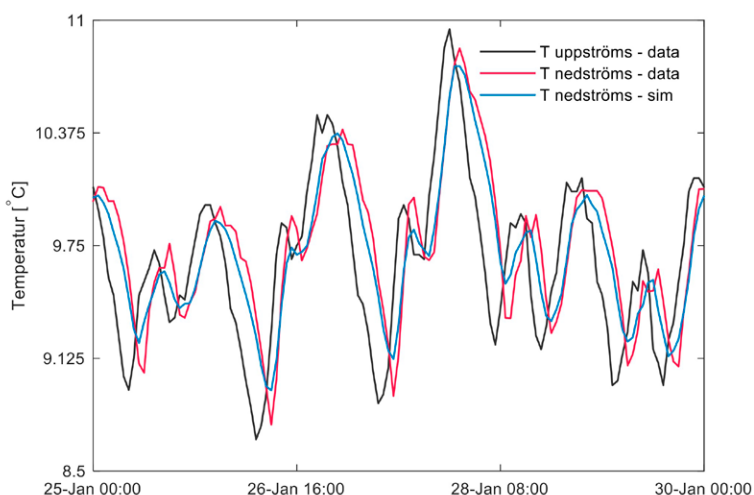
Motsvarande mätningar på en huvudavloppsledning i centrala Malmö (1,5 km) i mars 2018 uppvisar mindre förluster. I medeltal minskar temperaturen 0,13 °C. Skillnaderna mot överföringsledningen i Linköping är flera, sträckan är kortare, flödet är högre och ledningen är inte helt isolerad (det finns vissa tillflöden längs sträckan).



Figur 4.3

Uppmätt avloppsvattentemperatur (uppströms och nedströms) jämfört med modellerad temperatur (nedströms) för en samlingsledning på 1,5 km i Malmö.

Modellering av flöde och temperatur i Käppalaförbundets tunnelsystem var utmanande givet avsaknaden av flödes- och/eller temperaturdata i vissa anslutningspunkter till tunneln. Resultat och diskussion för denna del redovisas i Saagi and Arnell (2021). Resultaten från modelleringen av temperaturen i en av de två parallella sjöledningarna från Nacka redovisas i Figur 4.4. Temperaturförändringen i den ca. 2 km långa sjöledningen är begränsad för den redovisade perioden (januari 2019). I topparna minskar temperaturen något från inlopp till utlopp medan den i perioder av lägre temperatur och flöde istället ökar något.



Figur 4.4

Uppmätt avloppsvattentemperatur (uppströms och nedströms) jämfört med modellerad temperatur (nedströms) för en av sjöledningarna från Nacka till Käppalaverket.

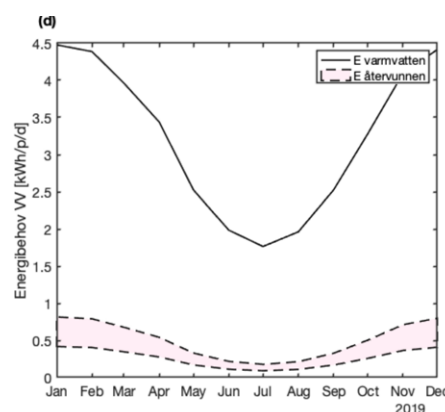
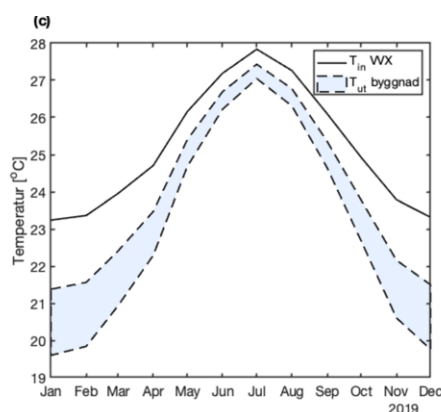
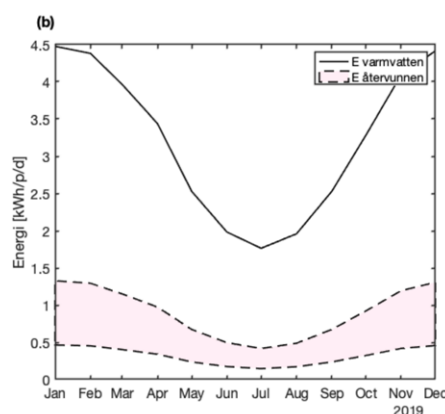
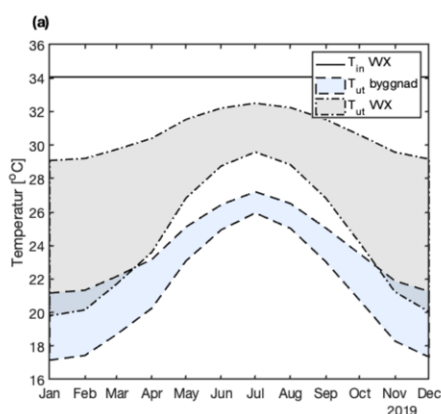
4.2 Värmeåtervinning i flerfamiljshus – energiåtervinning och påverkan på spillvattentemperatur

Resultaten för återvunnen energi och påverkan på avloppsvattentemperaturen vid värmeåtervinning i duschar (Pos. 1) och i fastigheter (Pos. 2) redovisas i Tabell 4.2 och Figur 4.5.

Spillvattentemperaturen sänks genom värmeåtervinning med värmeväxlare. Temperatursänkningen påverkas av värmeväxlarens effektivitet och ingående spillvatten- och kallvattentemperatur. Större temperaturskillnad mellan spillvatten och kallvatten ger större drivkraft för energiåtervinningen och sänker därmed spillvattentemperaturen mer. För värmeåtervinning i duschar (Pos. 1) sänks temperaturen mellan 3,5 och 10 °C över värmeväxlaren. Efter att det värmeväxlade duschavloppsvattnet blandats med övrigt hushållsavlopp är avloppsvattentemperaturen ut från byggnaden 21–24 °C att jämföra med 25,2 °C utan värmeåtervinning. Vid värmeväxling av samlat utgående avlopp från byggnaden (Pos. 2) är ΔT lägre (Figur 4.5c jämfört med a) vilket leder till mindre temperatursänkning, 1,2 till 2,3 °C på årsbasis. Utgående vattentemperatur blir då 23–24 °C för Pos. 2. För huvudfrågeställningen inom detta projekt är påverkan på temperaturen vintertid av större betydelse än årsgenomsnittet. För perioden januari till mars sänks temperaturen från 23,5 °C (utan värmeåtervinning) till mellan 18 och 22 °C med värmeåtervinning i Pos. 1 och mellan 20 och 22 °C i Pos. 2.

Genom att använda passiva värmeväxlare i duschen (Pos. 1) kan mellan 10 och 28 % av värmen i spillvattnet återvinnas per år beroende på värmeväxlarens effektivitet. Det motsvarar mellan 120 och 330 kWh per person och år. För värmeväxling på utgående avloppsstam från fastigheten är motsvarande siffror mellan 8 och 16 % återvunnen energi vilket motsvarar 94 till 185 kWh per person och år. Detta varierar med kallvattentemperaturen som både påverkar energibehovet för varmvatten och hur mycket energi som återvinns, vilket man kan se på säsongsvariationerna i Tabell 4.2. Simuleringar har också gjorts med konstant kallvattentemperatur, dessa redovisas i Wärrf *et al.* (2020b).

	Återvunnen värme [kWh/p/d]	Andel återvunnen värme [%]	Varmvattenbehov [kWh/p/d]	T utgående avloppsvatten byggnad [°C]	ΔT_{VWX} [°C]
Årsgenomsnitt					
Pos. 1	0,32-0,91	9,8-28,1	3,2	23,7-21,0	3,4-9,7
Pos. 2	0,26-0,51	8,0-15,7	3,2	24,0-22,9	1,2-2,3
Vinter, jan-mars					
Pos. 1	0,44-1,26	10,3-29,4	4,3	21,6-17,8	4,7-13,5
Pos. 2	0,39-0,76	9,1-17,8	4,3	21,8-20,1	1,7-3,4
Sommar, juli-sep					
Pos. 1	0,40-0,52	8,8-25,2	2,1	26,3-24,7	2,0-5,6
Pos. 2	0,12-0,23	5,8-11,4	2,1	26,5-26,0	0,5-1,1



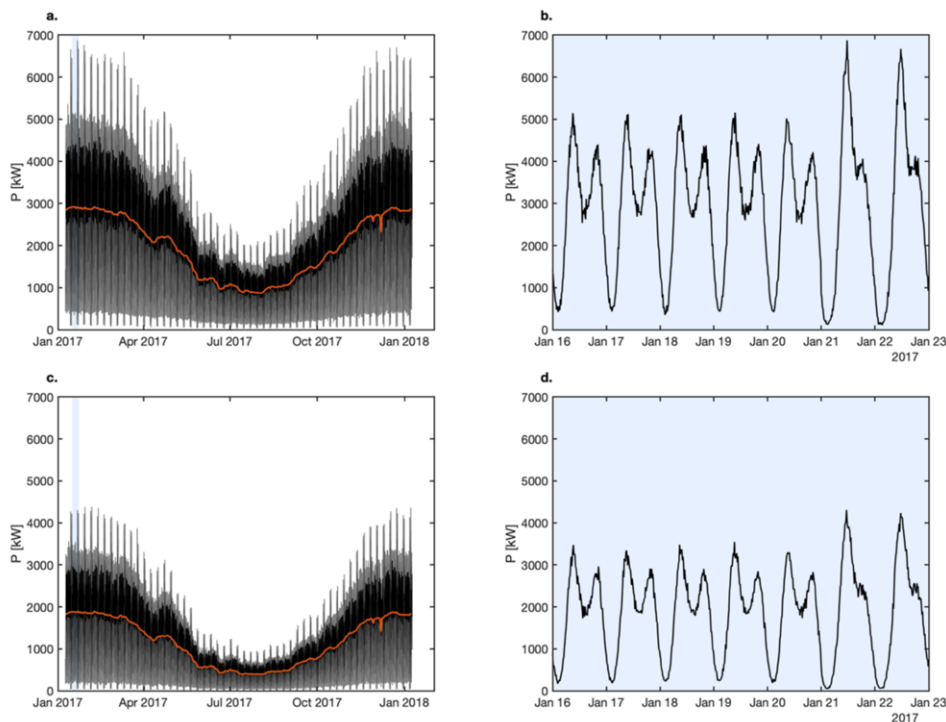
Tabell 4.2

Återvunnen värme, energibehov för varmvatten samt utgående avloppsvattentemperatur från fastighet med värmeåtervinning i Pos. 1 och Pos. 2 (hela flödet). Intervallet visar variationen beroende på effektiviteten på värmväxlaren (ϵ , Pos. 1: 0,24-0,69 och Pos. 2: 0,23-0,45).

Figur 4.5

Avloppsvattentemperatur in till och ut från värmväxlare samt ut från byggnad (a. Pos. 1, b. Pos. 2) samt energibehov för varmvatten och återvunnen energi (c. Pos. 1, d. Pos. 2). Intervallet markerat med streckade linjer visar variationen beroende på effektiviteten på värmväxlaren (ϵ , Pos. 1: 0,24-0,69 och Pos. 2: 0,23-0,45).

För lönsamheten av en värmebesparande åtgärd är inte bara mängden återvunnen energi (E , kWh) av intresse utan många gånger också det minskade effektbehovet för uppvärmning (P , kW). Detta eftersom fjärrvärmesystemet påverkas av storleken på effektbehovet i de fall fastigheten har ett effektabonnemang. Effekt för värmeåtervinning i Pos. 1 och Pos. 2 för 90 % av Linköpings lägenhetsfastigheter redovisas i Figur 4.6. Variationerna är mycket stora över dygn, vecka (Figur 4.6b,d) och säsong (Figur 4.6a,c). I sammanhanget är långa medelvärden mindre relevanta utan det avgörande är om effektuttaget kan minskas momentant eller för korta medelvärden – timme eller dygn beroende på avtal. I simuleringarna uppnås högsta effekt på helg-förmiddagar under vintern när kallvattentemperaturen är som lägst. Den maximala återvunna effekten (momentant) i Pos. 1 är 6,9 MW eller 0,1 kW per person. För Pos. 2 är motsvarande siffror 4,4 MW och 0,06 kW per person.



Figur 4.6

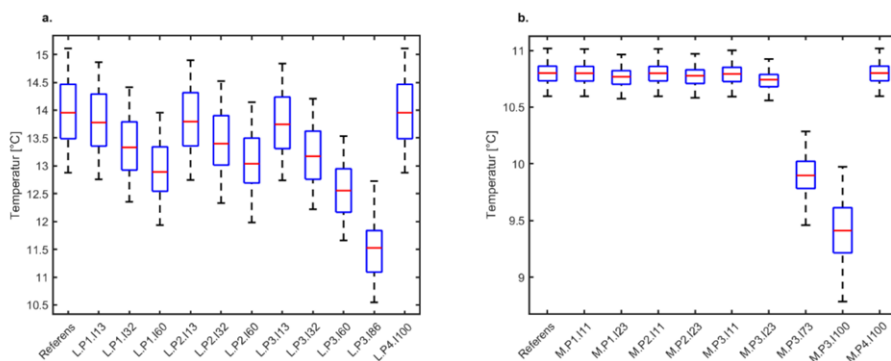
Effekt återvunnen värme i Pos. 1 (a. & b.) och Pos. 2 (c. & d.), momentanvärden (svart linje) och dygnsmedelvärden (röd linje) helår och b. och d. momentanvärden mån 16 jan till sön 23 jan 2017.

4.3 Effekten av värmeåtervinning på inloppstemperaturen på avloppsreningsverk

Genom mätningar på avgränsade avloppsvattenledningar i Linköping och Malmö (Figur 4.2 och Figur 4.3) samt modellering av dessa ledningar har energiförlusterna i ledningsnätet studerats i detalj. Den mekanistiska ledningsnätmodellen kan väl beskriva energiförlusterna och därmed temperaturförändringen längs ledningen. Dagtid är överensstämmelsen mycket god medan modellerade värden nattetid är något underpredikterade vissa dygn. Då värmeåtervinning framförallt är aktuellt dagtid anses detta acceptabelt för föreliggande analys. En detaljerad analys av modellens noggrannhet redovisas i Saagi *et al.* (2021). Den konceptuella modellen för hydraulik och energi i ledningsnätet som utvecklats för simuleringar och analys av hela urbana avrinningsområden har också acceptabel prestanda för det tilltänkta användningsområdet.

Från simuleringarna av avrinningsområdena till Linköpings och Sjölunda ARV har medelvärden av inloppstemperaturen till reningsverken analyserats. Resultat för vinterperioderna visas i Figur 4.7, resultat för kompletterande perioder finns i Bilaga B. I Linköping har samtliga positioner för värmeåtervinning (Pos. 1-4) och samtliga implementationsgrader (I13 till I86 för Pos. 1-3 samt I100 för Pos 4) simulerats. För Malmö har endast de lägre graderna av implementation kunnat simuleras då endast Spillepengens avrinningsområde har inkluderats i detalj.

För Linköpings ARV är $T_{ARV.in}$ 14,0 resp. 15,2 °C för de två simulerade perioderna när ingen värmeåtervinning utförs uppströms inloppet. Värmeåtervinning i fastigheten (Pos. 1 och 2) ger liknande tempsänkning vid olika implementationsgrader. Vid en måttlig grad av värmeåtervinning (ca. 10 %) påverkas inte temperaturen på inkommande avloppsvatten på något signifikant sätt. Vid ca. 30 % värmeåtervinning sjunker $T_{ARV.in}$ med ca. 0,6 °C, något mer för Pos. 1 och något mindre för Pos. 2. Vid högre grad av värmeåtervinning (ca. 60 % av totalflödet) sjunker temperaturen med ca 1 °C. Större tempsänkning uppnås endast om värmeåtervinning med värmepumpar tillämpas på en stor del (60-90 %) av flödet i ledningsnätet (Pos. 3). Då sjunker $T_{ARV.in}$ med upp till 2,5 °C. Med värmeåtervinning på utgående renat avloppsvatten på reningsverket



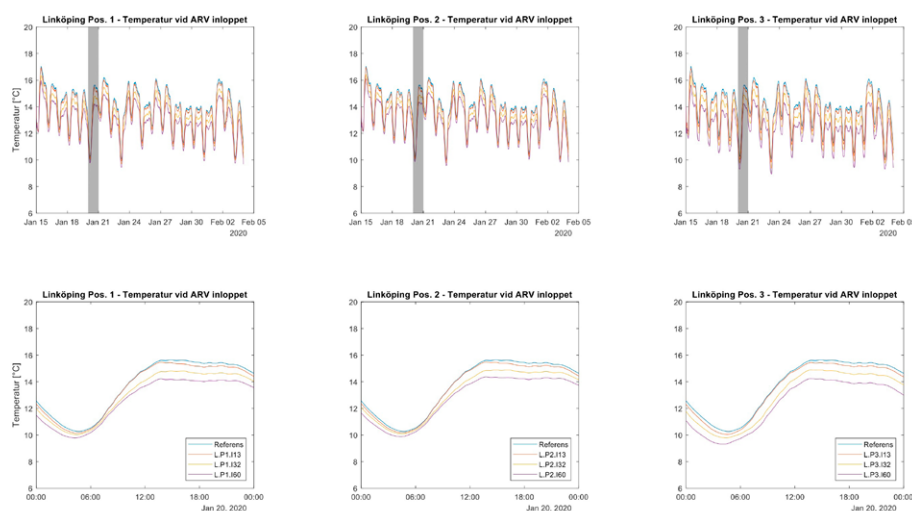
Figur 4.7

Genomsnittlig inkommande avloppsvattentemperatur: a) Linköpings ARV, 15 jan-4 feb och b) Sjölundas ARV, 10-30 mars. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall och staplarna markerar 95 % konfidensintervall.

(Pos. 4) är inkommande $T_{ARV,in}$ opåverkad och samma som om ingen värmeåtervinning förekommer. Osäkerhetsanalysen visar att resultaten är robusta då 75 %-intervallet ger en variation på under 1 °C.

Resultaten från simuleringarna av Sjölundas ledningsnät visar att värmeåtervinning har marginell påverkan på $T_{ARV,in}$. För fastighetsbaserad värmeåtervinning (Pos. 1 och 2) ligger alla resultat $\pm 0,05$ °C. Då bör man dock beakta att endast upp till drygt 30 % av fastigheterna simulerats med värmeåtervinning. Även värmeåtervinning i ledningsnätet med värmepump (Pos. 3) ger väldigt liten påverkan vid 11-23 % av flödet men vid 73-100 % sänks temperaturen med upp till 1,4 °C. Mönstret är det samma för båda tidsperioderna men medelvärdena skiljer, i mars ligger den ursprungliga medeltemperaturen på 10,8 °C medan den i juni är 18,7 °C. Osäkerheterna för simuleringarna i Malmö är mycket små eftersom osäkerhetsanalysen bara applicerats på den del av flödet som modellerats (Spillepengen).

Alla simuleringar har gjorts med dynamiska indata för sina respektive tidsperioder. I Figur 4.8 visas tidsserier för $T_{ARV,in}$ till Linköpings ARV för Pos. 1-3 vid olika implementationsgrader. Värmeåtervinningen i fastigheter är störst dagtid när aktiviteten är högre i bostäderna. Det visar sig genom att påverkan på avloppsvattentemperaturen är störst dagtid och närmast obetydlig nattetid. I motsats till detta kan en värmepump i en större spillvattenledning gå dygnet runt och temperatursänkningen är mer jämn över dygnet. Temperatursänkningen är alltså både större och mer kontinuerlig vilket bidrar till det lägre medelvärdet totalt sett.



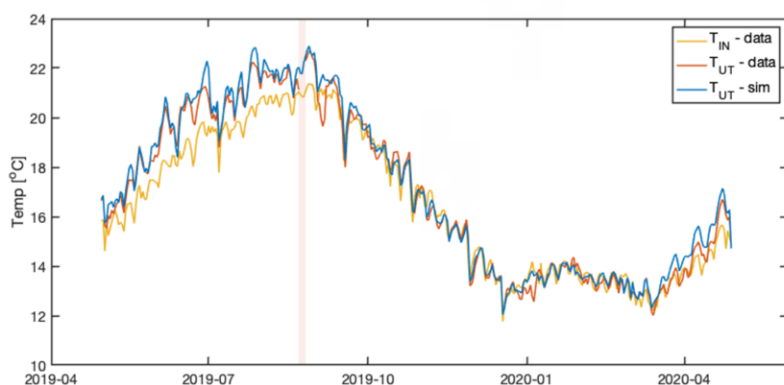
Figur 4.8

Inloppstemperatur till avloppsreningsverk beroende på position för värmeåtervinning (Pos. 1 till 3) och olika implementationsgrader (13, 32 & 60 % av flerfamiljshus-håll).

4.4 Påverkan på avloppsreningsverkets prestanda av värmeåtervinning uppströms

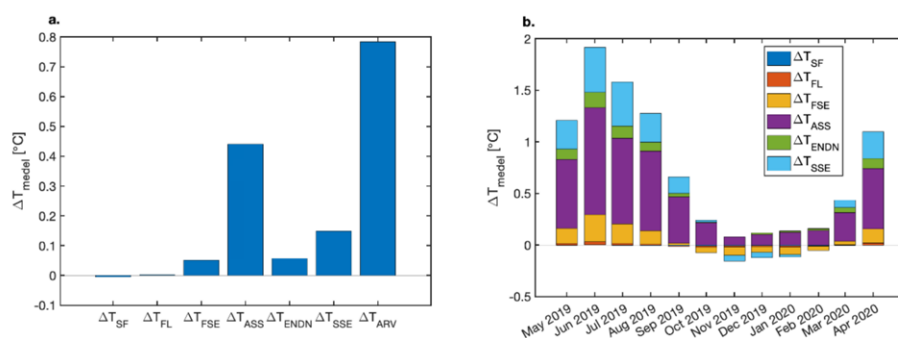
4.4.1 Temperaturförändring över reningsverket

Mätningarna av inkommande och utgående avloppsvattentemperatur på Linköpings ARV redovisas tillsammans med den modellerade utgående temperaturen i Figur 4.9. Temperaturen ökar med i genomsnitt 0,78 °C över reningsverket (Figur 4.10 och Tabell 4.3). Huvuddelen av energitillskottet kommer från de exoterma biologiska reaktionerna i aktivt slamsteget men 45 % av förändringarna är från övriga processteg, vilket visar på betydelsen av att simulera hela reningsverket. Årstidsvariationerna är tydliga där solinstrålningen adderar till temperaturökningen sommartid (april till september) medan energiförlusterna från bl.a. konvektion och avdunstning i princip tar ut ökningarna från biologin under den kalla perioden oktober till mars.



Figur 4.9

Mätt inkommande (gul linje) och utgående (röd linje) temperatur tillsammans med simulerad utgående temperatur (blå linje) vid Linköpings avloppsreningsverk för valideringsperioden av den integrerade process- och energibalansmodellen. Det skuggade området (rött) markerar en period där data för utgående temperatur saknas.



Figur 4.10

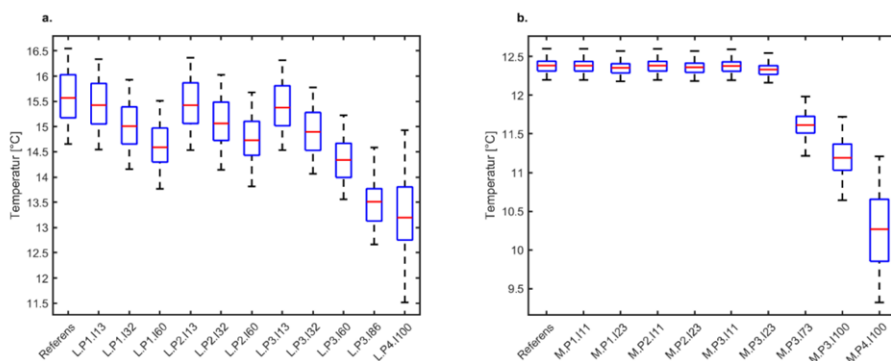
Temperaturförändring i respektive delprocess på Linköpings avloppsreningsverk, a) årsmedelvärden b) månadsmedelvärden. Index: SF – sandfång, FL – förluftning, FSE – försedimentering, ASS – aktivt slamsteg, ENDN – efternitritifikation och denitrifikation, SSE – slutsedimentering, ARV – avloppsreningsverk.

Modellen för energibalans simulerar utgående avloppsvattentemperatur med god noggrannhet. Avvikelsen är 0,30 °C (medeltal av absolutvärdet av felen) vilket är under den uppsatta toleransen på 0,5 °C. Utförlig presentation och analys av data och modell finns i Arnell *et al.* (2021).

Resultaten visar att modellen fungerar väl för det tilltänkta syftet att analysera temperaturförändringar i storleksordningen 0,5 till 3 °C.

4.4.2 Påverkan på avloppsrening med simulerad värmeåtervinning

Variationerna i inloppstemperatur på grund av värmeåtervinning i de olika scenarierna (Figur 4.7) går igen i temperaturerna på utgående vatten (Figur 4.11). Detta är väntat då alla scenarierna simulerats med samma meteorologiska indata och därför påverkats på likartat sätt av energibalansen på reningsverket. Scenarierna L.T1 till L.T3 visar dock att temperaturhöjningen över verket är något större vid lägre genomsnittlig inloppstemperatur, 1,0 °C mot 0,8 °C för referensfallet (Arnell *et al.*, 2021). Den största skillnaden är mellan inloppstemperaturen för scenarierna med värmeåtervinning på



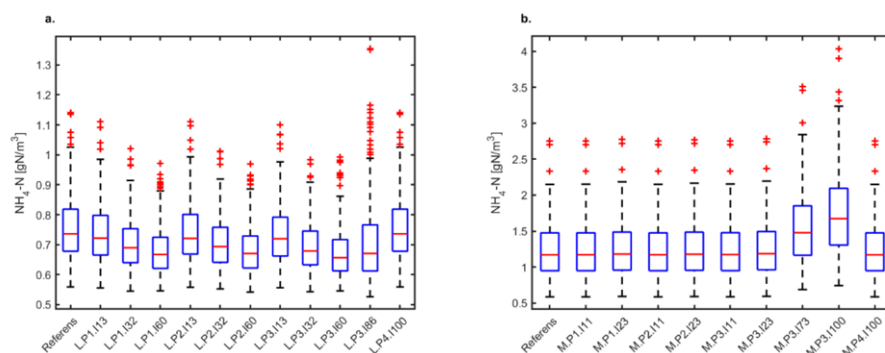
Figur 4.11

Genomsnittlig utgående avloppsvattentemperatur a) Linköpings ARV, 15 jan-4 feb och b) Sjölanda ARV, 10-30 mars. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall och staplarna markerar 95 % konfidensintervall.

renat avloppsvatten (Pos.4, L.P4.I100 och M.P4.I100) där utgående temperatur sjunker med 0,75 till 1 °C jämfört med inloppstemperaturen för Linköping respektive Malmö vintertid.

På reningsverket är det framförallt de biologiska reaktionerna som är temperaturkänsliga och då speciellt nitrifikation av $\text{NH}_4\text{-N}$ till $\text{NO}_3\text{-N}$. Figur 4.12 visar medelvärden för utgående $\text{NH}_4\text{-N}$ för alla scenarier med värmeåtervinning jämfört med referensfallet utan värmeåtervinning. Temperaturen på inkommande vatten sjönk drygt 1 °C jämfört med referensfallet (L.P1.I13 till L.P1.I60) vilket ger små variationer i utgående $\text{NH}_4\text{-N}$ (Figur 4.12a). Tvärt emot vad man skulle förvänta sig är det en liten sänkning av $\text{NH}_4\text{-N}$ i utgående vatten som påvisas vilket kan förklaras av reningsverkets konfiguration med efter-nitrifikation och -denitrifikation. Men skillnaderna täcks in av variationerna i osäkerhetsanalysen och kan inte anses signifikanta. För Malmö är skillnaderna obefintliga för fallen M.P1.I11 till M.P3.I23 (Figur 4.12b) och endast en mycket liten ökning av utgående $\text{NH}_4\text{-N}$ kan ses när 73-100 % av avloppsvattnet i ledningsnätet används för värmeåtervinning med värmepumpar. ARV simulerades i alla fall med identiska styrstrategier.

Utifrån resultaten av simulerade scenarier för värmeåtervinning går det inte att påvisa någon negativ påverkan på avloppsreningsverkets reningsprocesser från att återvinna värme uppströms reningsverket.



Figur 4.12

Genomsnittlig utgående ammoniumkoncentration a) Linköpings ARV, 15 jan-4 feb och b) Sjölanda ARV, 10-30 mars. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall, staplarna markerar 95 % konfidensintervall och röda kors är avvikande värden (outliers).

4.4.3 Påverkan på avloppsrening med simulerad tempsänkning

Scenarierna L.T1 till L.T3 visar hur reningsverkets prestanda och drift påverkas när inloppstemperaturen till Linköpings ARV minskas med 1, 2 och 3 °C (Tabell 4.3 och Figur 4.13). Nitrifikationen i biosteget försämras och $\text{NH}_4\text{-N}$ från ASS ökar med upp till 2,6 mg/l (50 %). Då reningsverket har efternitrifikation (Figur 3.6a) så kompenseras detta i viss mån och $\text{NH}_4\text{-N}$ i utgående till recipient ökar som mest med knappt 1 mg/l. Effekten är starkt säsongsberoende med obetydlig påverkan sommartid och signifikant ökning vintertid (Figur 4.13) och är inte linjär utan ökar förhållandevis mer ju mer temperaturen minskar. Det gäller också för utgående totalkväve (TN) som bara ökar med 0,2 mg/l vid en grads sänkning men med 1,3 mg/l vid tre grader. Trots detta överstiger

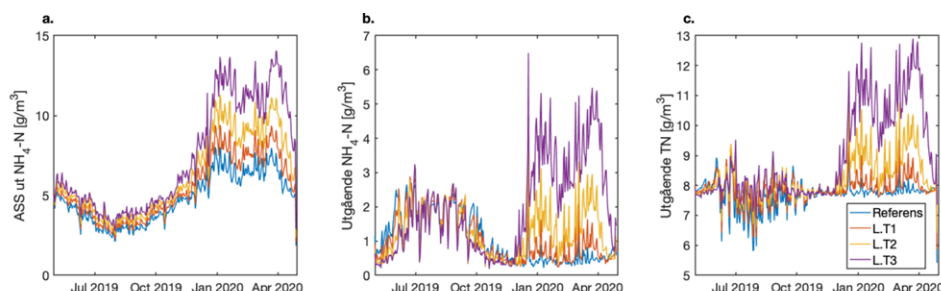
årsmedelvärde för TN inte 10 mg/l vilket är anläggningens utsläppsvillkor (Tabell 3.5).

Reningsverkets drift påverkas också på andra sätt. Luftningsbehovet i ASS minskar med upp till 11 % då det dels är lättare att driva in luft i kallare vatten och den syrekrävande nitrifikationen minskar. Behovet av extern kolkälla påverkas även den när kvävebelastningen på steget för efternitrifikation och denitrifikation ökar. Dynamiken mellan ASS och dessa processer är komplext och trenden för dosering av kolkälla är inte strikt ökande vid minskad temperatur (Arnell *et al.*, 2021).

	Referens	L.T1	L.T2	L.T3
$T_{ARV,in}$ [°C]	16,5	15,5	14,5	13,5
$NH_4-N_{ASS,ut}$ [g N/m ³]	4,9	5,55	6,37	7,51
$NO_3-N_{ASS,ut}$ [g N/m ³]	7,91	7,98	7,93	7,66
$TN_{ASS,ut}$ [g N/m ³]	14	14,7	15,6	16,5
$T_{ASS,ut}$ [°C]	17,1	16,2	15,2	14,3
$NH_4-N_{ARV,ut}$ [g N/m ³]	0,973	1,02	1,27	1,94
$NO_3-N_{ARV,ut}$ [g N/m ³]	6,43	6,54	6,64	6,72
$TN_{ARV,ut}$ [g N/m ³]	7,73	7,91	8,28	9,05
$T_{ARV,ut}$ [°C]	17,3	16,4	15,5	14,5
$Q_{Luft ASS}$ [m ³ /d]	275 000	267 000	257 000	244 000
MBBR Metanoldosering [m ³ /d]	0,61	0,65	0,67	0,66

Tabell 4.3

Årsmedelvärden för temperatur, kväveparametrar och driftvariabler i aktivt slamsteget och utgående vatten för scenarierna L.T1 till L.T3 jämfört med referensfallet.



Figur 4.13

NH_4-N i aktivt slamsteget samt NH_4-N och TN i utgående renat vatten för scenarierna L.T1 till L.T3 jämfört med referensfallet.

För Käppalaverket är resultaten likvärdiga med de från Linköpings ARV. Den resulterande inloppstemperaturen till reningsverket efter tunnelsystemet för Scenario K.T1 till K.T3 redovisas i Tabell 4.4 och Figur 4.14a tillsammans med utgående temperatur från verket Figur 4.14b. Jämfört med uppströms värden in till tunnelsystemet har temperaturen sjunkit ca. 1 °C. Den genomsnittliga temperaturen sjunker sedan uniformt med nära 1 °C in till verket när temperaturen uppströms sänks lika mycket. För maxtemperaturerna är effekten något avtagande och mellan K.T2 och K.T3 skiljer det bara 0,5 °C vilket kan bero på minskande temperaturskillnad mellan vatten och mark / luft vid lägre avloppsvattentemperatur. Då det inte varit aktuellt att modellera energibalansen på reningsverket i detta fall (då det är överbyggt) är den huvudsakliga skillnaden från inlopp till utlopp en dämpning av variationerna på grund av uppehållstiden i reningsbassängerna.

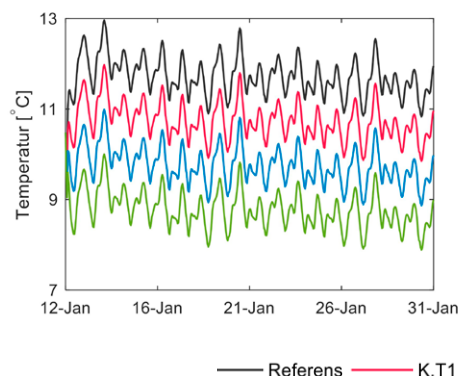
Förändringen i utgående ammonium- och totalkväve är marginell (Tabell 4.4 och Figur 4.15). Viss påverkan på nitrifikationen kan ses genom en ökning i utgående NH_4-N från reningsverket. Ökningen är dock mycket liten, mindre än 0,1 mg/l per grad minskad $T_{ARV,in}$. För varken NH_4-N eller TN riskerar ökningarna att äventyra reningsverkets utsläppsvillkor.

		Referens	K.T1	K.T2	K.T3
$T_{ARV,in}$ [°C]	Medel	11,7	10,7	9,8	8,8
	Max	13,0	12,0	11,0	10,5
$NH_4-N_{ARV,ut}$ [g N/m ³]	Medel	0,29	0,34	0,41	0,51
	Max	0,53	0,61	0,71	0,90
$TN_{ARV,ut}$ [g N/m ³]	Medel	6,40	6,48	6,59	6,71
	Max	7,53	7,67	7,84	8,05

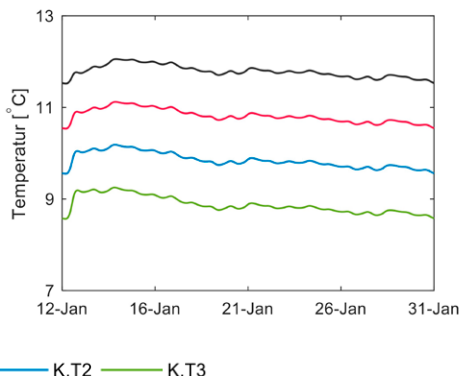
Tabell 4.4

Medel och maxvärden för temperatur och kväveparametrar i utgående vatten för scenarierna K.T1 till K.T3 jämfört med referensfallet. Värdena avser simulering för januari 2019.

a.



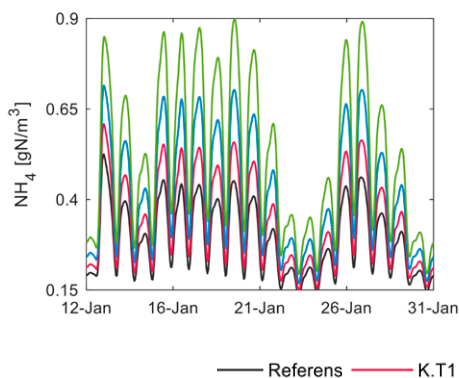
b.



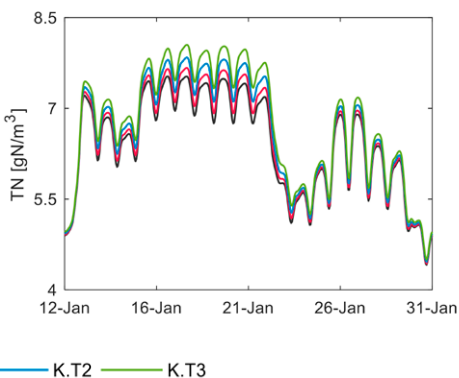
Figur 4.14

Simulerad temperatur på inkommande (a) och utgående (b) vatten vid Käppalaverket.

a.



b.



Figur 4.15

Simulerad halt av ammoniumkväve (a) och totalkväve (b) i utgående vatten vid Käppalaverket.

4.4.4 Andra relevanta aspekter att beakta vid värmeåtervinning

Utöver potentialen för energiåtervinning och den effekt det har på avloppsvattnets temperatur och reningsverkets processer i det korta perspektivet finns det att antal andra relevanta aspekter att beakta i det enskilda fallet.

Påverkan på avloppsledningsnätet – I föreliggande projekt har effekten av lägre spillvattentemperatur på ledningsnätet inte undersökts. Det är främst två effekter som är tänkbara: i) förändrad reologi för fett i ledningsnätet, där lägre temperatur gör att fettet eventuellt kan stelna tidigare eller i större utsträckning; samt ii) minskad biologisk aktivitet i ledningsnätet, lägre temperatur kan leda till t.ex. minskad svavelvätebildning. Detta är också ett område av intresse för framtida studier, se Kapitel 6.

Påverkan på reningsverkets kapacitet – Även om temperatursänkningen på avloppsvattnet i de tre fallstudierna som har presenterats här inte gav någon kritisk påverkan på kvävereningen till den grad att gällande villkor riskerade att överskridas så betyder

det inte att reningsverket är opåverkat. Eftersom reaktionshastigheterna minskar med sjunkande temperatur klarar reningsverket inte lika stor belastning om temperaturen sjunker om allt annat antas lika. Ett annat sätt att säga samma sak är att reningsverket designas för en viss maximal belastning vid en given temperatur, om temperaturen sjunker så minskar också den maximala belastning som reningsverket klarar att behandla. I städer med en växande befolkning, där reningsverket behöver byggas ut när max-belastning nås, betyder det att den tidpunkten infaller snabbare om temperaturen sänks än om den kunnat bibehållas. Detta går att beräkna med traditionella designberäkningar eller modellera med en liknande processmodell som den som använts här. För den övningen krävs att man gör realistiska scenarier för framtida belastning och andra eventuella förändringar i processer m.m. Detta har inte varit en del av detta projekt men kan göras från fall till fall där det är aktuellt.

Påverkan på sedimenteringsprocesserna – De processmodeller som här har använts är mycket detaljerade i sin beskrivning av framför allt biologiska reningsprocesser. Övriga processer på reningsverket såsom hydraulik och kemiska reaktioner ingår med en noggrannhet som bedöms adekvat givet de frågeställningar som här analyseras. Den av reningsverkets processer som är svårast att modellera mekanistiskt är sedimentering. Mellansedimenteringsbassängerna som avskiljer det aktiva slammet i det biologiska steget begränsar i många fall den hydrauliska belastningen genom reningsverket. Om sedimenteringsegenskaperna förändras till det sämre kan detta påverka bl.a. den hydrauliska kapaciteten på aktivt slamsteget och därmed leda till bräddning av mekaniskt renat vatten förbi den sekundära biologiska reningen. Det riskerar då att leda till högre utsläpp i högflödessituationer beroende på övriga (ev. tertiära) reningssteg på reningsverket. Sedimentationsegenskaperna för aktivt slam påverkas av många faktorer varav inte alla är kända, slamålder, flödes hastigheter, slambelastning, substratsammansättning m.m. är kända faktorer. Temperaturen, eller säsong som temperaturen följer i nordiskt klimat, har visat sig påverka flockstrukturen hos aktivt slam med lösare, kantigare flockar med högre EPS-halter vid låga temperaturer (Wilen *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2015). Dock korrelerar detta inte i alla fall med sämre sedimenteringsegenskaper (Zhang *et al.*, 2015). I fall där en ökad filamentbildning uppträder i kallare vatten är dock en negativ påverkan på sedimenteringen till följd av detta tydlig (Knoop & Kunst, 1998).

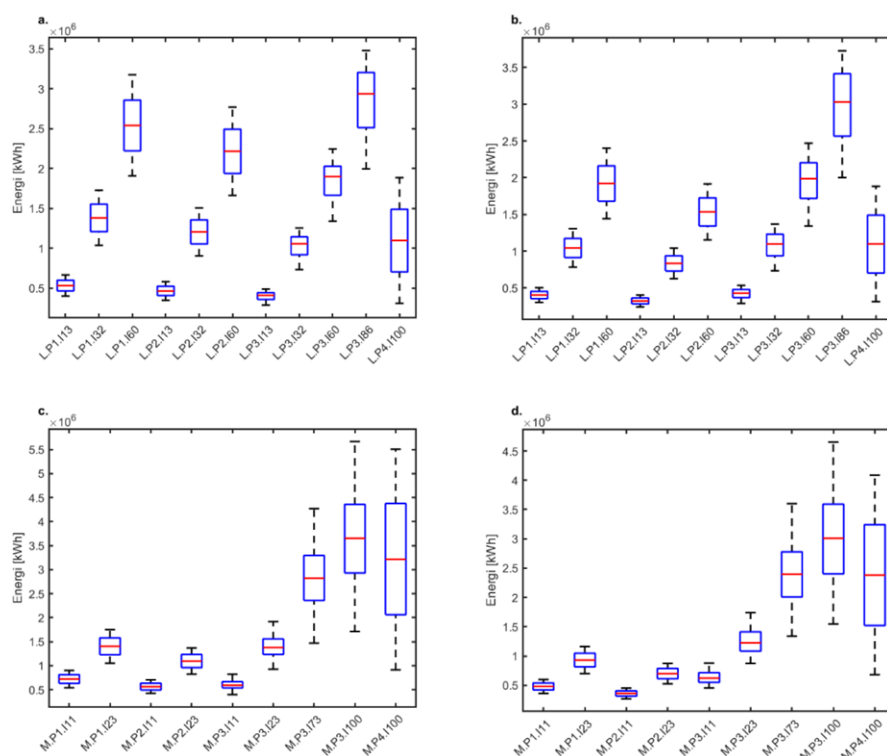
Tillskottsvattens betydelse för avloppsvattentemperaturen – Temperaturen på inkommande avloppsvatten till avloppsreningsverket styrs inte bara av temperaturen på vatten från fastigheter och energiförluster till mark och luft i ledningsnätet. Tillskottsvatten som kommer in i ledningsnätet via dagvattenbrunnar i kombinerade ledningsnät (dag- och spillvatten i samma ledning) och inträngande vatten har direkt och tidvis kraftig påverkan på avloppsvattentemperaturen (Panasiuk *et al.*, 2019). Framförallt under perioder med kallt tillskottsvatten – vintertid i allmänhet och snösmältning i synnerhet – sjunker temperaturen på avloppsvattnet i förhållande till temperaturen på och inblandningsgraden av tillskottsvatten. Tillskottsvatten och dess påverkan på temperaturen ingår i ledningsnätetsmodellen med en faktor per areal i avrinningsområdet. Dynamiska profiler för nederbördsrelaterat tillskottsvatten kan adderas till modellen. I de tre simulerade fallstudierna som presenteras i denna rapport har flödesprofiler för torrvädersflöde, inkl. grundflöde av tillskottsvatten, använts. Snabba tillskottsvattenflöden vid kraftiga regn under kalla förhållanden kan ha stor, ofta kortvarig, påverkan på avloppsvattentemperaturen.

4.5 Utvärdering av värmeåtervinning och värmeproduktion

Genomsnittligt återvunnen energi för simuleringarna av Linköpings och Malmös avloppssystem (Scenario L.P1.I13 till M.P4.I100) visas i Figur 4.16 för två olika perioder per stad. Den generella trenden är att mer värme återvinns ju längre uppströms installationen görs. Högst värmeåtervinning vid jämförbar andel av vattnet som utnyttjas fås i Pos. 1. Detta eftersom vattentemperaturen är högre och förlusterna undviks ju kortare väg vattnet runnit. Undantaget är vid högre genomsnittlig temperatur (t.ex. sommartid) då värmepumpar i ledningsnätet kan ta ut mer energi än värmeväxlare i fastigheter eftersom drivkraften i det senare fallet (ΔT_{vwx}) är mindre när kallvattentemperaturen är högre (gäller särskilt under sommarhalvåret om vattentäkten är ytvatten).

Simuleringsresultaten för värmeåtervinning med värmepumpar (L.P3.I13 till M.P4.I100) ska generellt tolkas med försiktighet då en generisk flödesanpassad modell använts för samtliga värmepumpsinstallationer. Påverkan på avloppsvattentemperaturen och prestandan för värmepumpar (COP-faktor och återvunnen energi) påverkas normalt sett mycket av fallspecifika faktorer. Exempel på sådana faktorer är: hur värmen kan användas, relationen mellan temperaturer och flöden för varma och kalla sidan m.m. Det gör att resultaten kan skilja om verkliga installationer skulle utredas för samtliga platser individuellt.

Skillnaderna i återvunnen energi mellan till exempel olika andel av avloppsvattnet som utnyttjas för värmeåtervinning (P1.I13 till P1.I60, Figur 4.16a) är relativt stora och signifikanta men osäkerheterna som påvisas i osäkerhetsanalysen är betydande. Till stor del beror osäkerheten på den stora variationen i effektivitet (t.ex. ϵ) som finns för utrustning såsom värmeväxlare. En bra installation (gynnsamma förhållanden som högt ΔT och jämna flöden) av utrustning med bra konstruktion (høgt ϵ) kan återvinna betydligt mer energi än en installation med ofördelaktiga förutsättningar.

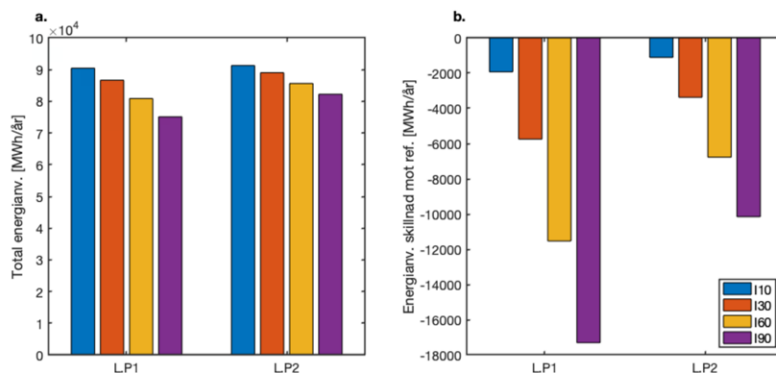


Figur 4.16

Återvunnen energi för samtliga simulerade scenarier och perioder. a) Linköpings ARV, 15 jan-4 feb, b) 15 april-6 maj, c) Sjölanda ARV, 10-30 mars och d) 8 juni-28 juli. För fall med värmepumpar (P3 och P4) redovisas netto återvunnen energi, d.v.s. insatt el är avdragen från brutto levererad värme.

4.5.1 Påverkan på kraftvärmeproduktion och dess klimatpåverkan till följd av värmeåtervinning

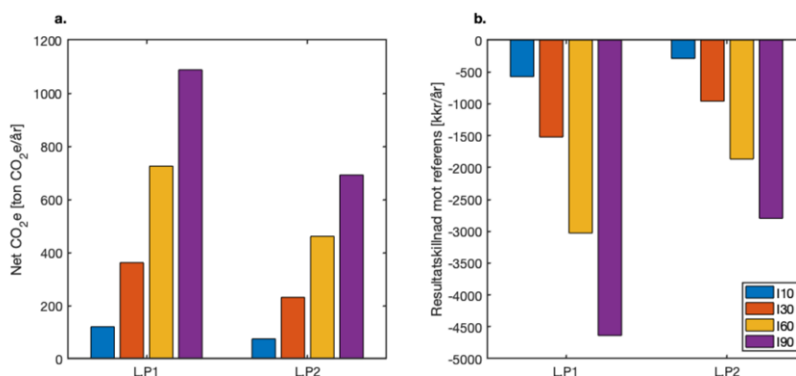
Simuleringarna av Linköpings kombinerade el- och fjärrvärmeproduktion avseende återvinning av spillvärme med förändrad värmelast enl. Scenario L.P1.I10 till L.P2.I90 redovisas i Figur 4.17 och Figur 4.18. Värmelasterna minskar linjärt med ökad implementationsgrad (I10 till I90) och precis som tidigare resultat visat är värmeåtervinningen större i Pos. 1 än Pos. 2. Totalt sett är det små minskningar relativt det totala värmeunderlaget för fjärrvärme i Linköping, skillnaden för Scenario L.P1.I90 mot referensfallet är som mest 17 GWh för de simulerade byggnadslösningarna vilket motsvarar ca. 0,9 % av Tekniska Verken totala försålda fjärrvärme (1 900 GWh/år). Detta leder till en minskad produktion med mindre använt bränsle och mindre producerad el.



Figur 4.17

Total energianvändning för simulerade byggnadslösningar (a) och skillnad mot referensfallet (b).

Resultaten från simuleringar av hela systemet visar att netto koldioxidutsläpp ökar för det integrerade energisystemet när värmelasten minskar (Figur 4.18a). Det kan tyckas motsägelsefullt men beror på att minskningen av direkta utsläpp från de lokala kraftvärmeverken är mindre än ökningen av indirekta utsläpp från den externa elproduktion som beräknas ersätta bortfallet av elproduktion vid kraftvärmeverken i Linköping (jfr. Figur 3.3). Den specifika ökningen av CO₂e är 62,8 g CO₂e/kWh återvunnen. Dessa resultat står sig även med den lägre och högre siffra för koldioxidutsläpp från den externa elproduktionen som använts i scenarioanalysen (se resultat i Bilaga C).



Figur 4.18

a) Nettoskillnad (ökning i alla fall) av direkta och indirekta växthusgasutsläpp från energisystemet till följd av värmeåtervinning med simulerade alternativ. b) Förändring i rörliga produktionskostnader för kraftvärmeproduktion vid Tekniska Verken i Linköping med simulerade alternativ.

Den minskade värmeanvändningen till följd av värmeåtervinning påverkar också fjärrvärmeproducenten ekonomiskt. Den minskade intäkten från fjärrvärmeförsäljning kompenseras något av minskade produktionskostnader men netto blir det ett försämrat resultat (Figur 4.18b). Som mest minskar rörelseresultatet med ca. 4,5 Mkr/år. Den negativa effekten på resultatet mildras något av att värmeåtervinningen med värmeväxlare är som störst vintertid när också produktionskostnaden och växthusgasutsläppen är som störst. Detta gäller generellt för städer som likt Linköping har stora variationer i kallvattentemperatur över året. Samtidigt är återvinningen mindre på sommaren när

Tekniska Verken annars kyler bort överskottsvärme. Värmeåtervinning hjälper alltså till att kapa effekttopparna vintertid som annars är mycket kostsamma och ger proportionellt högre växthusgasutsläpp på grund av att klimat- och kostnadsmässigt sämre bränslen och produktionsanläggningar då används. Speciellt positivt är det de kallaste timmarna och dygnen då spetslastpannor krävs, vilka oftast inte har elproduktion och därmed ger minskad produktion inte ökade utsläpp. Denna effekt är inkluderad i simuleringarna. Även om det på kort sikt är negativt för bolaget kan minskat värmebehov för samma antal kunder ändå ha den långsiktigt positiva effekten att behovet av att kostsamma investeringar i nya anläggningar på grund av befolkningstillväxt kan skjutas framåt i tiden.

Resultaten i detta avsnitt är specifika för Linköpings energisystem (2020) och valda scenarier. Generellt påverkas dock andra fall där återvunnen värme ersätter värme från kraftvärmeproduktion på liknande sätt även om de specifika siffrorna kommer skilja beroende på bränslemix, elmix för extern produktion etc. Med ett framtida fossilfritt energisystem påverkas t.ex. inte växthusgasutsläppen av värmeåtervinning. För platser och fastigheter med andra system för värme och varmvatten, såsom el, värmepumpar eller fjärrvärme utan elproduktion gäller inte ovan resultat om ökade växthusgasutsläpp. Ett resonemang om dylika fall återfinns i litteraturstudien (Arnell *et al.*, 2017).

4.6 Ekonomiska och juridiska avvägningar

Ingen genomgripande samhällsekonomisk analys av de olika scenarierna för värmeåtervinning har gjorts. Värmeåtervinning i fastigheter har potential att ge besparingar och vara lönsamma för fastighetsägare. Framförallt i de fall effektabonnemang tillämpas, det vill säga att den fasta avgiften för fjärrvärme styrs av det maximala effekttuttaget under en given period. Med värmeåtervinning kan effekttopparna på vardagsmorgnar reduceras eftersom avloppsvattentemperaturen och varmvattenförbrukningen är hög samtidigt när många duschar. Denna besparing tillfaller fastighetsägaren. Samtidigt minskar potentialen något för värmeåtervinning på renat avloppsvatten (Pos. 4) vid reningsverken med fallande spillvattentemperatur. Denna påverkan måste dock anses liten då den simulerade temperaturreduktion på upp till 5,5 °C ut från fastigheten bara sänker inloppstemperaturen till reningsverket med 1 °C. Gruppen av fastighetsägare är inte densamma som VA-kollektivet eller fjärrvärmekunderna även om ett stort överlapp finns. Det gör att det är diskutabelt att motivera ett förbud mot värmeåtervinning för att det skulle missgynna VA-kollektivet ekonomiskt.

Kunderna i VA-kollektivet köper kallvatten, värmer upp en del av det med el, gas eller fjärrvärme och släpper sedan tillbaka vattnet till avloppsnätet. För detta betalar de en fast avgift plus en rörlig del som täcker både vattenförsörjning och avloppsbehandling. De skrivningar som idag finns i ABVA i vissa kommuner där värmeåtervinning kräver tillstånd från VA-huvudmannen begränsar i praktiken tillämpningen genom att sådana tillstånd inte alltid ges. Den begränsningen motiveras ofta med risken för negativ påverkan på reningsverken. När denna risk inte kan styrkas bör det utredas om det är rimligt att hindra kunderna från att ta tillbaka den värme som de själva köpt och varmt upp vattnet med.

5 Slutsatser

- Värmeåtervinning på fastighetsnivå (Position 1 eller 2) medelst värmeväxlare sänker temperaturen på utgående avloppsvatten från byggnaden mellan 1,5 och 5,5 °C beroende på position och effektivitet på värmeväxlaren. Mängden återvunnen energi är större från enbart duschvatten (Position 1) än från det samlade spillvattnet (Position 2), 120-330 kWh/person/år i Position 1 jämfört med 95-185 kWh/person/år i Position 2.
- Energiåtervinningen varierar över året när värmeväxlare används på fastighetsnivå, framförallt beroende på kallvattentemperaturen på platsen. Lägre kallvattentemperatur vintertid ökar värmeåtervinningen jämfört med den varmare årstiden. I samhällen som likt Linköping periodvis (sommartid) har en kallvattentemperatur över 20 °C är potentialen för värmeåtervinning mycket låg under dessa förhållanden.
- Genom mätning, modellering och simulering av energibalansen i ledningsnätet har värmeförlusterna kunnat studeras. För alla simulerade fall av värmeåtervinning med värmeväxlare på fastighetsnivå är effekten på inloppstemperaturen till avloppsreningsverket likvärdig och begränsad, maximalt 1 °C lägre än referensfallet utan värmeåtervinning. Om värmepump används för värmeåtervinning på en stor del av flödet (60-90 %) i ledningsnätet kan en större temperaturskillnad, upp till 2,5 °C, påvisas.
- Avloppsreningsverkens biologiska reningsprocesser är starkt temperaturberoende. Framförallt för kvävereningen är det kritiskt att en tillräckligt hög temperatur upprätthålls för att bibehålla prestanda och klara reningskraven. Inloppstemperaturen är den viktigaste faktorn för temperaturen i reningsbassängerna men inte allenarådande. Väder och omgivande förhållanden (solinstrålning, vind, lufttemperatur m.m.) tillsammans med energi från de biologiska reaktionerna påverkar också vattentemperaturen genom reningsverket. För Linköpings avloppsreningsverk visar mätningar och simuleringar att temperaturen ökar i genomsnitt 0,8 °C från inlopp till utlopp. Detta gör att en sänkning av inloppstemperaturen till en mindre del kompenseras av energitillskott på reningsverket och effekten i aktivt slamsteget är mindre än för inkommande vatten.
- Övergripande har ingen negativ påverkan av betydelse kunnat påvisas på kvävereningen vid simulering med värmeåtervinning. I de simulerade fallen med värmeåtervinning på fastighetsnivå i Linköping och Malmö har värmeåtervinning ingen signifikant påverkan på avloppsreningsverkets prestanda. Koncentrationerna av ammonium- och totalkväve är närmast oförändrade i utgående vatten. Inte heller med värmepumpar i ledningsnätet försämrats nitrifikationen på ett kritiskt sätt trots att temperatursänkningen är betydligt större.
- I Linköping är påverkan på utgående ammoniumkväve inte signifikant när värmeåtervinning simuleras men dynamiska effekter i kvävereningsprocesserna påvisas liksom en förhöjd nivå av utgående totalkväve när en generell temperatursänkning på 3 °C simuleras. I simuleringarna med ett generiskt reningsverk kopplat till Malmös ledningsnät är påverkan obetydlig sommartid men märkbar vintertid vid simulering av 90 % värmeåtervinning i ledningsnätet ($\text{NH}_4\text{-N} + 0,5 \text{ mg/l}$). För Käppalaverket, där endast reducerad avloppsvattentemperatur i tunnelsystemet simulerats, visar resultaten att en temperaturminskning i storleksordningen 3 °C ger en marginell ökning av utgående ammoniumkväve vintertid på 0,2 mg/l. Utgående krav på ammonium- och totalkväve överskrids ej.
- I detaljer och de mindre variationer som påvisats ger de tre fallstudierna alltså delvis olika utfall vilket visar att platsspecifika förutsättningar, såsom reningsverkets utformning och belastning, spelar viss roll för detta. I andra fall, med ett reningsverk

som i belastning och design ligger på gränsen för att upprätthålla kväverening och med en större temperatursänkning kan en mer signifikant påverkan tänkas uppkomma även om det inte påvisats i denna studie. Vidare kan den framtida kapacitetsgränsen för en anläggning reduceras vid minskad temperatur vilket, i samhällen med växande befolkning, kan innebära att en utbyggnad måste göras tidigare än vid högre temperatur.

- Modellen är detaljerad avseende avloppsvattnets temperatur och dess påverkan på avloppsreningens biologiska processer. Vissa fysikaliska processer i ledningsnät (inblandning av tillskottsvatten, fettansamling och svavelvätebildning) och på reningsverket (sedimentering av bioslam) kan i förekommande fall också påverka och påverkas av temperaturen vilket inte modellerats i denna studie.
- På många platser är det fördelaktigt ur ett systemperspektiv att värmeåtervinningen är högre vintertid – då övrigt värmebehov också är högt – än sommartid. Detta eftersom marginalproduktionen av energi (såväl fjärrvärme som el) är dyrare och har större miljöpåverkan vintertid än sommartid.
- Fallstudien i Linköping visar att värmeåtervinning i ett samhälle med heltäckande fjärrvärmesystem och kombinerad kraftvärmeproduktion för flerfamiljshus ger ökade växthusgasutsläpp med ca 63 g CO₂e/kWh återvunnen värme i det fallet.

6 Framtida forskning

6.1 Fastighet

Värdet, ekonomiskt och miljömässigt, av värmeåtervinning ur avloppsvatten är i hög grad avhängigt på lokala faktorer för varje installation. Detta gäller i hög grad för installationer i fastigheter (Pos. 1 eller 2). Exempelvis effektiviteten på vald utrustning, vilken värmesänka som används och vilket energislag som den där ersätter samt hur prismodellen ser ut för den energin. Fastighetsägare skulle vara betjänta av en vägledning i utformning av installationer för värmeåtervinning på platser där detta kan tillåtas och uppmuntras.

I projektet har tillämpningar, specifikationer och data för befintliga utrustningar för värmeåtervinning (V VX och HP) använts i simuleringarna. Konfigurationer och prestanda på utrustningen påverkar resultaten i hög grad. Effektiviteten för t.ex. V VX i fastigheter varierar mycket. Utveckling och innovation på detta område borde förbättra förutsättningarna för värmeåtervinning ur avlopp på fastighetsnivå. Baserat på tidigare erfarenheter har endast V VX inkluderats i studien för realistiska scenarier i fastigheter. Givet att robusta installationer av HP kan göras på fastighetsnivå så borde också scenarier med HP i Pos. 2 simuleras för att undersöka om det har en större påverkan på ARV än vad som påvisats med V VX i denna studie.

Ur ett vidare systemperspektiv borde nyttan med värmeåtervinning ställas mot insatsen att tillverka, installera och driva utrustningen. Med livscykelanalys kan miljöpåverkan från produktion av V VX och HP kvantifieras.

6.2 Ledningsnät

Utöver den väl beskrivna energibalansen i denna rapport finns det andra aspekter på hur avloppsvattnets temperatur påverkar ledningsnätet som inte har undersökts i detta projekt. Avloppsvattnet innehåller fett som i förekommande fall skapar problem såsom igensättning av ledningar och pumpstationer. Det vore av intresse att studera hur fettets reologi förändras när avloppsvattnets temperatur sjunker till följd av värmeåtervinning.

I ledningsnätet växer också olika mikroorganismer till beroende på förutsättningar. Bland annat heterotrofa bakterier som bryter ner organiskt material men även metan- och svavelvätebildande organismer under syrefria förhållanden. Likt dylika biologiska processer är dessa temperaturberoende och aktiviteten kan antas minska med sjunkande temperatur. I vilken omfattning den biologiska aktiviteten minskar och vad det betyder för den organiska belastningen på ledningsnätet samt bl.a. svavelvätebildning vore av intresse att studera.

Tillskottsvatten har erkänt stor påverkan på temperaturen på inkommande vatten till ARV. I detta projekt har grundflödet av tillskottsvatten vid torrväder inkluderats i simuleringarna men påverkan av snabba och kraftiga tillskottsvattenflöden vid regn och snösmältning har inte simulerats. Dessa flöden är beroende av ledningsnätets utformning (andelen kombinerat system osv.) och status, varför resultaten blir kraftigt plats-specifika. Simuleringar av fall med regnvädersflöden vore av intresse att studera i system med mycket dagvattenpåverkan. I regioner med kallare klimat och större snömängder, till exempel i norra Sverige, kan detta vara av än större intresse.

6.3 Reningsverk

I resultaten som presenterats ovan har nuvarande belastning och övriga förutsättningar antagits som indata i simuleringarna. Som beskrivits i Avsnitt 4.4.4 kan en reducerad temperatur påverka reningsverkets maximala kapacitet vilket får betydelse i fall där belastningen ökar. Simuleringar med framtidsscenarioer (prognostiserad belastningsökning etc.) där värmeåtervinning inkluderats vore av intresse för att utvärdera hur mycket reningskapaciteten minskar eller hur mycket tidigare en utbyggnad måste göras.

6.4 Systemperspektiv

För att göra en allomfattande hållbarhetsanalys i enlighet med ramverket från Urban Water Management (Malmqvist *et al.*, 2006) krävs utredningar av andra kriterier än de rent tekniska. Indirekt miljöpåverkan (yttre och kompensatoriska system) av olika alternativ bör utredas liksom samhällsekonomiska, hälsomässiga och brukaraspekter. Med detta underlag skulle en multikriterieanalys kunna utföras för att jämföra alternativen för värmeåtervinning i Pos. 1 till 4.

För att gynna tillämpning av värmeåtervinning i olika positioner skulle affärsmodeller kunna studeras och olika scenarier för befintliga utfall beskrivas som en vägledning. Nya affärsmodeller som gynnar samtliga aktörer skulle kunna föreslås där sådana kan identifieras. Ekonomiska förutsättningar är nära kopplat till juridiska begränsningar. Då dessa inte studerats närmare i detta projekt vore en djupare genomlysning och beskrivning på detta område behövligt.

Trenden mot cirkulär ekonomi gör att näringsämnen från avlopp, även kväve, i framtiden i större utsträckning kan komma att återvinnas. Antingen genom källsortering av avloppssystem vilket avlastar reningsverket, eller genom återvinning på reningsverket vilket avlastar de kväverenande processerna. Detta kan då minska eventuella problem med värmeåtervinning ur avlopp ytterligare. Denna kombinerade effekt skulle kunna analyseras genom ytterligare scenarier eller fallstudier.

Effekterna på energisystemet som redovisats i denna rapport är avgränsade till fjärrvärme från dagens kraftvärmeproduktion. Fallstudierna skulle kunna kompletteras med scenarier för alternativa system för värme i fastigheter och av varmvatten. Vidare skulle en serie framtidsscenarioer med radikalt annorlunda energiproduktion kunna analyseras. Samhället stävar efter att uppnå fossilfrihet eller till och med negativa utsläpp från energiproduktion. Det skulle kunna simuleras med den presenterade metodiken i framtida studier.

Referenser

- Abdel-Aal M., Smits R., Mohamed M., De Gussem K., Schellart A. and Tait S. (2014). Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Science and Technology* **70**(2), 297-306.
- Arnell M. (2016). *Performance assessment of wastewater treatment plants – Multi-objective analysis using plant-wide models*. Thesis PhD compilation, Department of Biomedical Engineering, Lund University, Lund, Sweden.
- Arnell M., Ahlström M., Wärrf C., Saagi R. and Jeppsson U. (2021). Plant-wide modelling and analysis of WWTP temperature dynamics for sustainable heat recovery from wastewater. *Water Science and Technology* **84**(4), 1023-1036.
- Arnell M., Lundin E. and Jeppsson U. (2017). *Sustainability analysis for wastewater heat recovery – Literature review*. Report TEIE-7267, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden.
- Arnell M. and Saagi R. (2020). *Modelling of heat recovery equipment*. Report TEIE-7280, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden.
- Beentjes I., Manouchehri R. and Collins M. R. (2014). An investigation of drain-side wetting on the performance of falling film drain water heat recovery systems. *Energy and Buildings* **82**, 660-667.
- Blomsterberg Å. (2015). *Rapport: Värmeåtervinning från spillvatten i flerbostadshus Etapp 1 – Teknikupphandling*, WSP Environmental, Malmö, Sweden.
- Ceconet D., Racek J., Callegari A. and Hlavinec P. (2020). Energy recovery from wastewater: A study on heating and cooling of a multipurpose building with sewage-reclaimed heat energy. *Sustainability* **12**(116), 1-11.
- Cipolla S. S. and Maglionico M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature. *Energy and Buildings* **69**, 122-130.
- Díez Soto P. (2015). *Improvement of the energy efficiency of a drain water heat exchanger*. Thesis M.Sc., Department of Building, Energy and Environmental Engineering, University College of Gävle, Gävle, Sweden.
- Dürrenmatt D. J. and Wanner O. (2008). Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science and Technology* **57**(11), 1809-1815.
- Energimyndigheten (2007). *Hushåll och energibeteende – En rapport om energi och miljömål*. Report ER 2007:19, Statens Energimyndighet, Eskilstuna, Sweden.
- Energimyndigheten (2020). *Energiläget 2020*. Report ET 2020:1, Statens Energimyndighet, Eskilstuna, Sverige.
- Geankoplis C. J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations*. P T R Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P. and Hultink E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* **143**, 757-768.
- Gernaey K. V., Jeppsson U., Vanrolleghem P. A. and Copp J. B. (2014). *Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants*. IWA Scientific and Technical Report No. 21, IWA Publishing, London, UK.

-
- Ghisellini P., Cialani C. and Ulgiati S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* **114**, 11-32.
- Gode J., Nilsson J., Ottosson J. and Sidvall A. (2019). *Klimatbedömning av energilösningar i byggnader – Pilotprojekt för test av verktyget Tidstegen*. Report B 2373, IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, Sverige.
- Golzar F., Nilsson D. and Martin V. (2020). Forecasting wastewater temperature based on artificial neural network (ANN) technique and monte carlo sensitivity analysis. *Sustainability* **12**(6386), 1-17.
- Hagberg M., Gode J., Lätt A., Ekvall T., Adolfsson I. and Martinsson F. (2017). Miljövärdering av energilösningar i byggnader (etapp 2) – Metod för konsekvensanalys. Rapport B 2282, IVL Svenska Miljöinstitutet, Stockholm, Sverige.
- Henze M., Harremoës P., la Cour Jansen J. and Arvin E. (2002). *Wastewater treatment: Biological and chemical processes*. Springer Science and Business Media, Berlin, Germany.
- Hepbasli A., Biyik E., Ekren O., Gunerhan H. and Araz M. (2014). A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. *Energy Conversion and Management* **88**, 700-722.
- Hjerpe M. and Krantz H. (2006). Individuell mätning av vatten – Om hushållens respons och praktikerns överväganden. *Vatten – Journal of Water Management and Research* **62**(1), 83-90.
- IPCC (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jonsson R., Sundén T., Bengtsson L. and Kristoffersson J. (2020). *Värmeåtervinningssystem för spillvatten i flerbostadshus [Systems for heat recovery from wastewater in multi-family houses (in Swedish)]*, Sustainable Innovation AB, Stockholm, Sweden.
- Knoop S. and Kunst S. (1998). Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella*. *Water Science and Technology* **37**(4-5), 27-35.
- Larsen T. A. (2015). CO₂-neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective. *Water Research* **87**, 513-521.
- Lingsten A. and Lundkvist M. (2008). *Nulägesbeskrivning av VA-verkens energianvändning*. Report SVU 2008-01, The Swedish Water and Wastewater Association, Vatten S, Stockholm, Sweden.
- Malmqvist P. A., Heinicke G., Kärrman E., Stenström T. A. and Svensson G. (2006). *Strategic planning of sustainable urban water management*. IWA Publishing, London, UK.
- Mangold M., Morrison G., Harder R., Hagbert P. and Rauch S. (2014). The transformative effect of the introduction of water volumetric billing in a disadvantaged housing area in Sweden. *Water Policy* **16**(5), 973-990.
- Mathworks (2021). Boxplot. <https://se.mathworks.com/help/stats/boxplot.html> (accessed 31 maj 2021).
- McNabola A. and Shields K. (2013). Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower drains. *Energy and Buildings* **59**, 44-49.
-

-
- Monod J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Reviews in Microbiology* **3**(1), 371-394.
- Olsson G. (2012). *Water and Energy – Threats and Opportunities*. IWA Publishing, London, UK.
- Olsson G. (2018). *Clean Water Using Solar and Wind: Outside the Power Grid*. IWA Publishing, London, UK.
- Panasiuk O., Hedstrom A., Langeveld J., de Haan C., Liefiting E., Schilperoort R. and Viklander M. (2019). Using distributed temperature sensing (DTS) for locating and characterising infiltration and inflow into foul sewers before, during and after snow-melt period. *Water* **11**(8), Article: 1529.
- Reyes D. (2019). *Modeling heat recovery from urban wastewater systems – Case study from Malmö*. Thesis M.Sc., Water and Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lund University, Lund, Sweden.
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F. S., Lambin E. F., Lenton T. M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H. J., Nykvist B., de Wit C. A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P. K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R. W., Fabry V. J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P. and Foley J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* **461**(7263), 472-475.
- Saagi R. and Arnell M. (2021). *Upstream heat recovery impacts on Käppala WWTP performance – Model based analysis combining sewer tunnel and WWTP*. Report TEIE-7282, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden.
- Saagi R., Arnell M., Reyes D., Wärff C., Ahlström M. and Jeppsson U. (2021). Modelling temperature dynamics in sewer systems – Comparing mechanistic and conceptual modelling approaches. *Water Science and Technology* **84**(9), 2335–2352.
- Saint-Venant A. J. C. B. (1870). Démonstration élémentaire de la formule de propagation d'une onde ou d'une intumescence dans un canal prismatique; et remarques sur les propagations du son et de la lumière, sur les ressauts, ainsi que sur la distinction des rivières et des torrents. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* **71**, 186-195.
- SCB (2018). Antal lägenheter efter region, hustyp, lägenhetstyp och år. Statistiska Centralbyrån (ed.), <http://www.statistikdatabasen.scb.se>.
- Sin G., Gernaey K. V., Neumann M. B., van Loosdrecht M. C. M. and Gujer W. (2009). Uncertainty analysis in WWTP model applications: A critical discussion using an example from design. *Water Research* **43**(11), 2894-2906.
- Sitzenfrei R., Hillebrand S. and Rauch W. (2017). Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems. *Water Science and Technology* **75**(5), 1243-1250.
- Swedish Energy Agency (2009). *Mätning av kall- och varmvattenanvändning i 44 hushåll [Measurements of cold and hot water use in 44 households (in Swedish)]*. Report ER 2009:26, Swedish Energy Agency, Eskilstuna, Sweden.
- United Nations (2015). Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: A/RES/70/1 – Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, New York, NY, USA, 1-35.
- Wallin J. (2017). *Utökad studie av effektivitet värmeväxlare avloppsåtervinning – Vasagatan 7 Stockholm*, Beställargruppen lokaler (BELOK), Stockholm, Sverige.
-

-
- Wallin J. and Claesson J. (2014). Investigating the efficiency of a vertical inline drain water heat recovery heat exchanger in a system boosted with a heat pump. *Energy and Buildings* **80**, 7-16.
- Wärff C. (2020). *Household wastewater generation model*. Report TEIE-7279, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, Sweden.
- Wärff C., Ahlström M. and Arnell M. (2020a). *Processmodellering av avloppsreningsverk – Kunskapsspridning om ett kraftfullt verktyg för drift och design*. Report SVU 2020-3, Svenskt Vatten AB, Stockholm, Sverige.
- Wärff C., Arnell M., Jeppsson U. and Sehlén R. (2020b). Modelling heat recovery potential from household wastewater. *Water Science and Technology* **81**(8), 1597-1605.
- Wilen B. M., Lumley D., Mattsson A. and Mino T. (2010). Dynamics in flocculation and settling properties studied at a full-scale activated sludge plant. *Water Environment Research* **82**(2), 155-168.
- Zhang W. J., Yang P., Xiao P., Xu S. W., Liu Y. Y., Liu F. and Wang D. S. (2015). Dynamic variation in physicochemical properties of activated sludge floc from different WWTPs and its influence on sludge dewaterability and settleability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **467**, 124-134.

Bilagor

Bilaga A Parametrar för osäkerhetsanalysen

I Tabell A.1 listas alla variabler som inkluderades i osäkerhetsanalysen för den systemövergripande simuleringsstudien. Varje variabel eller värde har varierats $\pm 25\%$. För simuleringarna har värden för alla variabler i osäkerhetsanalysen genererats medelst modifierad "Latin Hypercube Sampling" (LHS) som tar hänsyn till korrelationer mellan variablerna. Ett jämnt fördelat spann för osäkerheten i varje variabel har antagits. Totalt sett genererades 300 kombinationer (uppsättningar av variabelvärden) för varje scenario varvid Monte Carlo-simuleringar har gjorts för varje uppsättning, d.v.s. 3 000 simuleringar för alla scenarier. Dessa simuleringar har utförts på Lunds universitets datorcenter LUNARC (Center for scientific and technical computing at Lund University).

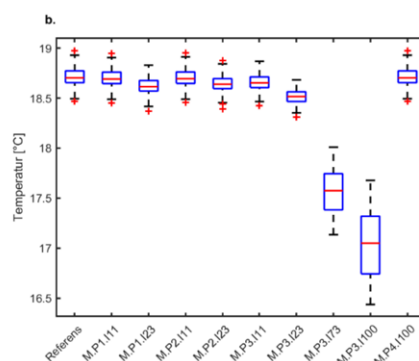
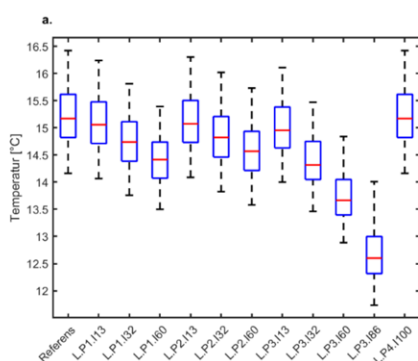
Parameter	Standardvärde
Mean soil temperature (T_{mean})	5 °C
Heat transfer coefficient from wastewater to in-sewer air (h_{wa})	10 W/m ² .K
Thermal conductivity of concrete pipe (k_p)	5 W/m.K
Thermal conductivity of soil (k_s)	3 W/m.K
Pipe thickness (w_t)	0.15 m
Soil depth for heat transfer (d_s)	0.5 m
Reaction enthalpy for COD degradation (e_{cod})	14 x 10 ⁶ J/kg COD
COD degradation rate in sewers (r_{cod})	1 x 10 ⁻⁶ kg/m ³ .s
Overall heat transfer factor (h_{sewer})	2 500 W/K
n_{flow}	0.8
K_{res}	700 d ⁻¹
Efficiency of heat exchanger at household level (ϵ)	0.49
Efficiency of heat exchanger at showers (ϵ)	0.52
Coefficient of performance for heat pumps at precinct level (COP)	5.9
Coefficient of performance for heat pumps at WWTP (COP _{WWTP})	3
Total volume of activated sludge reactors	13 340 m ³
Primary clarifier volume	6 200 m ³
Secondary clarifier area	4 956 m ²

Tabell A.1

Parametrar som varierades i osäkerhetsanalysen.

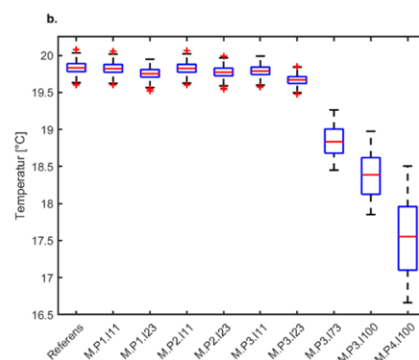
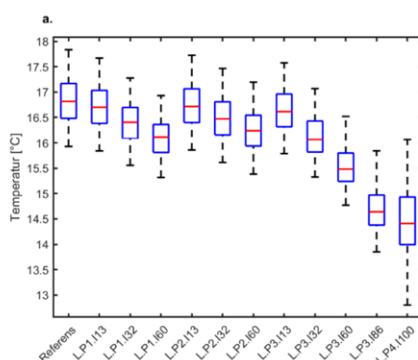
Bilaga B Kompletterande simuleringsresultat för systemövergripande scenarier

I denna bilaga redovisas kompletterande resultat för perioder med varmare vatten från de systemövergripande simuleringarna för fallstudierna i Linköping och Malmö. Figur B1, B2 och B3 kompletterar Figur 4.7, 4.11 respektive 4.12 i rapporten.



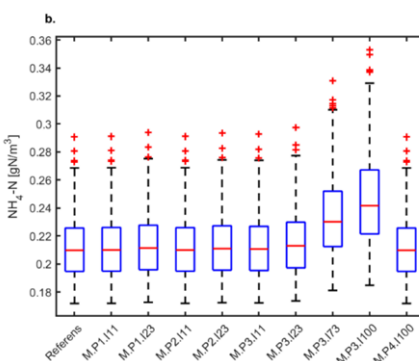
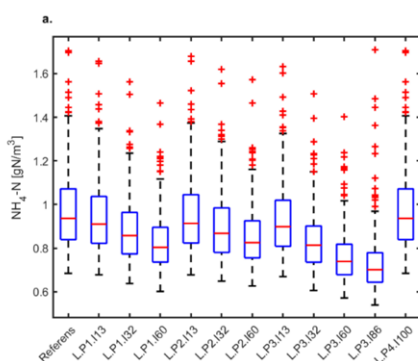
Figur B.1

Genomsnittlig inkommande avloppsvattentemperatur: a) Linköpings ARV, 15 april-6 maj och b) Sjölanda ARV, 8 juni-28 juli. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall och staplarna markerar 95 % konfidensintervall.



Figur B.2

Genomsnittlig utgående avloppsvattentemperatur a) Linköpings ARV, 15 april-6 maj och b) Sjölanda ARV, 8 juni-28 juli. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall och staplarna markerar 95 % konfidensintervall.

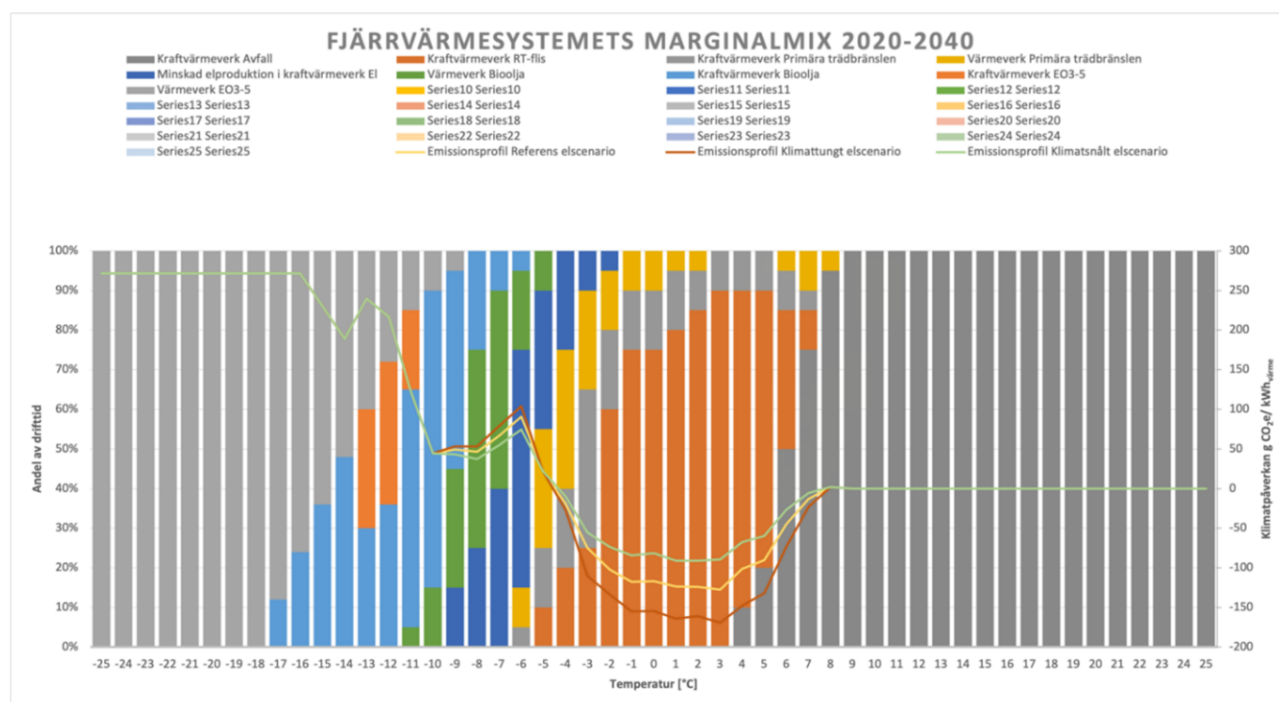


Figur B.3

Genomsnittlig utgående ammoniumkoncentration a) Linköpings ARV, 15 april-6 maj och b) Sjölanda ARV, 8 juni-28 juli. Röd linje markerar medelvärde för alla simuleringar med varierande parametervärden, blå box markerar 25 resp. 75 % intervall, staplarna markerar 95 % konfidensintervall och röda kors är avvikande värden (outliers).

Bilaga C Kompletterande resultat för integrerad simulering av fastighetsnära värmeåtervinning och kraftvärmeproduktion

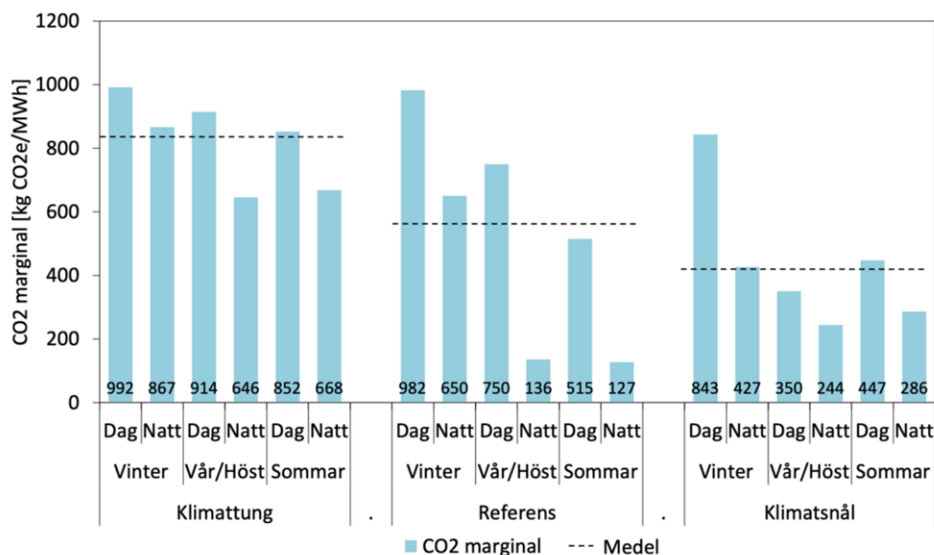
För simuleringarna av kraftvärmeproduktionen i Linköping har en bränslemix antagits för Tekniska Verken's alla anläggningar i Linköping. Bränslemixen och dess fördelning vid olika temperaturfall illustreras i Figur C. (s.k. trasmattan). Vid temperaturer över ca. 7 °C används primärt avfall vilket räknas som noll (o) i växthusgasutsläpp i modellen. Från ca. -5 °C används en bränslemix som har ett så högt växthusgasutsläpp att en minskad värmeanvändning ger ett netto minskat växthusgasutsläpp. Det vill säga att CO₂-utsläppen för den lokala värmeproduktionen minskar mer till följd av värmeåtervinning än resulterande ökning i utsläpp för den kompensatoriska elproduktionen.



Figur C.1

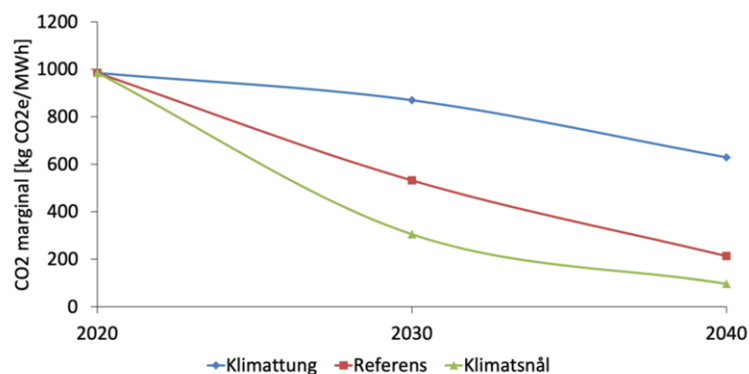
Trasmattan – en illustration över bränslemixen i Tekniska Verken i Linköpings olika produktionsanläggningar för värme och kraftvärme vid olika temperaturfall (staplarna) samt utsläppsprofilen för koldioxidekvivalenter (CO₂e) vid resp. bränslemix.

Tre scenarier för växthusgasutsläpp från extern elproduktion har simulerats (Hagberg *et al.*, 2017). De specifika växthusgasutsläppen för marginalemixen varierar i simuleringarna över dygn och säsong (Figur C.2) och år (Figur C.3).



Figur C.2

"CO₂e emissionsfaktorer för marginalet per tidssteg över tidsperioden (2020-2040) som helhet för respektive elscenario. Streckade linjer avser medelvärdet på el-marginalens klimatpåverkan beräknad över alla tidssteg och hela tidsperioden 2020-2040." Figur 5.6 från Hagberg et al. (2017).

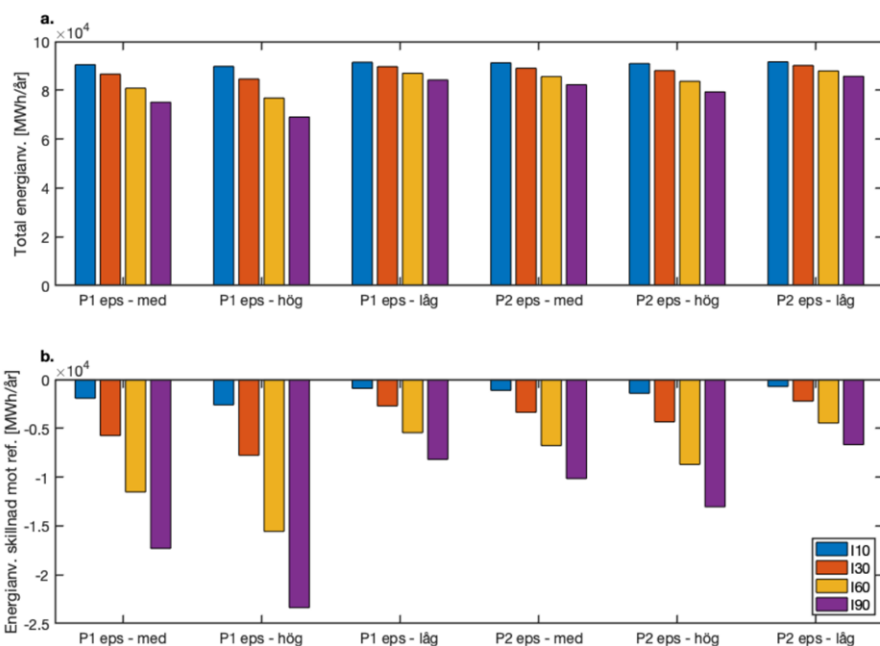


Figur C.3

"Årsvisa medelvärderna för elens CO₂e -marginal för respektive scenario." Figur 5.5 från Hagberg et al. (2017).

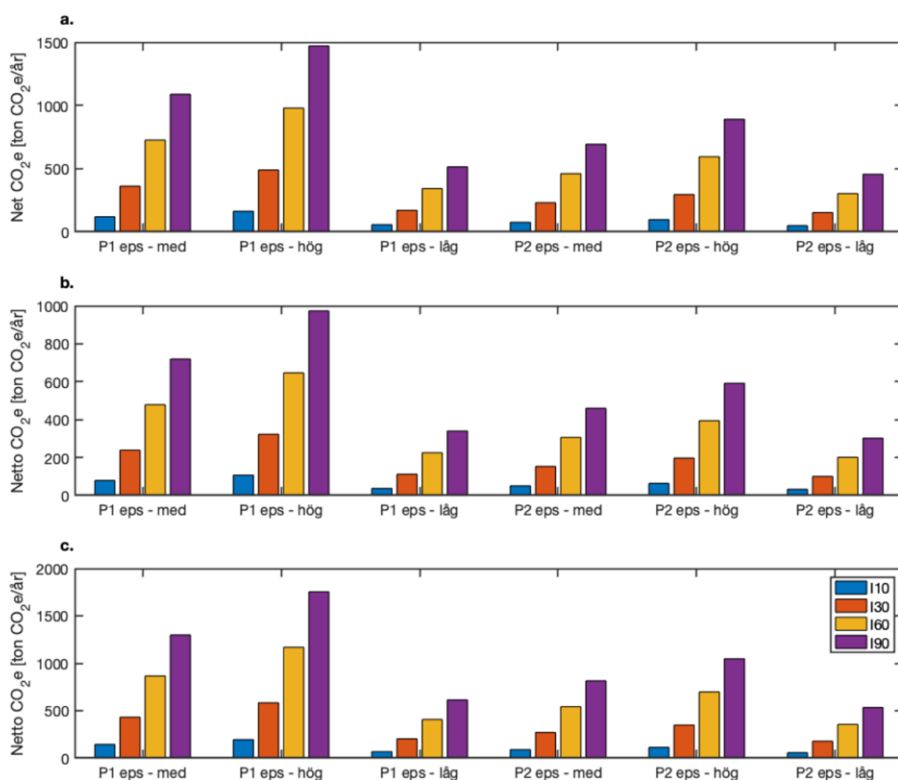
I komplement till resultaten redovisade i rapporten (Avsnitt 4.5.1) redovisas i Figur C.4 och Figur C.5 nedan motsvarande resultat för scenarier simulerade med en lägre respektive högre effektivitet för värmeväxlarna som används för värmeåtervinning ur avlopp i fastigheter (jfr. Tabell 3.1 i Avsnitt 3.6.1). Följande värden för ϵ användes i simuleringarna: Pos. 1: 0,24-0,69 och Pos. 2: 0,23-0,45. För nettoskillnad i emission av CO₂e redovisas i Figur C.5b och c även värden simulerade med en lägre respektive högre antagen emissionsfaktor för marginal-el.

Figur C.6 visar resultatskillnaden för Tekniska Verken i Linköping inkluderat variationen i värmeväxlareffektivitet.



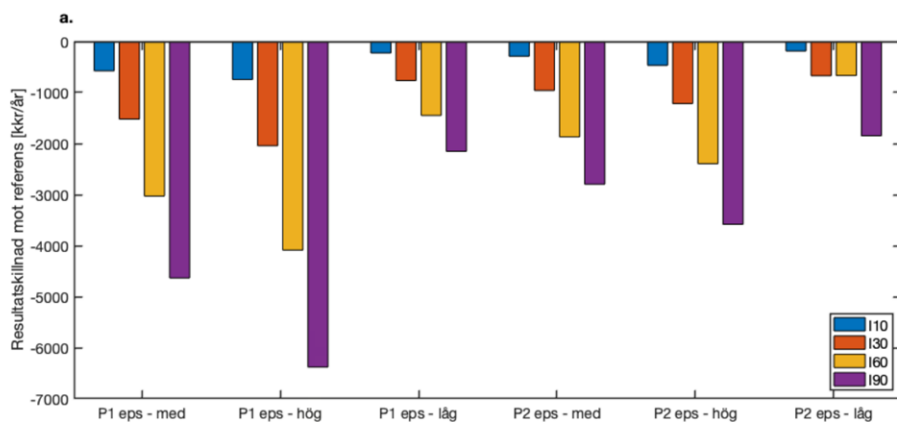
Figur C.4

Total energianvändning för simulerade byggnadslösningar (a) och skillnad mot referensfallet (b).



Figur C.5

Nettoskillnad av direkta och indirekta växthusgasutsläpp från energisystemet till följd av värmeåtervinning med simulerade alternativ: a) Referens elscenario; b) Klimatlätt elscenario; och c) Klimattungt elscenario.



Figur C.6

Förändring i rörliga produktionskostnader för kraftvärmeproduktion vid Tekniska Verken i Linköping med simulerade alternativ.

Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se