



OsloMet – storbyuniversitetet

Institutt for Bygg- og energiteknikk

Postadresse: Postboks 4 St. Olavsplass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

GRUPPE NR

17

TILGJENGELIGHET

Åpen

Telefon: 67 23 50 00

www.hioa.no

MASTEROPPGAVE

OPPGAVENS TITTEL Fra gråvann til varmtvann	DATO 23.05.2018
	ANTALL SIDER / VEDLEGG 70 / 6
FORFATTER Ottar Sprakehaug Øvrevik	VEILEDER Tor Arvid Vik (OsloMet)

UTFØRT I SAMARBEID MED Rambøll	KONTAKTPERSON Guillermo Duran Moro
-----------------------------------	---------------------------------------

SAMMENDRAG

Gråvann er den største og varmeste spillvannstrømmen fra boliger. Årlig forsvinner store mengder termisk energi ut av bygningen sammen med gråvannet. I dag gjøres det lite for å redusere dette tapet.

I dette arbeidet ble potensialet ved å gjenvinne varme fra gråvann i en norsk boligblokk undersøkt. Første del av arbeidet bestod av en litteraturstudie, hvor målet var å kartlegge vannforbruk- og temperaturer. Med bakgrunn fra funn i litteraturen ble et typisk vannforbruk anslått til 145 l/pd. Av dette utgjorde varmtvann 51 l/pd. Gråvann ble estimert til 100 l/pd, eller 69 % av det totale vannforbruket. Timesverdier ble anslått på bakgrunn av funn i litteraturen og standardiserte verdier i SN/TS 3031:2016.

Beregningsstudien undersøkte et system med kombinert passiv og aktiv varmegjenvinning for oppvarming av tappevann i en fiktiv boligblokk med 150 beboere. Resultatene viste at en årlig COP på 2,5 til 4,9 kunne oppnås for varmepumpa ved forvarmingstemperaturer mellom 35 og 65 grader. Varmegjenvinning på bygningsnivå kan gi en energibesparelse på opp mot 70 %, og redusere de årlige energikostnadene med rundt 64 % sammenlignet med fjernvarme. Nåverdien av besparelsen ble estimert til mellom 622 000 og 943 000 kroner. En forvarmingstemperatur på 35 grader ga størst besparelse per kW installert effekt. Variabel gråvannskaraktistikk hadde vanskeligere for å påvirke varmepumpas COP når forvarmingstemperaturen var høy. Samtidig viste konfigurasjon med høy forvarmingstemperatur og lav COP seg å være mer følsom for forandringer av energipriser. Resultatene viste også at en endring av gråvannets temperatur på noen få grader kan påvirke COP, og dermed energibesparelsen, med flere prosent.

STIKKORD

Gråvann
Varmegjenvinning
Boligblokk

Prosjektbeskrivelse

Tittel: Fra gråvann til varmtvann
Veileder intern: Tor Arvid Vik (OsloMet)
Veileder ekstern: Guillermo Duran Moro (Rambøll)
Samarbeid: Rambøll

Bakgrunn

Byggsektoren står alene for rundt 40 % av det totale energiforbruket i Norge, og store deler av dette er direkte relatert til oppvarming og kjøling av bygninger. Skjerpede forskrifter, med krav til tettere og bedre isolerte bygninger med lavere energibehov enn tidligere, er noen av tiltakene i kampen mot klimaendringene. Kravene kan være krevende å oppnå, og er en utfordring prosjekterende ingeniører står ovenfor daglig. Dette gjør at stadig mer innovative løsninger må tas i bruk.

Masteroppgaven tar for seg et prinsipp som er lite utbredt i boligbygninger i Norge - varmegjenvinning av gråvann. Store boligkomplekser, gjerne flere boligblokker med felles underetasje, produserer store mengder gråvann hver dag. I dag føres dette vanligvis ut av bygget som et rent varmetap. Oppvarming av varmt forbruksvann er dessuten en betydelig energipost, og utgjør rundt 13 % av det totale energiforbruket i en gjennomsnittlig europeisk bolig. I moderne, godt isolerte bygninger kan oppvarming av tappevann utgjøre så mye som 50 % av det totale varmebehovet.

Varmen i gråvannet kan potensielt utnyttes til oppvarming av nytt vann, og kan dermed være med på å redusere energibruken i et bygg.

Hovedmål

Hensikten med oppgaven er å undersøke om et system som gjenvinner gråvannsvarme kan være en god fremtidig løsning i større boligblokker, hvor produksjonen av gråvann er høy. Områder som skal belyses er utforming og robusthet, energigevinst, og lønnsomhet.

Oppgavens hovedfokus vil være aktiv varmegjenvinning med varmepumpe, eller kombinasjonsløsninger hvor både aktiv og passiv varmegjenvinning utnyttes.

Delmål

- Anslå varmtvannsbehov- og forbruk gjennom døgnet i boligblokker.
- Undersøke temperaturnivåer og vannmengder på gråvann gjennom døgnet.
- Undersøke kvaliteten på gråvann og hvilke konsekvenser dette får for valg og utforming av varmeveksler og vedlikehold.
- Undersøke erfaringer fra litteratur og eksisterende anlegg.
- Optimalisere et system ved hjelp av simulering.
- Optimalisering: system konfigurasjon. Hvordan legge opp systemet i forhold til størrelse, antall tanker, antall varmepumper, produserer romvarme eller tappevann eller begge deler. Passiv, aktiv eller kombinasjonsløsning. Størrelse på tankene på hver side av varmepumpa.

Metode

I forbindelse med oppgaven skal det lages en simuleringsmodell for et større boligkompleks, bestående av flere boligblokker med felles underetasje. Simuleringsprogrammet IDA ICE skal brukes for å simulere energibehov- og bruk. I tillegg skal programmet MOBO benyttes sammen med IDA ICE for å undersøke optimale system-sammensetninger og lønnsomhet.

For at oppgavens beregninger og simuleringer skal kunne gi troverdige resultater, er det avgjørende med gode inndataverdier. Spesielt viktig er det å kartlegge tilgjengeligheten av varmekilden; gråvann. Det legges derfor vekt på å oppdrive realistiske data for vannmengder, temperaturnivåer og temperaturvariasjoner for gråvannet. Dette skal underbygges gjennom en litteraturstudie og erfaringstall fra bransjeaktører. Eventuelt også fra måldata hvis dette er mulig å oppdrive.

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på mitt fem år lange studie på energi og miljø i bygg på OsloMet. Arbeidet med oppgaven ble utført i løpet av vårsemesteret i 2018.

Årene på energi og miljø-studiet har gitt meg en solid grunnlagsbase som jeg nå ser frem til å ta i bruk når jeg skal ut i jobb til høsten.

Arbeidet med masteroppgaven har vært en erfaringsrik prosess. Jeg har vært heldig som har fått jobbe med et tema som både opptar meg, og som jeg tenker er relevant for årene som kommer. Ved å velge et innovativt tema går man sjelden igjennom arbeidsprosessen uten å møte på utfordringer. Noen ganger må man derfor ta to skritt tilbake, for å kunne ta ett skritt frem. Ved å gjøre det har jeg utvidet horisonten, sett styrker og svakheter ved ulike veivalg, og tatt beslutninger ut i fra det. Alt i alt har denne masteroppgaven gjort meg bedre rustet til å gå ut i arbeidet som ingeniør og problemløser.

Jeg ønsker å takke mine veiledere Tor Arvid Vik og Guillermo Duran Moro.

Jeg ønsker i tillegg takke Habtamu Bayera Madessa for interesse i arbeidet, og nyttige innspill.

Ottar S. Øvrevik
Oslo, 23. mai 2018

Sammendrag

Hvert år forsvinner store mengder energi ut av bygninger sammen med avløpsvannet. Termisk energi representerer omtrent 80 % av denne energimengden, og kan utgjøre mellom 80 og 90 % av det som trengs for å produsere nytt varmtvann. Spillvann fra en bygning kan deles inn i gråvann og svartvann, hvorav svartvannet er kloakk fra toaletter. Gråvannet omfatter resten av bygningens spillvann, og innebærer den største andelen. Det har også høyest temperatur.

Målet med dette arbeidet var å kartlegge potensialet ved lokal varmegjenvinning av gråvann i boligblokker. Dette skulle i hovedsak vurderes ved hjelp av en teoretisk litteraturstudie, i tillegg til resultater fra beregninger og en enkel vurdering av lønnsomhet.

Gjennom litteraturstudiet ble det anslått et spesifikt vannforbruk på rundt 145 l/pd. Varmt tappevann ble estimert til omtrent 51 l/pd, mens gjennomsnittlig gråvannsmengde var omtrent 100 l/pd. Varmtvann og gråvann utgjorde henholdsvis 35 og 69 % av det totale vannforbruket. Gråvannets temperatur ble anslått til å ligge mellom 20-30 grader. Forbruksprofiler ble anslått på bakgrunn av funn i litteraturen og standardiserte verdier i SN/TS 3031:2016.

Beregningsstudien ble utført for en fiktiv boligblokk med 150 beboere. Valgt system utnyttet både passiv og aktiv varmegjenvinning for produksjon av tappevann. Resultatene viste at varmepumpa kunne oppnå en årsvarmefaktor mellom 2,5 og 4,9 for forvarmingstemperaturer mellom 65 og 35 grader. Resultatene viste dessuten at varmegjenvinning på bygningsnivå kan gi en energibesparelse på opp mot 70 %, og redusere de årlige energikostnadene med rundt 64 % sammenlignet med fjernvarme.

Lønnsomhetsanalysen viste at nåverdien til besparelsen var størst, 943 000 kroner, når anlegget stod for hele tappevannsoppvarmingen. Laveste besparelse var 622 000 kroner, for en forvarmingstemperatur på 35 grader. Sistnevnte ga derimot omtrent dobbelt så stor besparelse i forhold til nødvendig installert effekt på varmepumpa. Resultatene viste også at variabel gråvannskaraktistikk hadde vanskeligere for å påvirke varmepumpas COP når forvarmingstemperaturen var høy. Samtidig har konfigurasjon med høy forvarmingstemperatur og lav COP vist seg å være mer følsom for forandringer av energipriser. Resultatene viste også at en endring av gråvannets temperatur på noen få grader kan påvirke COP og energibesparelsen med flere prosent.

Summary

Each year, large amounts of energy disappear from buildings along with the wastewater. Thermal energy stored within the water represents about 80% of this energy and can account for between 80 and 90% of the energy needed to produce domestic hot water. Wastewater from buildings can be divided into greywater and blackwater, of which blackwater is sewage from toilets. Greywater includes the rest of the building's wastewater and accounts for the largest proportion. It also has the highest temperature.

The aim of this work was to map the potential of heat recovery of greywater in apartment buildings. Methods used involved a literature study as well as calculations, and a simple assessment of profitability. Through the literature study, a specific water consumption of around 145 l/pd was estimated. Hot tap water was estimated to account for about 51 l/pd, while the average greywater amount was about 100 l/pd. Hot tap water and greywater accounted for 35 % and 69 % of total water consumption respectively. The greywater temperature was estimated to 20-30 degrees. Due to scarcity of Norwegian literature concerning consumption patterns, hot water consumption profiles for weekdays and weekends was based on hourly values found in SN/TS 3031:2016. This was then compared and adapted to results found in relevant literature.

The calculations were conducted for a fictional apartment building with 150 residents. The chosen system consisted of both a heat exchanger and a heat pump, which was used for production of domestic hot water. The results showed that the heat pump could achieve an annual COP between 2.5 and 4.9 for preheating temperatures between 65 and 35 degrees. The results also showed that heat recovery at building level could provide energy savings of up to 70 % and reduce annual energy costs by around 64% when compared to district heating. The profitability analysis showed that the present value of the savings was highest, 943 000 NOK, when the heat recovery system was responsible for the entire tap water heating. The lowest saving was 622 000 NOK, for a preheating temperature of 35 degrees. The latter, however, accounted for about twice as high savings in relation to the required heat pump power. The results also showed that variable greywater characteristics made a lesser impact on the COP of the heat pump when the preheat temperature was high. At the same time, high preheating temperatures and low COP was shown to be more sensitive to changes in energy prices. The results also showed that a few degrees

variation in the greywater temperature could affect COP and energy savings by several percent.

1	INNLEDNING	1
1.1	Oppgavens bakgrunn	1
1.2	Hensikt	2
1.3	Begrensninger	2
2	VANN- OG ENERGIFORBRUK	3
2.1	Varmtvann.....	4
2.2	Spillvann.....	8
2.2.1	Gråvannskarakteristikk og kvalitet	8
3	VARMEGJENVINNING	11
3.1	Passiv gjenvinning	13
3.1.1	Prinsipper	14
3.1.2	Vannforurensning, belegg og biofilm	16
3.2	Aktiv gjenvinning	17
3.2.1	Kuldemedium	18
3.2.2	COP.....	18
3.2.3	Tilgjengelig teknologi	20
3.2.4	Erfaringer fra litteratur	21
4	METODE	23
4.1	Estimert forbruk og energipotensiale	23
4.1.1	Forutsetninger.....	24
4.2	Beregningsstudie.....	26
4.2.1	Systemløsning	26
4.2.2	Regulering av varmeuttak	28
4.2.3	Varighet.....	31
4.3	Lønnsomhet	32
4.4	Sensitivitet og usikkerhet	33
5	RESULTATER OG DISKUSJON	34
5.1	Litteraturstudie.....	34
5.1.1	Vannforbruk i husholdninger	34
5.1.2	Varmtvann.....	36

5.1.3	Gråvann.....	42
5.2	Estimert forbruk.....	46
5.2.1	Varmtvann og totalt vannforbruk.....	46
5.2.2	Gråvannsmengder.....	47
5.2.3	Gråvannstemperatur.....	48
5.2.4	Forbruksmønster.....	48
5.2.5	Usikkerhet.....	55
5.3	Beregningsstudie.....	57
5.3.1	Energibesparelse	60
5.3.2	Årlig kostnadsbesparelse	61
5.3.3	Nåverdi av energibesparelse.....	61
5.3.4	Sensitivitet og usikkerhet	63
6	KONKLUSJON	69
7	VIDERE ARBEID	71
8	KILDER	72
9	VEDLEGG	78

Nomenklatur

<u>Symbol</u>	<u>Forklaring</u>	<u>Enhet</u>
C_p	Spesifikk varmekapasitet	[J/kg*K]
\dot{v}	Volumstrøm	[m ³ /s]
\dot{m}	Massestrøm	[kg/s]
ρ	Densitet / tetthet	[kg/m ³]
ε	Temperaturvirkningsgrad	[-]
COP	Effektfaktor	[-]
COP_{Carnot}	Teoretisk maksimal effektfaktor	[-]
$SCOP$	Årsvarmefaktor	[-]
n_{II}	Carnot-virkningsgrad / second law efficiency	[-]

Forkortelser

<u>Forkortelse</u>	<u>Forklaring</u>
l/pd	Liter per person per dag
kWh	Kilowatttime
MWh	Megawatttime

1 INNLEDNING

1.1 Oppgavens bakgrunn

Det økende energibehovet i verdenssamfunnet er en stadig større utfordring med hensyn til klimaendringer og energiproduksjon. Byggsektoren står alene for rundt 40 % av det totale energiforbruket i Norge, og store deler av dette er direkte relatert til oppvarming og kjøling av bygninger. Mer energieffektive bygg er et viktig tiltak i kampen mot klimaendringene. For å oppnå dette, stilles det stadig strengere krav til tette bygninger med lite varmetap og høy grad av varmegjenvinning. Varmegjenvinning av avtrekksluft er i dag en selvfølge i de fleste bygg. Det er derimot ikke krav til gjenvinning av varme fra spillvann.

Oppvarming av forbruksvann er en betydelig energipost, og utgjør rundt 13 % av det totale energiforbruket i en gjennomsnittlig europeisk bolig. Moderne, godt isolerte bygg har et lavere energibehov enn eldre bygg totalt sett. Her utgjør oppvarming av tappevann en større andel av det totale varmebehovet enn tidligere – gjerne opp mot 50 %. Gråvann, som kan holde 20-40 grader, renner vanligvis rett ut i avløpsrørene og den termiske energien i vannet går tapt.

Energien i gråvannet kan utnyttes passivt i en varmeveksler, eller aktivt med varmepumpe. På den måten går mindre av energimengden i vannet tapt, og byggets energibruk til oppvarming av tappevann kan reduseres. Ideen er ikke ny, og det finnes eksempler på flere velfungerende varmepumpeanlegg som har blitt installert de siste årene. De fleste av disse har derimot blitt installert i forbindelse med større svømme- og spaanlegg, og ikke i boligbygg.

Å gjenvinne varme fra gråvann kan by på utfordringer. Gråvannet inneholder fett, såperester og andre forurensninger som bidrar til å skape avleiringer og belegg i varmevekslere når vannet kjøles ned. Dette reduserer varmeoverføringen og dermed systemets ytelse. Tilpassede komponenter og effektivt vedlikehold er derfor avgjørende for stabil drift.

En annen utfordring er å anslå gråvannets karakteristikk. Hvis en varmepumpe skal få gode driftsforhold bør den ha jevn og god tilgang på varmekilden den jobber mot. I boligbygninger er varmtvannforbruket ujevnt, med forbrukstopper morgen og kveld. Dette gjør at nødvendig

akkumuleringsvolum og drift av varmepumpen må kartlegges hvis anleggets ytelse skal kunne forutses.

1.2 Hensikt

Hensikten med dette arbeidet var å undersøke potensialet ved lokal varmegjenvinning fra gråvann i boligblokker.

Avgjørende faktorer for potensialet ble i dette tilfellet delt inn i to underkategorier: de som i liten grad påvirkes, og de som i stor grad påvirkes av valgt gjenvinningsløsning. Førstnevnte innebærer faktorer som gråvannets karakteristikk og variasjoner. Dette ble forsøkt kartlagt gjennom en litteraturstudie, og danner den ene delen av resultatene i rapporten.

Faktorer som i stor grad påvirkes av valgt gjenvinningsløsning, er blant annet hvor mye energi som gjenvinnes, energibesparelsen som oppnås, og systemvirkningsgrader. Dette ble undersøkt for en valgt systemløsning gjennom en beregningsstudie, og danner den andre delen av rapportens resultater.

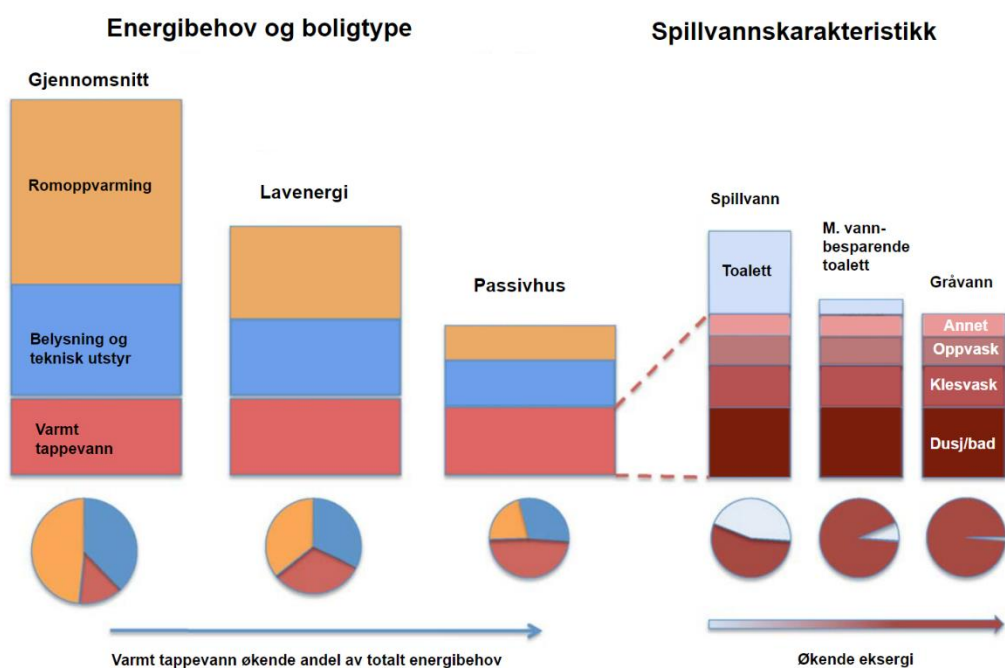
1.3 Begrensninger

Hovedfokuset i dette arbeidet har vært gjenvinning av varme fra gråvann. Konfigurasjoner og løsninger for varmegjenvinning fra andre former for avløpsvann har derfor i stor grad blitt utelatt. I tillegg stod boligblokker i fokus. Andre bygningskategorier dekkes derfor ikke i rapporten. Andre begrensninger, forenklinger eller forutsetninger presenteres i løpende tekst underveis i rapporten.

2 VANN- OG ENERGIFORBRUK

Hvert år forsvinner store mengder energi ut av bygninger sammen med avløpsvannet [1]. Termisk energi fra varmt forbruksvann representerer rundt 80 % av denne energimengden, og kan utgjøre mellom 80 og 90 % av energien som behøves for å produsere nytt varmtvann [2, 3]. Til tross for et økende fokus på energieffektivisering i byggsektoren, er fortsatt utnyttelse av varmen i spillvann lite vanlig i norske boliger.

Energi til oppvarming av varmt forbruksvann står for rundt 14 % av det totale energiforbruket i en gjennomsnittlig europeisk bolig [4, 5]. Moderne, godt isolerte bygninger har et lavere energibehov enn eldre bygg totalt sett. Her utgjør oppvarming av tappevann en større andel av det totale varmebehovet enn i eldre bygninger – gjerne opp mot 50 % [6-8]. Dette illustreres i Figur 1, som viser økningen av varmtvannets energiandel i bygninger med ulike energinivåer.



Figur 1: Kategorisert energibehov i ulike bygningstyper. Størrelsen på delpostene er ikke direkte representative, men gir et bilde av varmtvannets økende andel av totalt energibehov (t.v.). Oppbygning av spillvann og økende eksergi-innhold (t.h.). Figur opprinnelig hentet fra [9].

2.1 Varmtvann

Å anslå realistisk varmtvannsforbruk har fått større fokus de siste årene som følge av økt popularitet av blant annet solfangere og varmepumper. Gode estimater av forbruk, varighet og effekttopper er essensielt for riktig dimensjonering av slike systemer, og for å kunne forutsi anleggets ytelse. Dette er også avgjørende for å kunne optimalisere enkeltkomponenter i anlegget, som varmevekslere, solfangerareal, spisslastkilde og akkumulator-tanker [10].

Varmtvannsforbruket er brukerstyrt, og vil derfor være avhengig av adferden til den enkelte beboer. Typiske faktorer som spiller inn på vannforbruket, er alder, livsstil, inntekt og personlige behov [11].

Detaljert informasjon om den enkelte beboer kan derfor spille en stor rolle hvis et realistisk forbruk skal kunne anslås. Interessen for detaljer om enkeltpersoner møter derimot på utfordringer med hensyn til personvern. Varmtvannsforbruk varierer også mye mellom ulike land, og også ulike geografiske områder innad i landene [12].

Usikkerheten rundt disse variablene gjør det utfordrende å anslå varmtvannsforbruket. Dette underbygges også av studier hvor målt og estimert forbruk har blitt sammenlignet. I en Sintef-rapport fra 2011 ble det blant annet avdekket at målt energibruk til varmt tappevann var både høye og lavere enn det som var anslått for flere bygninger i Norge og Europa [13]. En annen utfordring er at tappevannsbehov- og forbruk ofte omtales i form av et energibehov. Dette kan være lite beskrivende av faktisk tapping ettersom energibehovet også skal dekke ulike systemtap. Tapet i lange sirkulasjonsledninger kan for eksempel utgjøre en betydelig andel av energibehovet til tappevann i en boligblokk [14].

Ved evaluering av bygningers energiytelse benyttes vanligvis standardiserte verdier for energibruk til varmt tappevann. De neste avsnittene beskriver kort noen av de vanligste norske standardene, og på hvilken måte de beskriver varmtvann i boligbygg.

NS 3031

Standarden beskriver metode og data for energiberegninger, og fungerer som et felles grunnlag for å evaluere energiytelsen til bygninger mot kravene i teknisk forskrift. Siste versjon av standarden ble formelt trukket tilbake 1. februar 2018, men skal inntil videre benyttes ved kontroll opp

mot TEK 17 (Byggeforskriftene), Energimerkeordningen, BREEAM NOR og passivhusstandardene NS 3700 og NS 3701 [15]. Standarden oppgir normert inndata for energiberegninger. Disse fremgår av vedlegg A i standarden.

- Årlig netto energibehov til varmtvann i NS 3031:2014 29,8 kWh/m²*år for boligblokker.
- Energiramme kravet for boligblokker i TEK 17 er 95 kWh/m²*år. Normert energibehov til varmtvann utgjør minimum 31,4 % av totalt netto energibehov i en boligblokk etter TEK 17.
- Forbedret bygningskropp vil gi økt andel energi til varmt tappevann.

Verdiene for energi til varmt tappevann ble i hovedsak basert på rapporten «Nye forskriftskrav til bygningers energibehov» fra 2003 og har stått fast siden utgivelse av NS 3031:2007 [16]. Her var det relativt få studier å basere seg på, og det var store variasjoner mellom de erfaringstallene som ble lagt til grunn. Det var også noe uklart om verdiene refererte til netto energi ved tappested, eller om tallene inkluderte systemtap [17]. Normert energibehov til varmt tappevann i standarden oppgis som en jevn last i driftstiden (16 timer per døgn), og i evalueringer mot teknisk forskrift inkluderes denne gjerne som en jevn last over hele døgnet.

Dette gjør at beregningen i liten grad belyser dynamiske forhold som forbrukstopper og interaksjonen med varierende systemvirkningsgrader. I tillegg utgjør det et lite gunstig utgangspunkt for å estimere realistiske varighetskurver.

SN/TS 3031:2016

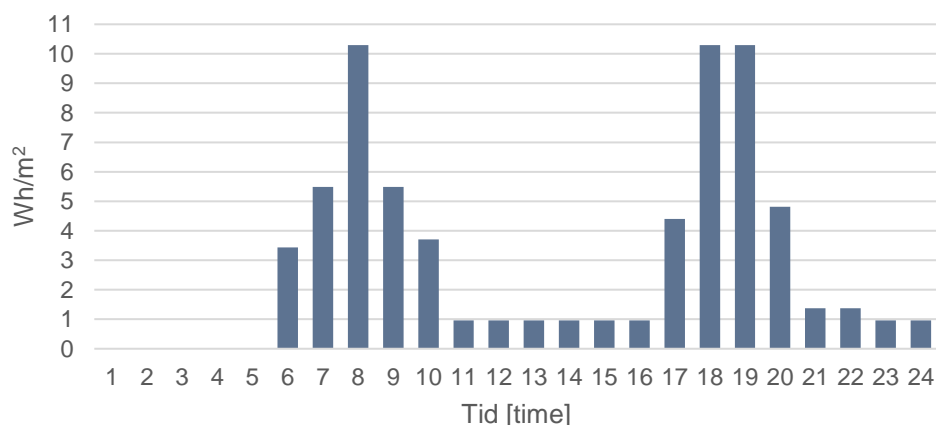
Den tekniske spesifikasjonen SN/TS 3031:2016, heretter kalt TS, fungerer som et supplement til NS 3031. TS inneholder utfyllende regler og veiledende verdier som bidrar til mer helhetlige energiberegninger for bygg og energiforsyningssystemer. Den fungerer derfor som et verktøy for rådgivende ingeniører, utbyggere, myndighet og arkitekter [18].

- Årlig netto energibehov til varmtvann i SN/TS 3031:2016 er omtrent 25 kWh/m²*år boligblokker.
- Energiramme kravet for boligblokker i TEK 17 er 95 kWh/m²*år

- Normert energibehov til varmtvann utgjør minimum 26,3 % av totalt netto energibehov i en boligblokk etter TEK 17. Forbedret bygningskropp vil gi økt andel energi til varmt tappevann.

I arbeidet med TS ble normert energibehov til varmt tappevann i NS 3031 undersøkt. Et upublisert notat, utarbeidet av A. J. Petersen og S. Gedsø, fungerte som en del av underlaget for TS [19]. I arbeidet ble det fokusert på tilgjengelig målinger og litteratur fra Norge, Sverige og Danmark, samt bruksmønstre og årsbasert energibruk i NS-EN 15316-3-1:2007.

Konklusjonen var at tappevannsbehovet i NS 3031 sannsynligvis var satt noe høyt, og at et mer korrekt anslag kunne være et sted mellom 15-25 kWh/m². I notatet foreslås det også å operere med tappevannsbehov per person for boligtyper hvor persontettheten åpenbart vil være høyere enn gjennomsnittet. Et eksempel på dette er studentboliger. Figur 2 illustrerer energibehovet for varmt tappevann, time for time, i boligblokker i TS.



Figur 2: Energiforbruk for varmt tappevann i boligblokker, SN/TS 3031:2016 [18].

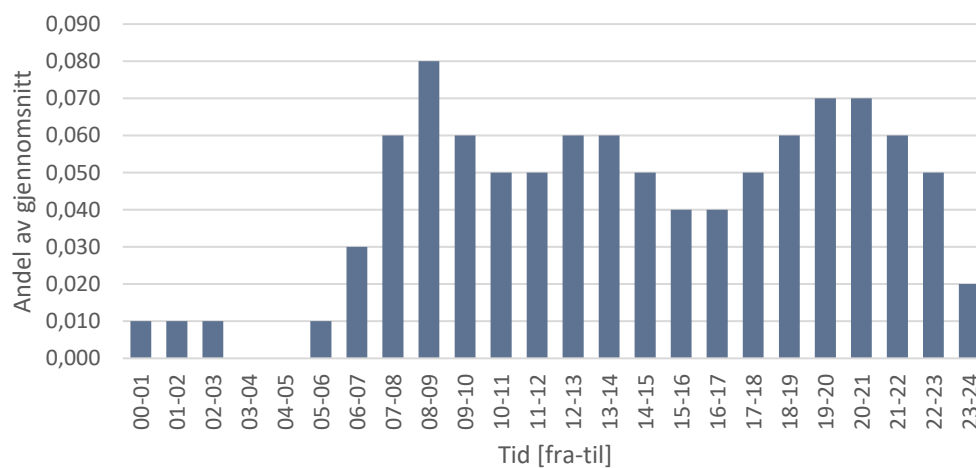
NS-EN 12831-3:2017

Den engelskspråklige versjonen av EN 12831-3:2017 ble fastsatt som Norsk Standard i oktober 2017. Standarden beskriver metoder for å dimensjonere systemer for varmt tappevann, og erstatter NS-EN 15316-3-1:2007 [20]. Beregningsmetodikken i standarden skal gjennomføres med nasjonale verdier for blant annet persontetthet, vanntemperaturer og forbruksprofiler. Om ikke slikt er tilgjengelig, kan veiledende verdier i tillegg B i standarden benyttes. Persontetthet og vannmengder for leiligheter kan beregnes ut fra standardens tillegg B.2.2, se Vedlegg 1. Alternativt kan totalt varmtvannsbehov beregnes ut ifra antall personer og verdiene i Tabell 1.

Figur 3 illustrerer en typisk forbruksprofil for boligblokker gitt i standarden.

Tabell 1: veiledende verdier for varmtvannsbehov i tillegg B.2.2 i NS-EN 12831-3:2017.

Type of building	$V_{W,f;day}$ [liters DHW/pd]
Residential buildings (simple housing)	25-60
Residential buildings (luxury housing)	60-100
Single family dwellings	40-70
Apartment dwellings	25-30



Figur 3: Typisk forbruksprofil for varmt tappevann i boligblokker fra NS-EN 12831-3:2017.

2.2 Spillvann

Avløpsvannet fra en bygning betegnes som spillvann, og kan deles inn i gråvann og svartvann. Svartvannet er kloakk fra toaletter, mens gråvannet omfatter resten av bygningens spillvann [1, 21].

Svartvannets temperatur er i stor grad avhengig av kaldtvannstemperaturen og på hvor lenge vannet blir liggende i sisternen. Altså hvor hyppig toalettet blir brukt. Den ligger derfor som oftest et sted mellom romtemperaturen, og temperaturen på innkommende kaldtvann. Svartvann er kraftig forurensset og består av mye faste partikler. Gråvannet som stammer fra bad, dusj og baderomservant betegnes i noen tilfeller som lyst, eller lett, gråvann. Dette har vanligvis en høy middeltemperatur og er relativt rent sammenlignet med spillvann fra andre kilder. Avløpsvann fra kjøkken anses som det mest forurensede gråvannet, og inneholder blant annet matrester og fett [21, 22]. Sammen med vann fra vaskemaskiner kan dette beskrives som mørkt, eller tungt, gråvann. Tabell 2 gir en oversikt over spillvann i husholdninger, med tilhørende kilder og innhold.

Tabell 2: Kategorisering av spillvann fra husholdninger [22, 23].

Type	Kilde	Innhold
Lyst/lett gråvann	Dusj, badekar, håndvask/ servant	Sjampo, såpe, tannkrem, jord, hår- og hudrester, spor av urin og avføring, andre organiske forbindelser
Mørkt/tungt gråvann	Vaskemaskiner, kjøkkenkum	Fett og oljer, matrester, salt, vaske- midler og andre rengjørings- og blekemidler, tøymykner, jord, hår- og hudrester, tekstilfiber, spor av urin og avføring
Svartvann	Toalett	Urin, avføring, toalettpapir

2.2.1 Gråvannskarakteristikk og kvalitet

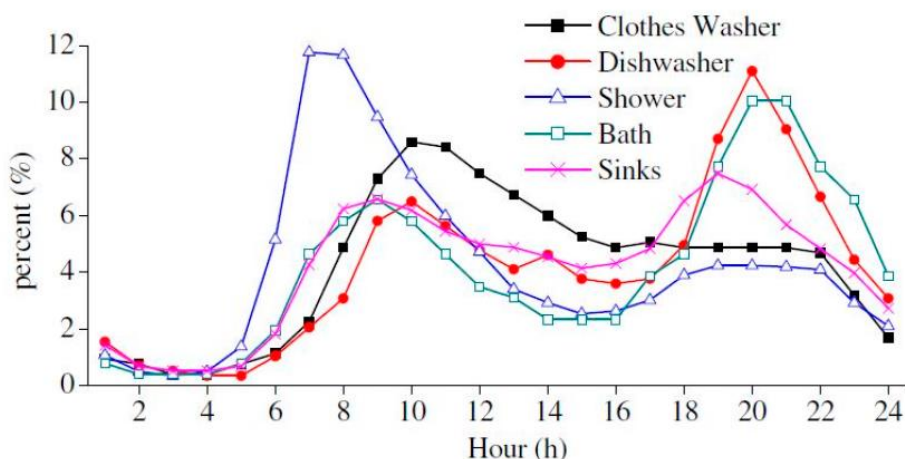
Gråvannets innhold og karakteristikk varierer mye mellom ulike studier ettersom det er avhengig av mange faktorer. Elementer som spiller inn er kvaliteten på drikkevannskilden og ledningsnettets, personlige eller kulturelle behov og vaner, levestandard og inntekt [24, 25]. Gråvannets temperatur er vanligvis høyere enn annet spillvann fra husholdningen.

Kloakk i det kommunale avløpsnettets holder i gjennomsnitt 10-15 grader store deler av året, mens middeltemperaturen på gråvannet gjerne ligger

et sted mellom 14,6 og 43 grader [3]. Temperaturen vil derimot kunne variere en del, ettersom den henger sammen med vanntemperaturen ved den enkelte kilden.

Vanntemperaturen ved en dusj eller et bad ligger vanligvis i området 38-40 grader. I vaskemaskinen er vanntemperaturen vanligvis rundt 40 grader, men kan også være alt i fra 30 til 90 grader [23]. Oppvaskmaskinens vanntemperatur varierer i området 60-85 grader. Studier har oppgitt at gråvannstemperaturen er 5-10 grader lavere enn tappetemperaturen ved kilden [23]. Felles for de fleste gråvannskildene er at tapping har relativt kort varighet.

En følge av faktorene beskrevet ovenfor, er at gråvann en høyst variabel og uforutsigbar vannstrøm, både med hensyn til temperaturer og mengder. Figur 4 illustrerer hvordan bruk av ulike gråvannsproduserende kilder kan variere i løpet av døgnet.



Figur 4: Forbruksprofiler for ulike aktiviteter som produserer gråvann. Kurvene er basert på amerikanske studier fra 80- og 90-tallet. Det er usikkert om de representerer ukedag, helg, eller gjennomsnittet over en periode. Figur hentet fra [23].

Kildeseparering

Hvis utnyttelse av gråvann skal muliggjøres, må det skilles fra svartvannet. Dette løses i praksis med å skille de i separate rørsystemer, også kalt kildeseparering. Denne forutsetningen gjør at utnyttelse av gråvann er mindre egnet i eksisterende bygninger med felles avløp. En utskiftning av alle rør vil innebære for store kostnader. I nybygg, eller ved totalrehabilitering, kan det derimot være mer hensiktsmessig. Fordeler med å benytte gråvann er at det er relativt rent, og består av langt mindre faste partikler sammenlignet med spillvann. Separerte rørsystemer vil i tillegg

kunne legge til rette for fremtidige kombinasjonsløsninger, hvor også selve gråvannet renses og gjenbrukes til formål som utendørs vanning.

Regulering av varmeuttak

Ved varmeuttak fra spillvann vil nedkjølt væske bli sluppet ut på det kommunale avløpsnett. I tilfeller med veldig store varmeuttak (kraftig nedkjøling) i tilknytning til mindre renseanlegg, kan dette i ytterste konsekvens påvirke enkelte av prosessene ved renseverket. Spesielt (biologisk) nitrogenfjerningen kan påvirkes av lave vanntemperaturer [23].

I svenske kommuner stilles det krav til hvor nedkjølt avløpsvannet som slipper ut på kommunens avløpsnett kan være. I Stockholm går kravet ut på at varmeuttak fra spillvann kan skje så lenge temperaturen på vannet som slippes ut på nettet ikke er lavere enn for innkommende kaldtvann [26]. I Oslo kommune er ikke tilførsel av nedkjølt avløpsvann til det kommunale nettet ansett som et stort problem. Avløpsmengdene er såpass store at de i liten grad påvirkes [27]. Sanitærreglementet for Oslo stiller derimot krav til at påslipp ikke skal overskride 50 grader, som en følge av å unngå skade på ledningsnett [28].

3 VARMEGJENVINNING

Å gjenvinne varme fra avløpsvann handler om å utnytte den termiske energien som ligger lagret i vannet. Dette kan løses med passive eller aktive gjenvinningsløsninger, eller en kombinasjon av disse. Passiv varmegjenvinning innebærer bruk av varmevekslere, og krever vanligvis ikke energi til annet enn eventuelle pumper [1]. Aktive systemer består av varmepumper som benytter avløpsvannet som varmekilde.

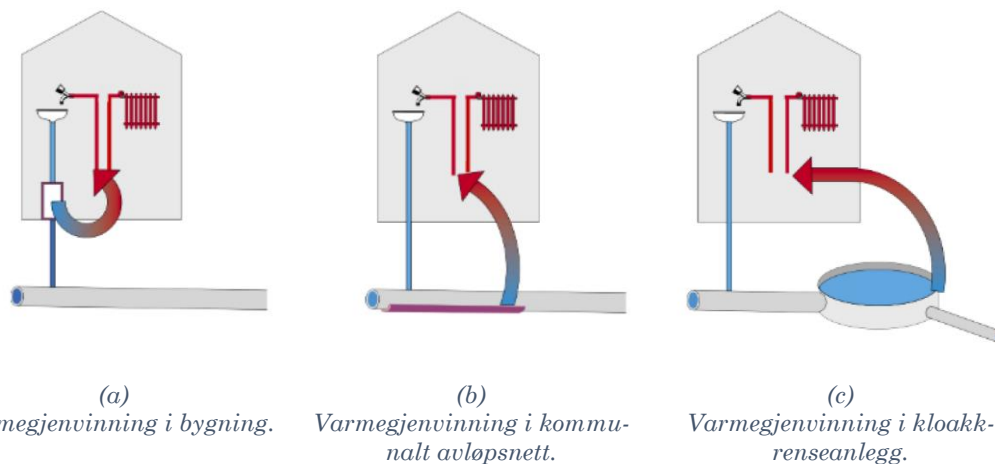
Varmegjenvinning fra avløpsvann kan prinsipielt foregå i en av tre nivåer [3].

- Fra gråvann eller spillvann i en eller få bygninger.
- Fra spillvann og kloakk i avløpsnettet.
- Fra kloakk ved eller i renseanlegget.

Dette illustreres i Figur 5. En åpenbar fordel med konfigurasjon (a) er den korte avstanden mellom varmeproduksjon og der forbruk finner sted. Dette bidrar også til høyere temperaturer på gråvannet eller spillvannet. Ulempen er derimot at vannmengder og temperaturer har store døgnvariasjoner, og at effektivt varmeuttak ofte kan kreve kostbare desentraliserte systemer [29].

I konfigurasjon (b) hentes varme fra kloakk i det kommunale avløpsnettet. Her er vannmengdene større, men temperaturene lavere enn i (a). I tillegg er avstanden til forbruker vanligvis lenger. Varmeuttak på dette nivået kan i enkelte tilfeller begrenses av krav til nødvendige vanntemperaturer for ulike prosesser på det lokale renseverket.

Dette er derimot ikke et problem ved konfigurasjon (c), hvor varmegjenvinning oftest finner sted på eller i nærheten av selve renseverket. Her er vannmengdene størst, men det er vanligvis også avstanden til forbruker.



Figur 5: Ulike nivåer for varmegjenvinning fra avløpsvann. Figur hentet fra [3].

Videre i kapittelet fokuseres det i hovedsak på lokal, eller desentralisert, varmegjenvinning fra gråvann inne i bygningen. Dette er tradisjonelt lite vanlig i Norge. Noen grunner er blant annet:

- Gjenvinning fra gråvann kan være praktisk utfordrende eller lite gunstig i eksisterende bygninger siden svartvann og gråvann må skilles i adskilte avløp.
- Forurensninger i vannet kan gi praktiske utfordringer knyttet til renhold og vedlikehold.
- Kostbare installasjoner som gir begrenset energibesparelse i forhold til det totale varmebehovet i eldre bygg.

Skjerpede forskriftskrav har derimot vært med på å gjøre disse systemene mer aktuelle igjen de siste årene. Nyere bygg er blant annet bedre isolerte enn eldre bygninger, noe som fører til at tappevannsoppvarming blir en stadig mer dominerende del av byggets totale oppvarmingsbehov. Et passivhus i Oslo vil for eksempel kunne ha et energibehov til tappevann som er dobbelt så stort som resten av oppvarmingsbehovet. I slike bygninger kan varmegjenvinning fra gråvann være mer aktuelt.

3.1 Passiv gjenvinning

Passiv gjenvinning kjennetegnes ved at det ikke kreves energi annet enn til eventuelle sirkulasjonspumper eller motorspjeld. Passiv gjenvinning fungerer ved at gråvann overfører varme til vann eller et annet medium med lavere temperatur når væskene passerer hverandre i en varmeveksler. Varmetransporten mellom to medier i en varmeveksler kan uttrykkes ved formel (1).

$$\dot{Q} = (\dot{m} \times C_p \times \Delta T)_C = (\dot{m} \times C_p \times \Delta T)_H \quad (1)$$

Hvor \dot{m} er massestrømmen [kg/s], C_p er mediets spesifikke varmekapasitet [J/kg*K], og ΔT er temperaturdifferansen [K] mellom innløp og utløp av varmeveksleren. Formel (2) kan benyttes om temperaturvirkningsgraden, massestrømmene, og innløpstemperaturer er kjent.

$$\dot{Q} = \varepsilon \times \dot{Q}_{max} = \varepsilon \times C_{min} \times (T_{H,in} - T_{C,in}) \quad (2)$$

Hvor C_{min} er det minste produktet $(\dot{m} \cdot C_p)_{min}$ av de to mediene, og ε er varmevekslerens temperaturvirkningsgrad. Virkningsgraden kan i andre omgang beregnes ut ifra formel (3).

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{T_{C,ut} - T_{C,inn}}{T_{H,inn} - T_{C,inn}} & \text{hvis } C_C = C_{min} \\ \frac{T_{H,inn} - T_{H,ut}}{T_{H,inn} - T_{C,inn}} & \text{hvis } C_H = C_{min} \end{cases} \quad (3)$$

For varmevekslere kan alternativt sammenhengen i formel (4) nedenfor benyttes hvis U -verdien, varmeoverførende areal og alle innløps- og utløps-temperaturer er kjent.

$$\dot{Q} = U \times A \times LMTD \quad (4)$$

Hvor U er varmegjennomgangskoeffisienten [W/m²*K], A er varmeoverførende areal og $LMTD$ er den logaritmiske middeltemperaturdifferansen [K]. En forutsetning for å benytte formelen på denne formen er at U -verdien og $\dot{m}C_p$ er konstante. $LMTD$ kan beregnes etter formel (5).

$$LMTD = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (5)$$

$$\Delta T_A = \begin{cases} T_{1,inn} - T_{2,ut} & \text{for motstrøm} \\ T_{1,inn} - T_{2,inn} & \text{for medstrøm} \end{cases}$$

$$\Delta T_B = \begin{cases} T_{1,ut} - T_{2,inn} & \text{for motstrøm} \\ T_{1,ut} - T_{2,ut} & \text{for medstrøm} \end{cases}$$

3.1.1 Prinsipper

Når det er snakk om varmegjenvinning fra gråvann, skilles det i hovedsak mellom to prinsipper; momentanveksling og forsinket vekslings.

Momentanveksling er den enkleste formen for varmeveksling. Her forvarmes kaldtvann direkte med gråvannet i en varmeveksler mens varmtvann brukes. Som oftest er det ikke behov for pumper.

En dusjvarmeveksler er et eksempel på momentanveksling. Den består av en horisontal varmeveksler tilkoblet dusjens spillvannsledning og innkommende kaldtvannsledning. Varme gjenvinnes derfor kun fra dusjvann. Dusjveksleren monteres i umiddelbar nærhet av dusjen, ofte mellom bunnen i dusjen og gulvet. Innkommende kaldtvann forvarmes mens det dusjes. Det forvarmede vannet er som oftest koblet direkte til kaldtvannsinn-taket på dusjbatteriet, men kan eventuelt føres til varmtvannsbereder for ettervarming. En slik løsning krever ikke at gråvann og svartvann skilles i boligen, og kan derfor være egnet i eksisterende bygninger. Virkningsgraden ligger i området 30-40 %, men dette er avhengig av oppfølging og vedlikehold [1].

Et annet eksempel på momentanveksling er vertikale, eller stående, spillvannsvarmegjenvinnere, se Figur 6. Dette er et vertikalt rør for spillvann omgitt av en, eller flere, parallelle rør i aluminium eller kobber spunnet på utsiden. Varmeveksleren erstatter et stykke av boligens spillvannsledning. Kaldtvann forvarmes gjennom rørene på utsiden. Spillvann som renner i det innerste røret legger seg om en film langs overflaten. På den måten sikres et stort varmeoverførende areal til tross for at røret ikke er fylt med vann. Disse er derfor mer effektive enn de fleste vertikale vekslere. Virkningsgraden for disse ligger i området 30-80 %. Virkningsgraden er derimot avhengig av varmevekslerens lengde, altså varmeoverførende areal. Av passive gjenvinnere er dette den vanligste typen på markedet [23].



Figur 6: Typisk stående spillvannsvarmevekslere. Figur hentet fra [23].

Momentanveksling kan også kombineres med en oppsamlingstank for gråvann. I dette tilfellet må gråvann og svartvann skilles, og tanken mottar dermed alt gråvannet fra boligen. Termisk sjikting gjør at det nedkjølte gråvannet hentes ut i bunnen av tanken etter hvert som det fylles på nytt. En rørcoil fører kaldtvann gjennom tanken fra bunnen og opp ved tapping, hvor det forvarmes «motstrøms».

Virkningsgraden for et slikt system ligger på mellom 40-60 %, men er avhengig av størrelsen på tank og rørcoil. Rørcoilen er ofte svært utsatt for dannelsen av belegg og biofilm. Det må derfor legges til rette for enkelt renhold og vedlikehold. Tanken har en viss akkumulerende effekt siden det alltid er gråvann i tanken. Tankens størrelse og isolasjonsgrad avgjør dette.

En oppsamlingstank for gråvannet er en mer essensiell del av prinsipper som utnytter forsinket varmeveksling. Forsinket veksling krever ofte mer komplekse systemer, med akkumulatortank, sirkulasjonspumpe og eventuelt styringssystem. Fordelen med et slikt system er når det er forsinkelse mellom behovet for varmtvann og tilgjengeligheten på gråvann. Dette kan foregå med direkte veksling mellom gråvann og tappevann, eller ved indirekte løsninger. Ved indirekte løsning brukes en lukket krets mellom gråvann og tappevann til å overføre varmen mellom de to.

3.1.2 Vannforurensning, belegg og biofilm

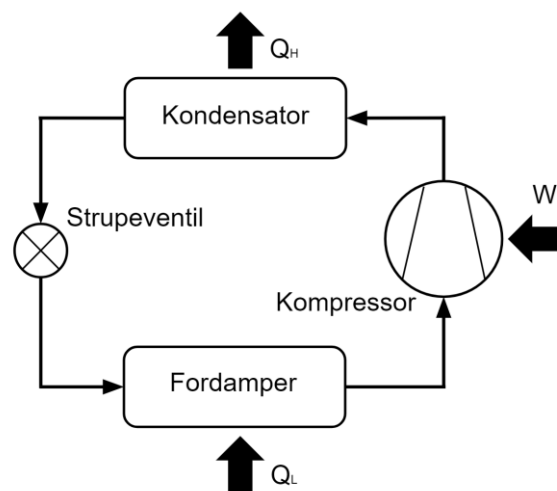
Som beskrevet i kapittel 2.2 kan gråvann inneholde en rekke forurensninger. Gråvannet fra kjøkken inneholder blant annet fett- og oljerester. Dette kan sette seg i rør og varmevekslere når vannet kjøles ned. En konsekvens av dette vil kunne være redusert varmeoverføring, men også igjennetting av selve varmeveksleren.

For en varmepumpe kan dette være spesielt utfordrende da større varmeuttak kan føre til lave utgående gråvannstemperaturer [30]. En annen utfordring er dannelse av belegg og biofilm på varmeoverførende overflater. Biofilm har isolerende effekt og kan redusere virkningsgraden til en varmeveksler drastisk. Dette er ansett spesielt kritisk for varmepumper, da det også påvirker ytelsen til resten av komponentene. Noen vanlige tiltak som bør vurderes for å redusere problematikk med vannforurensning og dannelse av belegg og biofilm er listet opp nedenfor [23].

- Ulik grad av filtrering av gråvann før varmeoverførende overflater.
- Tilpassede og effektive renholds- og vedlikeholdsrutiner.
- Kompensere for beleggdannelse med økt varmeoverførende areal.

3.2 Aktiv gjenvinning

Ved aktiv gjenvinning benyttes en varmepumpe. Varmepumpen henter varme fra gråvannet eller spillvannet, og den avgitte energien er summen av den opptatte varmen og den tilførte elektrisiteten. En konvensjonell varmepumpe består av et lukket system hvor et kuldemedium sirkuleres. Fordamper, kompressor, kondensator og strupeventil utgjør hovedkomponentene i varmepumpa, og det er i kompressoren elektrisitet tilføres. Figur 7 illustrerer prinsippet for en konvensjonell varmepumpe. Kuldemediet opp- tar og avgir varme ved å veksle mellom gass og flytende form.



Figur 7: Enkel skisse av oppbygningen av en varmepumpe.

Med et aktivt system kan mer energi gjenvinnes, men anlegget blir fort betraktelig mer komplekst enn enkle passive systemer. Gråvannets karakteristikk, med varierende tilførsel og temperatur, er dessuten lite optimalt for varmepumpens drift. Derfor kreves en tank eller et oppsamlingsbasseng for gråvannet, slik at det skapes mer stabile driftsforhold.

Det kan også benyttes en kombinasjon av passiv og aktiv gjenvinning. Da avgir gråvannet først varme til kaldtvann i en varmeveksler, før det avkjøles ytterligere i fordamperen til varmepumpen. Kombinerte løsning bør brukes der systemet forvarmer tappevann og ikke for produksjon av varme til bygningens varmesystem. Grunnen er at returtemperaturen fra varmesystemet ofte er så høy at varmeveksleren ikke får bidratt.

Varmeveksling kan skje direkte med gråvannet, eller indirekte ved at vann eller en frostvæske overfører varme mellom gråvannet og varmepumpen. Ved direkte veksling overføres varmen i gråvannet direkte til

varmepumpas kuldemedium i fordamperen, som ofte er en rørveksler [1, 23]. En indirekte løsning krever en ekstra varmeveksler, men fordamperen kan til gjengjeld være en plateveksler.

3.2.1 Kuldemedium

Valg av varmepumpas kuldemedium gjøres på bakgrunn av det enkelte mediets fysiske egenskaper, og hvor godt disse er tilpasset formålet. Kuldemediets fordampingstemperatur bør for eksempel være lavere enn tiltenkt temperatur i fordamperen. I tilfellet for spillvann og gråvann kan dette være i området 10-60 grader, og passende kuldemedium kan være R-134a, R-404a, R-407c eller R-410a [23].

R744, eller CO₂, har vist seg godt egnet som kuldemedium i varmepumper for tappevannsoppvarming [31]. En CO₂-varmepumpe oppnår høyest effektfaktor ved høye temperaturløft. Ved gråvannsgjenvinning anbefales det derfor å la CO₂-varmepumpa stå for hele vannoppvarmingen, altså å unngå bruk av passiv gjenvinner til forvarming. Det er varmepumper med konvensjonelt kuldemedium som behandles videre i dette arbeidet.

3.2.2 COP

Effektfaktoren, eller varmefaktoren, betegnes COP (coefficient of performance) og er et mål på hvor mye energi varmepumpa leverer i forhold til tilført energi i kompressoren, se formel (6). Årsvarmefaktoren, SCOP, beregnes på tilsvarende måte, men med varmepumpas årlige varmeleveranse dividert på årlig energi brukt til kompressor, pumper og vifter.

$$COP = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \quad (6)$$

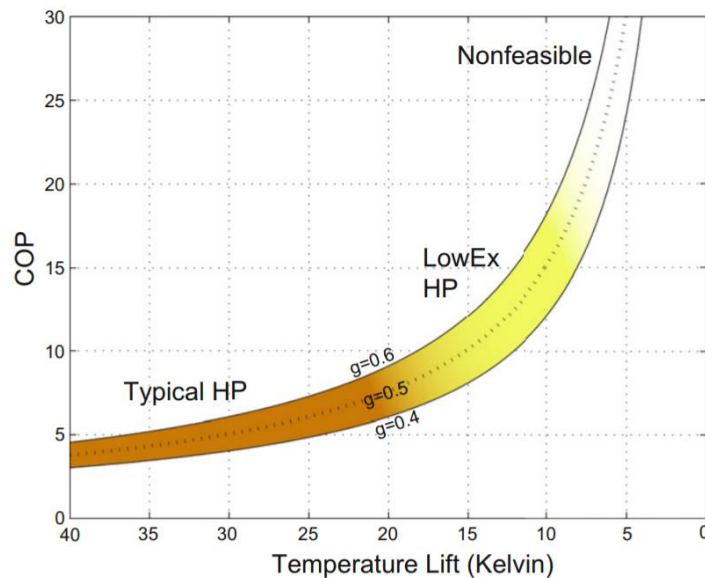
Det regnes med 2-3 % høyere effektfaktor for hver grad temperaturløftet reduseres [1]. Den teoretisk maksimale effektfaktoren en varmepumpe kan oppnå betegnes COP_{Carnot} . Denne er kun avhengig av temperaturen til det varme og kalde reservoaret, eller temperaturløftet, og kan uttrykkes etter formel (7). Effektfaktoren er invers proporsjonal med temperaturforskjellen mellom de to reservoarene og stiger raskt ved lave temperaturforskjeller.

$$COP_{carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (7)$$

Effektfaktoren til en virkelig varmepumpe er vanligvis langt lavere enn den teoretisk maksimale, som en følge av ulike systemtap i varmepumpas komponenter. Forholdet mellom COP og COP_{carnot} betegnes η_{UI} , eller carnot-virkningsgraden (second law efficiency) og er vist i formel (8). Forholdet omfatter alle tap og karakteristikk i komponentene i varmepumpa, og faktoren påvirkes derfor i stor grad av systemets utforming og enkeltkomponenters fysiske egenskaper.

$$\eta_{UI} = \frac{COP}{COP_{carnot}} \quad (8)$$

I Figur 8 illustreres COP som funksjon av temperaturløftet for varmepumper med ulik carnot-virkningsgrad. Her fremkommer det hvor drastisk økningen av effektfaktoren blir når temperaturløftet reduseres til 20 grader eller lavere. I moderne varme- og kjølesystemer kan høye effektfaktorer etterstrebes ved å benytte lavtemperatur oppvarming og høytemperatur kjøling. For tappevannsystemer er dette derimot utfordrende å oppnå [9].



Figur 8: COP som funksjon av temperaturløftet ($T_H - T_L$) for varmepumper med ulike Carnot-virkningsgrader. Figur hentet fra [9].

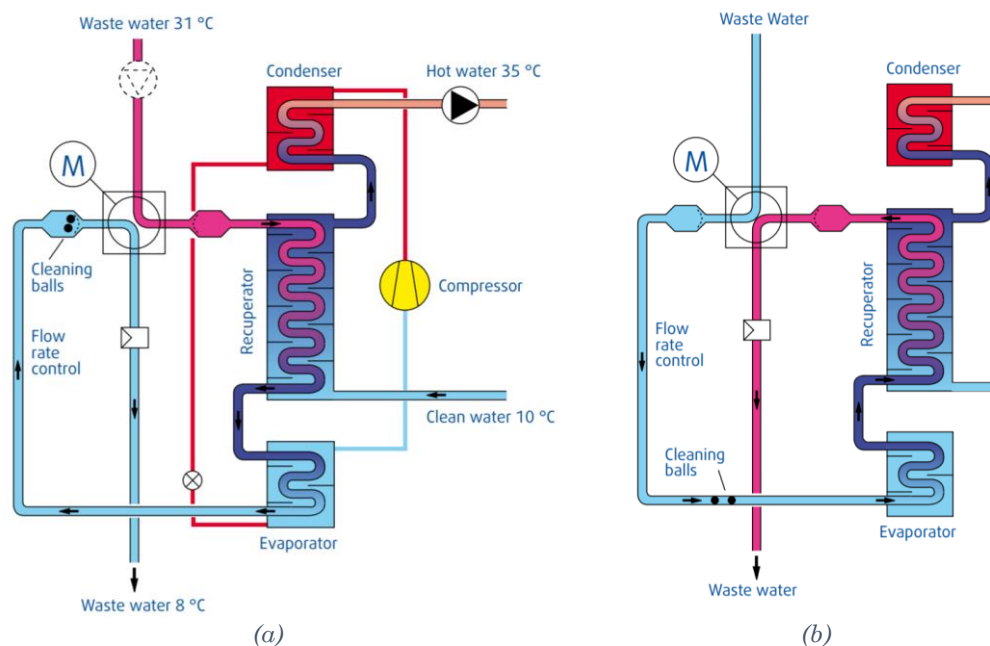
3.2.3 Tilgjengelig teknologi

Varmegjenvinning av gråvann er som tidligere nevnt lite utbredt i boligbygninger av ulike grunner. Det eksisterer likevel produkter på markedet som kan benyttes for ulike bygningstyper så vel som for boliger.

Menerga Aquacond 44

Menerga Aquacond 44 er et gjenvinningssystem ment for varmegjenvinning av gråvann [32]. Svartvann og gråvann må derfor skilles for at systemet skal kunne benyttes. Løsningen kombinerer aktiv og passiv gjenvinning med varmeveksler og varmepumpe. Både varmeveksleren og varmepumpas fordamper er av typen rørvarmevekslere, hvor gråvannet strømmer i det innerste røret. Figur 9 (a) illustrerer systemløsningen.

Ved drift forvarmes først innkommende kaldtvann i varmeveksleren, før det gjennomgår ytterligere oppvarming i varmepumpas kondensator. Aquacond 44 kommer i ulike størrelser, og kan benyttes for gråvannsmengder mellom 0,8 til 5,4 m³/h. Produsenten oppgir en systemvirkningsgrad på 10,8-11,8 ved en gråvannstemperatur og kaldtvannstemperatur på henholdsvis 31 og 10 grader. Systemvirkningsgraden omfatter i dette tilfellet varme levert av varmepumpa og varmeveksleren, samt energibruk til kompressor og sirkulasjonspumper. Systemet kommer med en automatisk, innebygget rengjøringsfunksjon. Med jevne mellomrom sørger en fireveisventil for å føre gråvannstrømmen motsatt vei. Vaskeballer føres da gjennom rørene, hvor overflatene skrubbes, se Figur 9 (b). Løsningen oppgis som spesielt godt egnet til bygninger hvor gråvannsmengden er stabil, og temperaturen er høy, som større spa- og dusjanlegg.



Figur 9: Menerga Aquacond 44 ved normal drift (a) og ved rengjøringsmodus (b). Figur hentet fra [32].

3.2.4 Erfaringer fra litteratur

En sveitsisk studie fra 2011 undersøkte potensialet og fordeler med desentralisert, aktiv varmegjenvinning i boligbygninger [9]. Resultatene ble basert på numeriske beregninger av et varmepumpesystem for tappevannsoppvarming til 55 grader. En forutsetning var blant annet et forhold mellom COP og COP_{carnot} på 0,5. Forbruksprofiler ble estimert ut i fra resultater fra en tidligere omfattende amerikansk studie. Beregningsresultatene viste at en årsvarmefaktor på over 6 kunne oppnås for systemet.

I en kinesisk studie fra 2013 ble det gjort felt-målinger på et spa i byen Shenzhen, Kina [30]. Variasjonen av vannmengder og temperaturer på gråvannet ble kartlagt. Gjennomsnittlig vannforbruk var 50 m³/dag. Studien viste til positive måleresultater med hensyn til både COP og lønnsomhet. Det ble derimot bemerket hvor avgjørende jevnt og godt renhold av spesielt fordampere var for COP. Resultatene viste at forurensningen i gråvannet også medførte dannelse av belegg og biofilm i rørene. I løpet av en måned førte avleiringer og belegg til en reduksjon i maksimal vannmengde på 16,9 %. Etter omtrent fem måneder hadde dette ført til en reduksjon på 20 %. Studien foreslår derfor å overdimensjonere rørene noe. For gråvannsførende rør ble det også anbefalt gode renholdsrutiner, slik at dimensjonerende vannmengde holdes mest mulig stabil.

I en oppsummeringsartikkel oppgis det at effektfaktoren til en varmepumpe med gråvann som kilde reduseres med 20 % i løpet av noen måneder som en følge av biofilm med en tykkelse på 1 mm.

I en studie fra 2005 ble et varmepumpesystem med gråvann som varmekilde i hotell med spa i Korea undersøkt numerisk [33]. Systemet ble modellert ved hjelp av TRNSYS, samt egne matematiske modeller for enkelte komponenter. Systemet som beskrives akkumulerer gråvann i en egen tank gjennom driftstiden til spa-anlegget, og gjenvinner deretter varmen utenfor drift. Varmepumpen går fra 22:00 til 08:00, og varmer opp tappervann til 50 grader. Resultatene viste at en årsvarmefaktor på 4,8 kunne oppnås.

4 METODE

I dette kapitlet presenteres de metodene som har blitt benyttet for å utlede resultatene i kapittel 5. Metodene benyttet i arbeidet med rapporten kan i hovedsak deles i to; en innledende litteraturstudie, og en beregningsstudie. Litteraturstudiens hensikt var i å kartlegge den delen av potensialet som ikke påvirkes av selve gjenvinningsløsningen. Funnene skulle dessuten danne noe av det nødvendige underlag for beregningsstudien.

4.1 Estimert forbruk og energipotensiale

I forbindelse med kartlegging av energipotensialet for varmegjenvinning av gråvann var det først nødvendig å kartlegge en rekke faktorer. Dette innebærer blant annet totalt vannforbruk, forbruk av varmt tappevann, og forbruksmønster. Det ble derfor gjennomført en litteraturstudie for å undersøke erfaringer fra studier og bransjetall.

For å begrense søket ble det valgt å fokusere på litteratur og erfaringer fra Skandinavia og Finland. Fremgangsmåten for studiet var noen innledende søk med relevante emneord i ulike databaser. Til dette ble søketjenesten Oria benyttet. Når noen sentrale kilder var kartlagt, ble det brukt en metode som innebærer å plukke ut relevante referanser, og følge disse videre. Dette gjør det mulig å raskt avdekke mange sentrale, relevante kilder. Det er derimot en metode som til tider kan bli litt kaotisk, og det er viktig å begrense antall søk av gangen.

Fremgangsmåten for litteraturstudien knyttet til spillvann og gråvann ble løst på tilsvarende måte. Her var det derimot umulig å begrense søket til kun skandinaviske land siden antallet studier om gråvann var mer begrenset. Søket ble derfor utvidet, med hovedfokus på land i Europa. En sammenstilling av resultatene fra litteraturstudien ble deretter benyttet som grunnlag for å estimere representative verdier for et typisk «norsk forbruk».

Estimatene ble basert på noen innledende forutsetninger, og resultatene ble underveis analysert og sammenlignet med erfaringstall og funn i litteraturen. Punktene nedenfor oppsummerer faktorer som ble forsøkt kartlagt i litteraturstudiet.

- Vannforbruk per person
- Varmtvannsforbruk per person

- Gråvannsmengder per person
- Gråvannstemperaturer
- Forbruksprofiler for ukedager og helgedager
- Usikkerhet og variasjoner

4.1.1 Forutsetninger

I dette avsnittet presenteres noen sentrale forutsetninger for arbeidet med å estimere faktorene listet opp ovenfor. I de tilfeller hvor energibehov eller målt energibruk til varmtvann brukes til å estimere vannforbruk, benyttes formel (9).

$$Q_{vv} = \frac{q_{vv} \times \rho \times C_p \times (T_{vv} - T_{kv})}{t} \quad (9)$$

Hvor

Q_{vv}	= energibruk varmtvann	[kWh/pers*døgn]
q_{vv}	= varmtvannsforbruk	[m ³ /pers*døgn]
ρ	= vannets tetthet	[kg/m ³]
C_p	= vannets spesifikke varmekapasitet	[J/kg*K]
T_{vv}	= varmtvannstemperatur ut fra bereder	[°C]
T_{kv}	= årsmiddel temp. kaldtvann inn på bereder	[°C]
t	= tid	[s/h]

- Gjennomsnittlig persontetthet er 50 m² per person. Bakgrunnen for dette er av NVE-rapporten «Trender og drivere for energibruk i norske husholdninger» [34]. Sammenlignet med normert varmetilskudd fra personer i NS 3031:2014 og SN/TS 3031:2016, på 1,5 W/m², tilsvarer dette en person per 50 m², med et varmetilskudd på 75 W.
- Varmtvannstemperaturen ut fra bereder, T_{vv} , er 65 °C. Hvis det er snakk om varmtvannstemperaturen etter blandearmatur, altså ved tappested, forutsettes 55 °C. Dette vil i så fall bli opplyst i teksten.
- Temperaturen på innkommende kaldtvann, T_{kv} , er 7 °C, da dette antas å representere et typisk år i Oslo. Bakgrunnen for dette er rapporten «Drikkevannskvalitet i Oslo 2017» [35]. Rapporten er en sammenstilling av analysedata fra vannforsyningssystemet i Oslo

for 2017. Gjennomsnittstemperaturen fra målinger gjort i ledningsnettet i 2017 var $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, men varierte flere grader med både sesong og målepunkt.

- Varmekapasiteten, C_p , for vann forutsatt å ha en fast verdi på $4187\text{ J/kg}\cdot\text{K}$.
- Vannets tetthet, ρ , er 1000 kg/m^3 .
- Det benyttes konvensjonelle hvitevarer som kun er tilkoblet kaldtvann. Disse bidrar ikke til energibehovet for varmt tappevann siden de varmer opp vann til nødvendig temperaturnivå inne i selve apparatet. De bidrar derimot til totalt vannforbruk og produksjonen av gråvann.

4.2 Beregningsstudie

Følgende beregningsmetodikk ble utført for en fiktiv boligblokk i Oslo med 150 beboere. Ideen var at referansebygningen kunne representere en typisk større boligblokk. Beboerne i blokka ble antatt å utgjøre en gjennomsnittlig persongruppe, og at gjennomsnittsverdier fra litteraturen var representative. Det forutsettes at bygningen har adskilt avløpssystem for gråvann og svartvann.

Tanken var å evaluere ytelsen til system med gråvannsgjenvinning mot en konvensjonell kundesentral med fjernvarme. Systemet ble også analysert ved ulike forutsetninger for gråvannsmengder- og temperaturer, og forvarmingstemperaturer på tappevann. Beregningene ble utført med Microsoft Excel om ikke annet er oppgitt. Noen forutsetninger for beregningsmodellen er listet opp nedenfor.

- Tidssteget i beregningene ble satt til en time. Bakgrunnen for dette er at store deler av tilgjengelig informasjon om varmtvannsbehov oppgis i timesverdier, men ikke for kortere intervaller.
- Varmetap fra tanker og rørstrekk, samt strømforbruk til sirkulasjonspumper neglisjeres.
- Alt kaldtvann inn til gjenvinningssystemet holder nettvannstemperatur.
- Varmegjenvinningssystemet antas å oppnå maksimal varmeoverføring omgående.
- Redusert varmeoverføring i varmevekslere som følge av dannelse av belegg og biofilm antas å løses med effektiv filtrering av gråvannet, samt rensing og vedlikehold. Dette dekkes ikke i beregningene.
- Resterende oppvarmingsbehov dekkes av spisslastkilden, fjernvarme.

4.2.1 Systemløsning

Det finnes en rekke måter å gjenvinne varme fra spillvann på. De fleste passive varmevekslerløsningene på markedet fungerer ved at de forvarmer innkommende kaldtvann mens det tappes varmtvann, altså ved momentanveksling. I større boligblokker med mange leiligheter kan det derimot

være aktuelt å akkumulere gråvannet, for så å dra nytte av det når det er varmebehov.

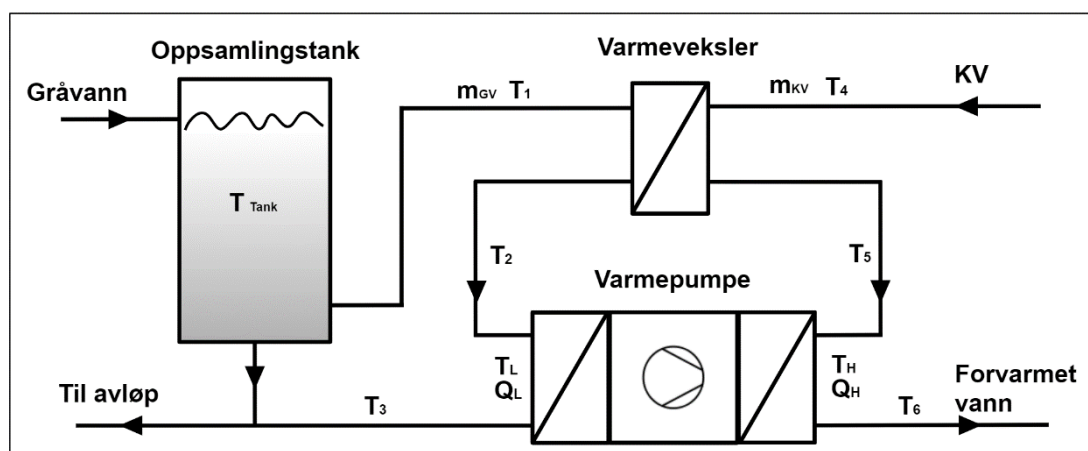
I beregningsstudien ble det valgt å se på en desentralisert løsning med et system for varmegjenvinning innenfor bygningskroppen. Tiltent løsning i dette tilfellet står kun for oppvarming av tappevann, og ikke romoppvarming eller ventilasjonsvarme. En konsekvens av dette er at temperaturen på gråvannet stort sett vil holde en høyere temperatur enn det innkommende kaldtvannet. Dette gir potensielt gunstige forhold for å også benytte en passiv varmeveksler i løsningen.

Det ble derfor besluttet å undersøke en løsning som kombinerer passiv og aktiv gjenvinning. Den foreslåtte systemløsningen for beregningene kan ses nedenfor i Figur 10. Et mer detaljert systemskjema av tiltent anlegg kan ses i Vedlegg 3. Beregningsmodellen består i hovedsak av en oppsamlingstank for gråvann, en varmeveksler og en varmepumpe.

Ved varmebehov i berederen starter varmepumpa og to pumper så lenge det er nok gråvann i oppsamlingstanken. Gråvannet føres først gjennom varmeveksleren, hvor varme overføres til innkommende kaldtvann. Det noe nedkjølte gråvannet føres deretter til varmepumpas fordampere, hvor det gjennomgår ytterligere nedkjøling.

Kaldtvannet forvarmes dermed først passivt i varmeveksleren, før det ettervarmes i varmepumpas kondensator. Overløpsrør fører gråvann til avløp om det tilføres mer enn det er plass til i oppsamlingstanken. I figuren illustrerer ikke varmtvannsberederen, da denne ble beregnet separat.

I de neste avsnittene presenteres benyttet beregningsmetodikk for de ulike delene av systemet.



Figur 10: Foreslått systemløsning.

Varmeveksler: Beregningene av gjenvunnet energi i varmeveksleren baseres på en antatt temperaturvirkningsgrad, ε , samt kjente vannmengder og innløpstemperaturer for henholdsvis kaldtvann og gråvann. Ut i fra dette kan utgående vanntemperaturer og gjenvunnet energi beregnes med formel (1), (2) og (3).

Varmeveksleren forutsettes å ha en temperaturvirkningsgrad på 70 % i beregningene. Bakgrunnen for dette er typiske virkningsgrader oppgitt i artikkelen [23].

Varmepumpe: Varmepumpen i beregningsstudiet forutsettes å benytte konvensjonelt kuldemedium. Andre varianter, som transkritisk CO₂-varmepumpe behandles derfor ikke i dette arbeidet. Beregningene ble basert på noen forutsetninger.

En forutsetning er en fast forvarmingstemperatur, altså et kjent temperaturløft på det innkommende kaldtvannet.

Forskjellen mellom fordampingstemperaturen til kuldemediet og temperaturen på utgående, nedkjølt gråvann ble forutsatt å være 5 grader. Kondenseringstemperaturen ble forutsatt å være 5 grader høyere enn forvarmingstemperaturen på kaldtvannet.

I tillegg ble det antatt et kjent forhold mellom COP og COP_{carnot}, η_{UI} , på 0,5 da dette har blitt benyttet for tilsvarende beregningsstudier tidligere [9]. På bakgrunn av dette ble sammenhengen mellom formel (6), (7) og (8) benyttet til å utlede uttrykket i formel (10) for gråvannstemperaturen etter fordamperen. Med overnevnte forutsetninger kunne varmeopptak i fordampere, nødvendig kompressorenergi og COP beregnes.

$$T_3 = \frac{Q_H \times T_H(1 - n) + \Delta T_{fordamper} \times Q_H + \alpha \times T_2}{(Q_H + \alpha)} \quad (10)$$

$$\text{Hvor } \alpha = \eta_{UI} \times T_H \times \dot{m} \times Cp$$

4.2.2 Regulering av varmeuttak

I beregningen ble det forutsatt at varmeuttak fra gråvannstank skjer når det er ladebehov i varmtvannsbereder, og samtidig gråvann i oppsamlingstanken. Ønsket forvarmingstemperatur holdes konstant i beregningene, og dermed «starter» varmepumpa først når det er nok gråvann i tanken til å kunne forvarme kaldtvannet til ønsket nivå i det aktuelle tidssteget.

Det forutsettes derfor egnede komponenter i varmepumpa, som for eksempel turtallsstyrt kompressor som trinnløst kan regulere etter varmebehovet i det aktuelle tidssteget. Nødvendig ladebehov bestemmes av nødvendig ladeeffekt i varmtvannsberederen.

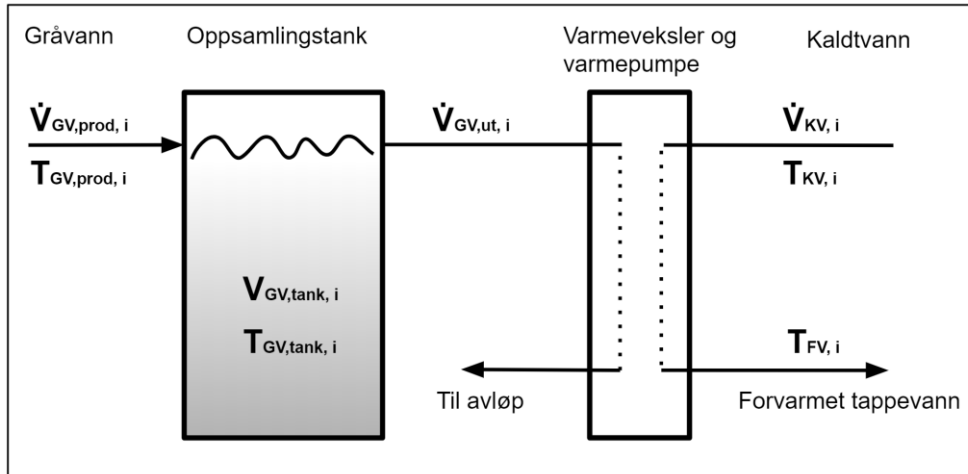
Varmtvannsbereder: Beregningene av berederen ble basert på en estimert forbruksprofil for tapping av varmtvann, i tillegg til middeltemperaturer og en kjent ladeeffekt. Middeltemperatur i tanken ved oppladet tilstand ble antatt å være 65 grader, mens middeltemperaturen for utladet tank ble anslått å være 42,5 grader. Ut i fra dette kunne akkumulert energimengde i tanken samt nødvendig ladeeffekt i hvert tidssteg estimeres.

Oppsamlingstank for gråvann: Gråvannsmengde i oppsamlingstanken ved et gitt tidspunkt, $V_{GV,tank,i}$, beregnes etter formel (11) og (12) nedenfor. I Figur 11 illustreres de ulike parameterne i beregningsmodellen.

$$V_{GV,tank,i} = \begin{cases} V_{GV,tank,i} & \text{hvis } V_{GV,tank,i} \leq V_{GV,tank,maks} \\ V_{GV,tank,maks} & \text{hvis } V_{GV,tank,i} > V_{GV,tank,maks} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{GV,tank,i} = V_{GV,tank,i-1} + (\dot{v}_{GV,prod,i} - \dot{v}_{GV,ut,i})dt \quad (12)$$

$V_{GV,tank,maks}$ er volumet av selve oppsamlingstanken, og dermed den maksimale mengden som kan akkumuleres. $V_{GV,tank,i-1}$ er akkumulert gråvannsmengde i tanken i forrige tidssteg. Variablene $\dot{v}_{GV,prod,i}$ og $\dot{v}_{GV,ut,i}$ representerer henholdsvis innkommende (produsert), og utgående gråvann i det gitte tidspunktet. dt er tidssteget.



Figur 11: Forholdene i systemet i et gitt tidspunkt, i .

Utgående gråvann, $\dot{v}_{GV,ut,i}$, har i beregningene blitt forutsatt å være avhengig av mengden kaldtvann som forvarmes, $\dot{v}_{KV,i}$. Forholdet mellom disse betegnes C , og er det samme forholdet som mellom totalt døgngjennomsnittlig varmtvannsforbruk og gråvannsproduksjon.

Ideen bak dette var å sikre at volumet på oppsamlingstanken ikke ble unødvendig stort. Samtidig sørger det for at mest mulig gråvann utnyttes ved varmeproduksjon, men uten at oppsamlingstanken tømmes så raskt at anlegget må starte og stoppe mange ganger i løpet av et døgn. Uttak av gråvann fra tanken beregnes etter formel (13).

$$\dot{v}_{GV,ut,i} = \begin{cases} \frac{\dot{v}_{KV,i}}{C} & \text{hvis } \frac{\dot{v}_{KV,i}}{C} \leq (V_{GV,tank,i-1} + \dot{v}_{GV,prod,i} \times dt) \\ 0 & \text{hvis } \frac{\dot{v}_{KV,i}}{C} > (V_{GV,tank,i-1} + \dot{v}_{GV,prod,i} \times dt) \end{cases} \quad (13)$$

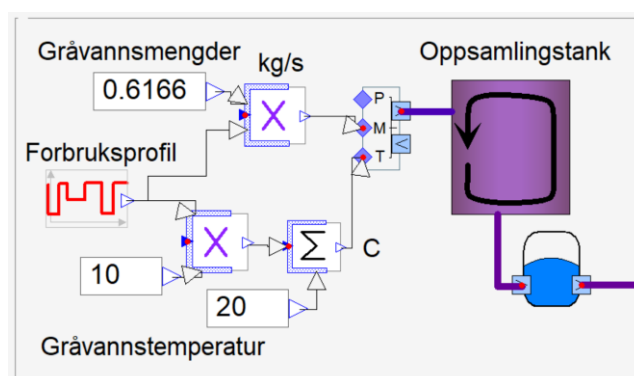
Mengden kaldtvann til forvarming, $\dot{v}_{KV,i}$, beregnes etter nødvendig ladeeffekt i bereder ved tidspunktet, og etter ønsket forvarmingstemperatur (temperaturløft), se formel (14).

$$\dot{v}_{KV,i} = \frac{\text{Nødvendig ladeeffekt bereder}}{\rho \times C_p \times (T_{FV} - T_{KV})} \quad (14)$$

Temperatur i oppsamlingstank: Temperaturforholdene i oppsamlingstanken ble estimert ved en enkel simulering i det dynamiske beregningsprogrammet IDA ICE. Programmet innehar en funksjon kalt «Advanced level only». Denne kan benyttes til å bygge og teste alt i fra enkle

reguleringsstrategier, til hele energisentraler. I simuleringsmodellen ble det valgt en tank-modell uten termisk sjikting, og uten varmetap. Figur 12 viser hvordan simuleringsmodellen ble utformet.

En forutsetning for dette er at tanken er ekstremt godt isolert, og at tankens geometriske utforming er på en måte som gjør at temperatursjikting kan neglisjeres. Det var dermed kun innkommende gråvann som påvirket temperaturforholdene i tanken. IDA ICE opererer i utgangspunktet med variable tidssteg, men dette kan overstyres av bruker. I simuleringene av tanken ble det benyttet et tidssteg på en time.



Figur 12: Tank-modellen i IDA ICE. Modellen ble benyttet for beregning av temperaturforholdene i oppsamlingstanken for gråvann.

4.2.3 Varighet

Beregningsmetodikken beskrevet ovenfor kan ta hensyn til timesverdier i tillegg til ulikt forbruksmønster i og utenfor ukedag. Det var derfor usikkerhet knyttet til om variasjoner underveis i beregningene kunne forekomme. Varigheten på beregningene ble for sikkerhets skyld satt til 28 døgn, altså fire uker.

Tidsintervaller som ga resultater som så ut til å representere en typisk periode kunne da brukes videre til å estimere anleggets ytelse på årsbasis. En forutsetning for dette er at alle uker i året er like. Eventuell påvirkning av ferieuker ble dermed utelatt i dette arbeidet.

4.3 Lønnsomhet

Ved vurdering av lønnsomheten for et tiltak eller prosjekt benyttes vanligvis nåverdimetoden. Metoden innebærer at alle inn- og utbetalinger knyttet til tiltaket tilbakeføres, eller diskonteres, til et gitt tidspunkt, ofte til dagens nivå. Dette gir et bilde av prosjektets lønnsomhet. Hvis nåverdien er positiv, er prosjektet lønnsomt, mens negativ nåverdi stort sett forbindes med en negativ lønnsomhet. I dette arbeidet ble funn i litteraturen, sammen med noen enkle forutsetninger, brukt til å anta vannforbruk og gråvannskaraktistikk. Det er disse estimatene som dannet grunnlaget for potensialet som undersøkes med systemløsningen beskrevet i kapittel 4.2.1. Det er i tillegg den samme systemutformingen som ble benyttet i alle beregningene. Av den grunn ble det besluttet å kun gjøre en analyse av nåverdien til energibesparelsen. Nåverdien av energibesparelsen kan da, sammen med nåverdien av drifts- og vedlikeholdskostnader, benyttes til å vurdere en tillatt merinvestering for tiltak som medfører redusert energibehov. Investeringskostnaden, samt drifts- og vedlikeholdskostnader har ikke blitt estimert i dette arbeidet. Nåverdien av energibesparelsen ble beregnet etter metodikken i tillegg D.2 i NS 3454:2013, se formel (15) og (16).

$$NV_{\text{energibesparelse}} = \text{\AA rlig energibesparelse} \times d_T \quad (15)$$

$$d_T = \frac{(1+r)^T - 1}{r \times (1+r)^T} \quad (16)$$

Hvor $NV_{\text{energibesparelse}}$ er nå nåverdien av energibesparelsen, d_T er sumfactoren, T er forventet levetid og r er kalkulasjonsrenten. Forutsetninger for lønnsomhetsbetraktningen er listet opp nedenfor.

- Levetid for varmepumpe og varmeveksler antas å være 20 år [36].
- Kalkulasjonsrente 6 %.
- Virkningsgrad for fjernvarme er 0,98, og 1,00 for elektrisitet levert til varmepumpas kompressor. Bakgrunnen for produksjonsvirkningsgraden for fjernvarme, er tabell B.9 i NS 3031.
- Pris for elektrisitet og fjernvarme er henholdsvis 78,4 og 66,9 øre/kWh. Verdien er basert på statistikk fra SSB fra 2016 og 2017. Prisen på strøm inneholder kraftledd, nettleie og avgifter. Begge verdien er uten merverdiavgift.

4.4 Sensitivitet og usikkerhet

En sensitivitetsanalyse benyttes i hovedsak til å evaluere resultatenes sensitivitet når enkeltparametere varierer. I dette arbeidet ble resultatene undersøkt med hensyn til tre parametere som ble ansett som usikre.

Mengde og temperatur

Estimerte gråvannsmengder ble basert på en kombinasjon av funn i litteraturstudiet, og forfatterens egen oppfatning av trender og drivere som kunne tenkes å påvirke forbruket. Den daglige gråvannsproduksjonen er avhengig av forbruket av varmt og kaldt tappevann. På bakgrunn av dette ble det også gjort et forsøk på å anslå et sannsynlig høyt og lavt forbruk. Den estimerte gråvannstemperaturen ble også ansett som usikker. Denne ble i hovedsak basert på verdier funnet i litteraturen. Som for mengden gråvann, ble det også for temperaturen forsøkt å anslå en høy og lav verdi.

Utvikling energipriser

Lønnsomheten av energiøkonomiske tiltak er avhengig av prisen på energi. Høyere energipris øker lønnsomheten, og det motsatte skjer ved lavere energipriser. Fremtidige priser på elektrisitet og fjernvarme er usikre, og fører dermed til en usikkerhet rundt lønnsomhetsberegningene.

Kraftprisen er avhengig av flere faktorer og kan variere en del fra år til år. I følge tall fra SSB økte prisen på elektrisitet omtrent 20 % fra 2012 til 2017. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig økning på 3,3 % per år [37]. Prisen for fjernvarme økte i gjennomsnitt 12 % fra 2015 til 2016. Dette kan ses i sammenheng med økning av strømprisen i samme periode. I dette arbeidet forventes fjernvarmeprisen å følge utviklingen elektrisitetsprisen også i årene fremover [38].

Flere ferske markedsanalyser indikerer at det norske kraftsystemet ventes å gå gjennom store endringer de neste årene [39, 40]. Elektrifisering av energiforbruket øker etterspørselen etter kraft, samtidig som utvekslingskapasiteten mellom Norden og resten av Europa er ventet å øke betraktelig mot 2030. Et strammere CO₂-marked kan slå ut på norske kraftpriser gjennom handel med land med stor gass- og kullproduksjon. Analysen i en rapport fra NVE antyder at kraftprisen kan stige med 6-7 øre/kWh frem mot 2030. En markedsanalyse fra Statnett oppgir forventninger om 40-50 euro/MWh i hele Nordvest-Europa mot 2030. Det er derimot stor usikkerhet rundt fremtidig markedsutvikling.

5 RESULTATER OG DISKUSJON

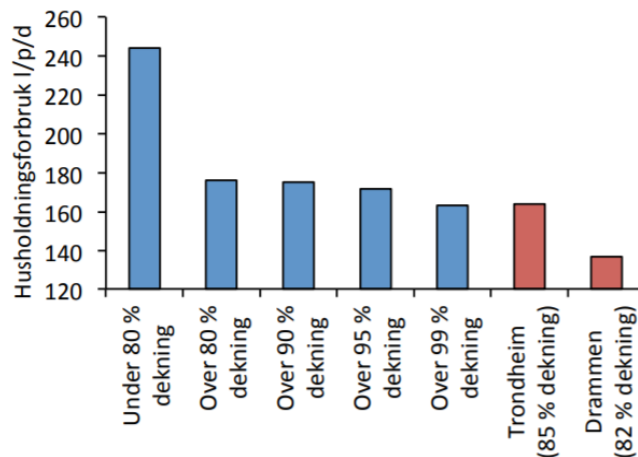
I dette kapitlet presenteres og diskuteres resultatene. Den første delen består av en gjennomgang av verdier og erfaringstall som ble funnet i litteraturstudien. Dette etterfølges deretter av en analyse hvor relevante funn sammenstilles, og estimerte verdier presenteres. Disse estimatene har videre blitt benyttet i beregningsstudien, som utgjør siste delen av kapitlet.

5.1 Litteraturstudie

5.1.1 Vannforbruk i husholdninger

Det er en del usikkerheter knyttet til reelt vannforbruk i norske husholdninger. En av grunnene er at mange norske kommuner har lav vannmålerdekning sammenlignet med kommuner i andre europeiske land [41]. I følge tall fra SSB har gjennomsnittlig husholdningsforbruk de siste årene ligget på rundt 200 liter per person per døgn [42]. Dette er derimot høyere enn gjennomsnittstall fra kommuner med høy vannmålerdekning, se Figur 13. Figuren ble presentert i artikkelen «Vannforbruk i husholdninger, en erfaringsinnhenting», [41], og er basert på et prosjekt utført av Norconsult våren 2014.

I artikkelen foreslås 160 l/pd som et nasjonalt bransjetall. I en nyere rapport fra 2016, utarbeidet av Sintef og Norconsult, foreslås det å redusere dette estimatet ytterligere til 140 l/pd [43]. Vannforbruket er generelt høyere i eneboliger og småhus enn i boligblokker. Dette skyldes blant annet at det i hus også benyttes vann til formål utendørs. Spesifikt vannforbruk i husholdninger har gått ned flere titalls prosent de siste årene i flere av landene som ble undersøkt i rapporten fra 2014 [41].



Figur 13: Gjennomsnittlig vannforbruk for husholdninger i norske kommuner med ulik grad av vannmålerdekning. Figur hentet fra [41].

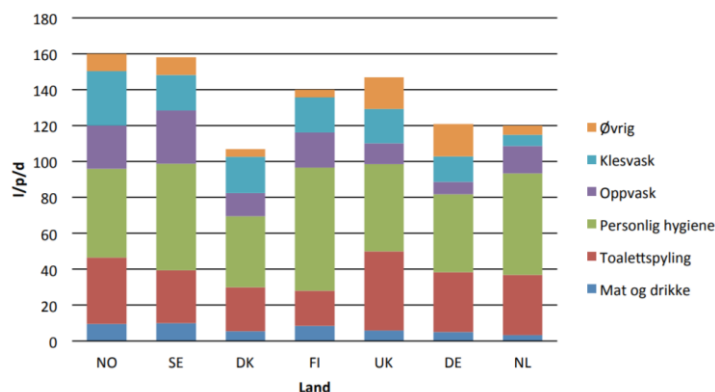
I Sverige har også vannforbruket gått ned de siste årene. På 80- og 90-tallet var gjennomsnittet henholdsvis 220 og 200 l/pd, mens det i 2013 lå på rundt 158 l/pd [41]. Stockholm hadde fortsatt et høyt forbruk på rundt 200 l/pd i 2013, mens det i Göteborg hadde sunket fra 171 l/pd til 156 l/pd de siste årene. Tall fra Svensk Vatten antyder at gjennomsnittlig vannforbruk i dag kan ligge på rundt 140 l/pd [44]. De fleste husholdninger i Sverige har installert vannmålere, men flermannsboliger har gjerne felles måler.

I Finland ligger gjennomsnittlig forbruk på 120 og 150 l/pd for husholdninger med henholdsvis individuell og felles vannmåler [41]. Gjennomsnittlig husholdningsforbruk i Helsinki ligger på rundt 140 l/pd. Vanntilgang og kvalitet er generelt god i både Sverige og Finland.

I Danmark har forbruket gått ned omtrent 13 % de siste årene, og forbruket lå i 2013 på 107 l/pd. Dette er en del lavere enn de andre skandinaviske landene og skyldes blant annet kombinasjonen av vannmålere og prisstruktur, samt innføring av vanngjerrig teknologi. Vanntilgangen i Danmark er også mer begrenset enn andre skandinaviske land og består nesten utelukkende av grunnvann. Estimert forbruk i København var 104 l/pd i 2013.

Artikkelen «Vannforbruk i husholdninger, en erfaringsinnhenting» tok også for seg likhetstrekk mellom flere europeiske byer [41]. Studien fant det mest hensiktsmessig å sammenligne Oslo med Göteborg eller Stockholm. Felles for byene var blant annet lave vannpriser og lav motivasjon til å spare vann, i tillegg til høyt forbruk, sosial adferd og generell økonomi. Med hensyn til klimatiske forhold, størrelse, og bystruktur ble det

konkludert med at Göteborg var byen det var mest riktig å sammenligne Oslo med. Det ble påvist en sterk sammenheng mellom prisen på vann og vannforbruk. Figur 14 nedenfor viser spesifikt forbruk for husholdninger for noen europeiske land.



Figur 14: Spesifikt døgnforbruk av vann i liter per person for husholdningen, fordelt på ulike delposter. Kategorien "øvrig" inkluderer utendørsforbruk. Figur hentet fra [41].

5.1.2 Varmtvann

Det foreligger lite informasjon om faktisk varmtvannsforbruk i Norge [45]. I 2017 ble det derfor igangsatt et forskningsprosjekt som skal øke kunnskapen rundt bruk av varmt tappevann. Prosjektet har fått navnet Varmt-Vann 2030, og er et samarbeid mellom Sintef, NTNU og flere bransjeaktører. Det skal utføres tappevannsmålinger i sykehjem, hoteller og boliger. I skrivende stund er det foreløpig ikke utført målinger i boligblokker, men dette er planlagt å starte opp i oktober 2018 og fortsette videre inn i 2019 [46].

Norske erfaringstall for energibruk til varmtvann anslår omtrent 1600 kWh per person per år, og 20-35 kWh/m²*år [1]. Det er derimot uklart hva som er bakgrunnen for dette, og om verdiene inkluderer systemtap.

En studie fra 2014 undersøkte husholdningsforbruk i leiligheter i Oslo ved hjelp av data fra litteratur, og ved hjelp av tall fra 2009 fra Oslo VAV [47]. Studien estimerte spesifikt varmtvannsrelatert energibruk til 3,79 kWh per person per døgn. Av dette utgjorde klesvask 46 %, bad, dusj og hygiene utgjorde 43 %, og oppvask utgjorde 11 %.

Internasjonalt

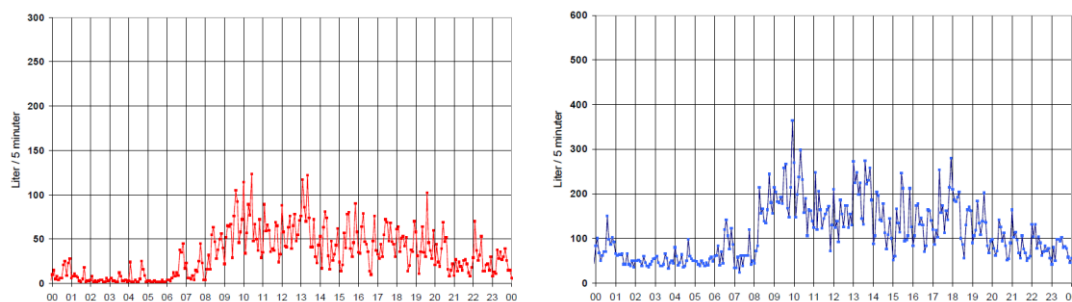
Det eksisterer en hel del litteratur om varmtvannsforbruk internasjonalt. Litteratursøket ble derimot begrenset til litteratur fra de andre

skandinaviske landene, samt Finland. I noen av de gjennomgåtte studiene var det uklart om det var snakk om gjennomsnittstall for samtlige boligtyper, eller spesifikt for bolighus og leiligheter.

SVERIGE: En rapport utgitt av Statens Energimyndighet i 2011 tok for seg erfaringstall fra bransjen, samt måledata fra Energimyndigheten og en rekke andre svenske studier [48]. Blant erfaringstall varierte varmtvannsforbruket mellom 50 og 100 l/pd. Resultatene fra en rekke målinger hadde en middelværdi på rundt 82 l/pd. Det må bemerkes at det i denne verdien ble inkludert en dominerende dataserie fra Svenska Bostäder som representerte nesten 70 000 personer. Uten denne lå gjennomsnittlig varmtvannsforbruket på rundt 63 l/pd. Varmtvann utgjorde her 35-40 % av totalt vannforbruk.

Forbrukskurvene i Figur 15 representerer forbruk av varmt og kaldt vann over døgnet en lørdag i 2008, og er hentet fra en rapport fra 2009 [49]. Resultatene bygger på målinger som ble utført i et borettslag med 110 leiligheter i Göteborg. Målinger ble utført i ni leiligheter, og i varmesentralen for hele borettslaget.

Kurven for varmtvann er generelt jevnere fordelt utover dagen, men forbrukstopper morgen og kveld er fortsatt tydelige. Profilen for varmtvann ser også ut til å følge profilen for kaldt vann. Gjennomsnittlig varmtvannsforbruk var 50 l/pd, mens det totale vannforbruket lå på 157 l/pd. Varmtvann utgjorde 32 % av totalt vannforbruk i borettslaget. Det fremkom også at gjennomsnittsverdien for de ni leilighetene hadde avvik sammenlignet med gjennomsnittet for hele borettslaget.

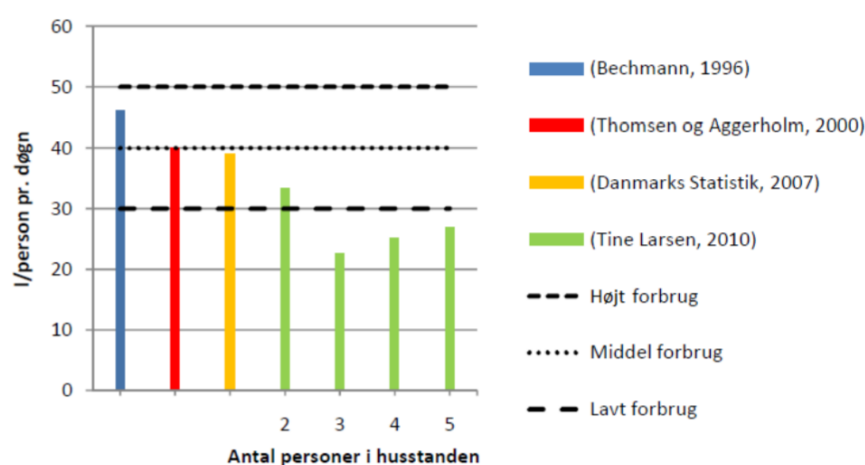


Figur 15: Varmtvannsforbruk (t.v) og kaldtvannsforbruk (t.h) for 110 leiligheter i Göteborg lørdag 08.03.2008. Figur hentet fra [49].

DANMARK: Som nevnt innledningsvis er gjennomsnittlig husholdningsforbruk av vann lavere i Danmark enn for resten av Skandinavia. En dansk

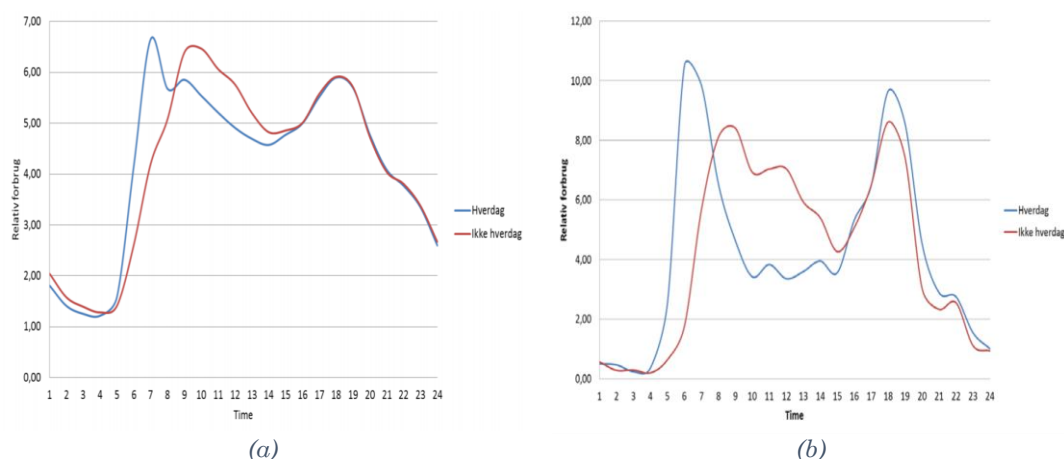
rapport fra Ålborg Universitet i 2011 tok for seg en rekke studier som undersøkte forbruk av kaldt og varmt vann i danske boliger [50].

Gjennomsnittlig døgnforbruk av varmtvann ble anslått til rundt 40 liter per person, med en øvre og nedre grense på $\pm 25\%$. Dette illustreres i Figur 16. De fire grønne stolpene i figuren stammer fra målinger i sju eneboliger med mer enn en beboer. Det ble videre antatt at disse resultatene ikke representerte en gjennomsnittlig andel av befolkningen. Grunnen er at boenheter med bare en beboer sannsynligvis ville ha trukket opp gjennomsnittet siden en del av varmtvannsforbruket kan knyttes til felles oppgaver i boligen.



Figur 16: Oppsummering av gjennomsnittlig varmtvannsforbruk i Dansk studie. Figur hentet fra [50].

Figur 17 (a) viser relativt forbruk av kaldtvann basert på data fra et vannverk i januar, juni og august 2007. I Figur 17 (b) illustreres en midlet forbruksprofil for varmtvann i sju hus [50]. Ulikheter mellom de to profilene kan forklares med at det er forskjell på hva varmt og kaldt vann benyttes til. Forbrukstoppene ser ut til å opptre til samme tid for begge grafene, men er opp mot 50 % høyere for varmtvann enn for kaldtvann. Varmtvannsandelen av totalt vannforbruk lå på rundt 40 % [51].



Figur 17: Forbruksprofiler for hverdager og «ikke hverdager» for kaldtvann (a) og varmtvann (b). Figur hentet fra en dansk studie [50].

FINLAND: En studie fra 2015 undersøkte daglig varmtvannsforbruk i fire boligblokker i Tampere, Finland [11]. Totalt ble det utført målinger i 182 utleie-leiligheter med til sammen 379 beboere i 2012 og 2013. Rundt 24 % av beboerne ble antatt å være under atten år. Oppvarming til leilighetene ble levert med fjernvarme. Forbruk av varmt og kaldt vann ble registrert for hver leilighet ved hjelp av vannmålere.

Gjennomsnittlig døgnforbruk av varmtvann var 43 liter per person per dag. Det ble observert små forskjeller i forbruk mellom hverdager og helger, henholdsvis 43 og 42 l/pd. Studien viste også at forbruket var noe lavere (40 l/pd) i sommermånedene og høyere (46 l/pd) på vinteren. Andelen varmtvann av totalt vannforbruk lå på rundt 40 %.

I en annen studie fra 2016 ble også varmtvannsforbruk målt [52]. Målinger ble utført i 86 leiligheter med 191 beboere i Helsinki, Finland i perioden mai 2014 til februar 2015. Forskjellen på studien fra 2015 var at de her så på varmtvannsforbruk time for time.

Resultatene viste at det var to forbrukstopper per døgn. På ukedager oppstod den første toppen på morgenen mellom klokka sju og ni, og den andre oppstod på kvelden mellom klokka åtte og ti. Utenom ukedager forekom den første toppen noe senere, mellom ti og ett. Forbrukstoppen på kvelden var mellom klokka åtte og ti, og var dermed lik ukedager.

Ulike forbruksprofiler ble presentert for august og november for ulike persongrupper, og for helg og ukedag. Det ble observert at forbrukstoppene i tilfellene for små persongrupper var opptil fire ganger høyere sammenlignet med gruppene med et stort antall personer. Ved ti personer eller mer, ble forbrukskurven mer og mer lik gjennomsnittsprofilen for samtlige

personer. Ved omtrent femti personer og oppover var det kun minimale forskjeller i forbruksprofilene. Studien foreslår derfor å ta hensyn til byggets størrelse og antall personer ved valg av forbruksprofil når tekniske anlegg til varmt forbruksvann skal dimensjoneres. Andelen varmtvann av totalt vannforbruk lå på rundt 33 %, men variasjoner mellom 10 og 39 % ble observert i løpet av døgnet.

Varmtvannets andel av totalt vannforbruk

Tabell 3 nedenfor oppsummerer varmtvannets andel av totalt vannforbruk i husholdningen. Verdiene stammer fra erfaringstall og data funnet i litteraturen.

Tabell 3: Varmtvannsforbrukets andel av totalt vannforbruk. Verdier fra litteraturen.

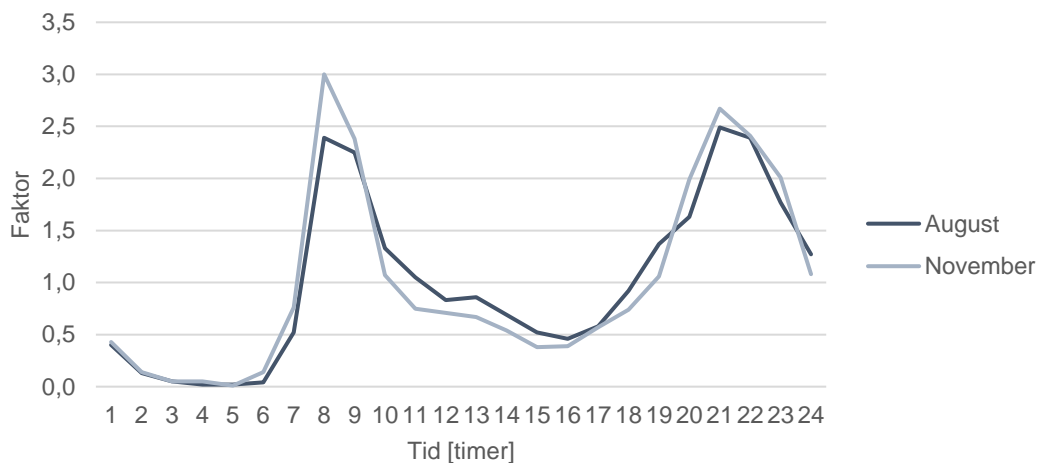
Sted	Varmtvann andel [%]	År	Kommentar	Kilde
Sverige	35-40	2011	Erfaringstall og måledata	[48]
Göteborg, Sverige	32	2009	Måledata i ni leiligheter, samt borettslag m. 110 leiligheter	[49]
Danmark	~40	2011	Vurdering av en rekke danske studier	[50]
Tampere, Finland	~40	2015	Måledata fra 2012 og 2013 i 182 utleie-leiligheter med 379 beboere	[11]
Helsinki, Finland	33 (0,10-0,39)	2016	Måledata: 86 leiligheter med 191 beboere	[52]

Sesongvariasjoner

Enkelte studier har også undersøkt forbrukets variasjoner over året. Erfaringene ser ut til å variere. En dansk rapport fra 2011 undersøkte data med bakgrunn fra en lang rekke målinger i flere typer boligbygg [50]. Studien gjorde ingen signifikante funn som kunne danne relasjoner mellom forbruk av varmt vann og årstid. En sveitsisk studie fant heller ikke noen stor korrelasjon mellom utendørs temperatur og forbruk av varmt tappevann [10].

Måledata fra leiligheter i Helsinki i Finland avdekket derimot sammenhenger mellom forbruket på sommeren og vinteren. Dette er illustrert i Figur 18. I artikkelen foreslås det korreksjonsfaktorer, slik at gjennomsnittlig varmtvannsmengde per person kan justeres for hver måned i året [52].

I en kanadisk studie viste det seg at forbruket vinterstid lå 9,6 % høyere enn sommerforbruket, og 2,9 % over årsgjennomsnittet. Forbruket på sommeren lå 5,8 % under årsgjennomsnittet [12]. Det oppgis at en av grunnene til dette, kan være at lavere temperatur på innkommende kaldtvann på vinteren medfører at mer varmtvann benyttes til formål som vanligvis bare ville involvert kaldtvann. Sesongvariasjoner ser også ut til å kunne variere en del innenfor samme land. I New York har det for eksempel blitt observert et økende forbruk av varmt tappevann på dager med høy utetemperatur, mens det motsatte ble observert i Florida [10].



Figur 18: Forbruksprofiler (ukedag) for sommer og vinter i Finland. Y-aksen representerer faktoren som må multipliseres med gjennomsnittlig timesverdi. Grafen er laget med data hentet fra artikkelen [52].

5.1.3 Gråvann

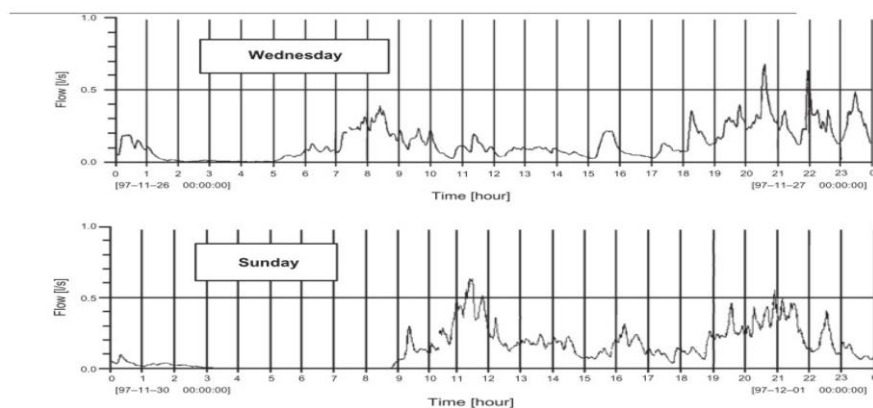
Norsk litteratur er mangelfull når det kommer til gråvann i boliger, og europeisk litteratur stammer i hovedsak fra Tyskland og Sverige [21]. Ut i fra størrelsen på de ulike postene presentert i en norsk studie, [41], kan det se ut som en gjennomsnittlig gråvannsmengde per person ville ligget på omtrent 100 l/pd, se Tabell 4. Dette forutsetter et totalt vannforbruk på 160 l/pd, og at det kun er personlig hygiene, klesvask og oppvask som bidrar. Andelen gråvann av totalt vannforbruk blir da 65 %.

Tabell 4: formålsdelt vannforbruk i husholdninger. (* felles verdi for mat, drikke og oppvask)

Toalett [%]	Personlig hygiene [%]	Mat og drikke [%]	Oppvask [%]	Klesvask [%]	Øvrig [%]	Kilde
23,0	31,0	6,0	15,0	19,0	6,0	[41]
22,1	37,2	16,3*		12,4	12	[47]

I Sverige har det i flere studier blitt gjort målinger av gråvannsmengder i boliger. Tidligere ble et døgngjennomsnitt på 150 liter per person regnet som et godt estimat [53]. Studier har derimot vist til gjennomsnittsverdier fra i underkant av 90 l/pd til i overkant av 100 l/pd [22].

Målinger av gråvann ble gjennomført i boligfeltet Viabyåsen i nærheten av Stockholm. Husene ble bygget i 1997, og boligfeltet bestod da av 47 småhus og 169 beboere. Alle hus i boligfeltet har separert avløp for gråvann og svartvann. Målingene viste at gjennomsnittlig gråvannsmengde var 66 l/pd [54]. Variasjonen i løpet av døgnet i Viabyåsen er vist i Figur 19. I en annen svensk studie fra 2005 foreslås 100 liter per person per dag som en dimensjonerende verdi for boliger i Sverige [55].



Figur 19: Målte gråvannsmengder i Viabyåsen i Sverige en onsdag og en søndag i November 1997. Gjennomsnittlige mengder var 68 l/pd og 71 l/pd for hhv. onsdag og søndag. Figur hentet fra [22].

I en omfattende tysk studie fra 2015 ble gråvannskarakteristikk undersøkt ved en gjennomgang av mer enn 140 tidligere studier. I tillegg ble det utført målinger i leiligheter i Berlin og småhus i Lübeck [21]. Rundt 70 % av litteraturen som ble undersøkt stammet fra Europa, hvorav 58 % kom fra Tyskland, 16 % fra Sverige og 11 % fra Nederland.

Gjennomsnittlig gråvannsmengde i litteraturen var på rundt 79 l/pd, med en variasjon mellom 48 og 114 l/pd. Måledata fra leilighetene i Berlin hadde et gjennomsnitt på 78 l/pd. Andre studier har oppgitt 90 til 120 l/pd som typisk gjennomsnittsverdi i land med høy levestandard [56, 57].

Selv om gråvannsmengder varierer mye i litteraturen, ser det ut til at spredningen er langt mindre for gråvannets andel av innkommende vann og spillvann. Felles for flere europeiske studier er at gråvannet i gjennomsnitt utgjør 60-75 % av alt spillvann som produseres i husholdningen, og at 60-70 % av det totale vannforbruket ender som gråvann. En oppsummering kan ses i Tabell 5.

Tabell 5: Gråvannets andel av totalt spillvann og av totalt vannforbruk i husholdninger.

Gråvann andel av innkom- mende kaldt- vann	År og kilde	Gråvann andel av spillvann	År og kilde
[%]		[%]	
~65	2015 [41]	65-75	2013 [58]
60-70	2004 [59]	75	2002/07 [25, 53]
64	2018 [23]	60-75	2014/15 [3, 21]
69	2013 [58]	65	2006 [57]
		70	2015 [24]
		70-75	2005 [54]

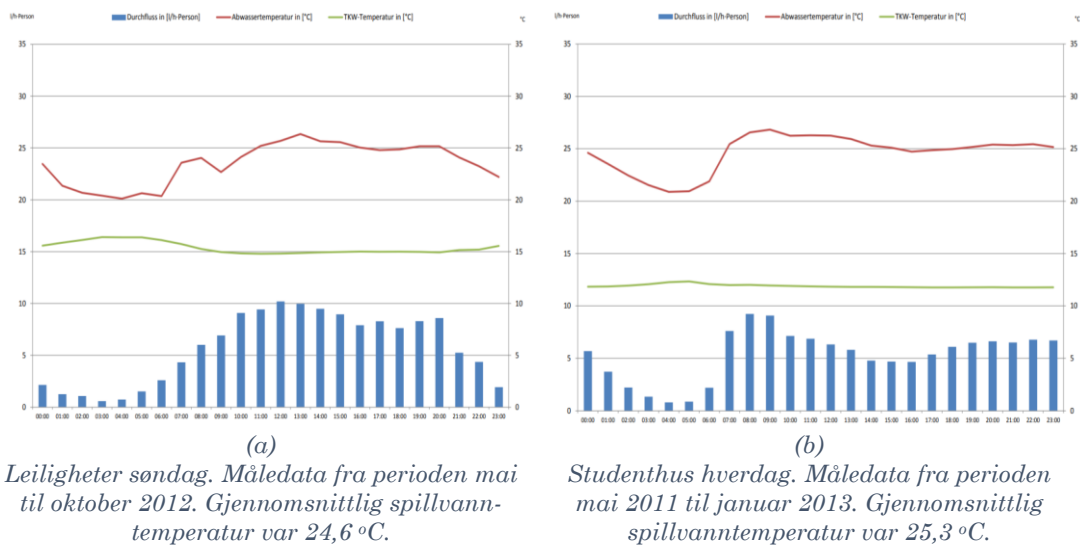
Temperatur

I forbindelse med en tysk studie i 2014 ble det utført målinger i 20 leiligheter med 51 beboere i Berlin [3]. Gråvannstemperaturen lå for det meste på mellom 20 og 30 grader, og mengdevektet temperatur ble estimert til 22,6 grader. Variasjonene i gråvannstemperaturen fulgte variasjonene i

vannmengder. De høyeste vanntemperaturene ble registrert når mengdene var størst. I studien ble det også gjort simuleringer av flere systemløsninger for gråvannsgjenvinning. Forutsetningene for beregningene ble basert på målingene, og en variasjon på 20-30 grader ble brukt.

I forbindelse med en annen tysk rapport fra 2015 ble det utført målinger i seks bygninger [60]. Blant disse var to leilighetskomplekser med 19 og 49 beboere, og to studentboliger med 209 og 244 beboere. Målingene registrerte totalt vannforbruk, produsert spillvann (gråvann og svartvann) og vanntemperaturer. Målinger av spillvann ble foretatt i samlestock for samtlige leiligheter, men innenfor bygningen.

Gjennomsnittlig daglig spillvannstemperatur i alle bygningene var rundt 21,0 - 26,1 grader. Også i denne studien ble de høyeste spillvannstemperaturene registrert når vannmengdene var størst. Dette illustreres i Figur 20. En oppsummering av gråvann- og spillvannstemperaturer fra litteraturen kan ses i Tabell 6.



Figur 20: Spillvannstemperatur (rød linje), spillvannsmengder (søyler) og temperatur på innkommende kaldtvann (grønn linje) for en boligblokk (a) og en studenthybel (b) i Tyskland. Figur hentet fra [60].

Tabell 6: spill- og gråvannstemperaturer fra litteraturen.

Type	Temperatur [°C]	Kilde
Gråvann		
Litteraturstudie.	18-30	[57]
Litteraturstudie.	18-38	[25]
	25-40	[1]
Målinger i boligblokk i Tyskland	29,4 (14,6-43)	[3]
Lyst gråvann. Målinger i studentbolig i Tyskland	30	[3]
Målinger i Berlin, mengdevektet	22,6 (21,1-24,6)	[3]
Spillvann / kloakk		
Spillvann. Leiligheter og studenthus, Tyskland	21-26	[60]
Spillvann (gråvann + svartvann) inne i bygningen. Flere forskjellige bygg.	16-23	[3]
Avløpsvann i kommunalt nett	10-15	[3]
Spillvann. Målt i fire boliger i Tyskland	23-25	[3]
Spillvann. Hus og boligblokk	16-38	[3]

5.2 Estimert forbruk

På bakgrunn av innhentet informasjon og litteratur, ble det gjort et forsøk på å estimeres typiske gjennomsnittsverdier som kunne benyttes som grunnlaget i beregningene. Forutsetningene som har blitt brukt her, er en kombinasjon av funn i litteraturstudiet, og forfatterens oppfatning av trender og drivere som kan tenkes å påvirke et «typisk norsk forbruk». I de følgende avsnittene benyttes de viktigste funnene i litteraturen i et forsøk på å estimere følgende:

- Totalt vannforbruk
- Totalt varmtvannsforbruk
- Gråvannsmengder
- Gråvannstemperatur
- Forbruksprofiler for både varmt tappevann og gråvann

5.2.1 Varmtvann og totalt vannforbruk

Som et utgangspunkt, ble det sett på energibehovet til varmt tappevann fra SN/TS 3031:2016. Verdiene i TS er basert på nyere og flere studier enn NS 3031:2014. Det har samtidig vært antydning at den normerte verdien i NSen kan være satt noe høyt.

I timesverdiene gitt i TS er det ikke energibehov til varmtvann på natten, noe som det antas at det ville ha vært hvis systemtap var inkludert. Som en innledende forutsetning ble derfor verdiene i TS ansett som netto behov ved tappested. Dermed ble energibehovet benyttet til å estimere varmtvannsmengden direkte, se Tabell 7.

Tabell 7: Gjennomsnittlig energibehov til varmt tappevann i SN/TS 3031:2016, og beregnet tappevannbehov i liter per person per døgn.

Hva	Verdi	Enhet
Gjennomsnittlig energibehov til varmt tappevann i SN/TS 3031:2016	68,65	Wh/(m ² *d)
Spesifikt tappevannsbehov	50,88	l/pd

Varmt tappevann utgjør mellom 32 og 40 % av det totale vannforbruket i husholdningen (Tabell 3). Videre ble det derfor antatt en varmtvannsandel

på 35 %. Med et varmtvannsbehov på 50,9 l/pd ble totalt vannforbruk per person omtrent 145 liter per dag. Dette er bare noen prosent høyere enn 140 l/pd, som ble foreslått som nasjonalt bransjetall i en rapport fra 2016 [43]. I rapporten ble det dessuten bemerket tall fra SSB (rundt 200 l/pd) var urealistisk høye, og at tidligere bransjetall på rundt 160 l/pd sannsynligvis også var litt høyt. Den beregnede verdien anses derfor som et rimelig anslag.

Anslått vannforbruk er dermed høyere enn det som fremkommer av litteratur fra Danmark og Finland. Der er gjennomsnittlig varmtvannsforbruk nærmere 40 liter per person per døgn. I Danmark er også totalt vannforbruk lavt. På bakgrunn av det som har fremkommet i litteraturstudiet anses det derimot mer riktig å sammenligne med svenske verdier.

Gjennomsnittstall for Sverige lå i 2013 på 158 l/pd, mens ferskere tall fra hjemmesidene til Svensk Vatten antyder at vannforbruket i dag kan ligge på 140 l/pd [44].

5.2.2 Gråvannsmengder

Gråvannsmengder i litteraturen varierer mye fra studie til studie, og mellom ulike land. Dette kommer av at forbruket i stor grad er styrt av den enkelte beboer, og fordi mange av studiene har basert resultatene på et begrenset antall målinger. Det er også stor spredning i omfang og varighet av de målinger som er utført. I gjennomgangen av litteraturen har det derimot vært langt mindre variasjon i andelen av husholdningsforbruket som ender som gråvann. Dette ser ut til å ligge i området 65-70 % (Tabell 5). Med et totalt vannforbruk på 145 l/pd gir dette en daglig gråvannsmengde på 94-102 liter per person.

Gjennomsnittet fra en omfattende Tysk studie var 79 l/pd, men med et spenn fra 48 til 114 l/pd. Studien tok for seg et stort antall litteratur, i hovedsak basert på tyske, svenske og nederlandske tall. Funn i litteraturen har vist at Sverige sannsynligvis havner i det øvre sjiktet her.

En studie fra 2005 foreslo dessuten 100 l/pd som et nasjonalt bransjetall i Sverige. Med tanke på likheter mellom Norge og Sverige, antas det videre en gråvannsmengde på omtrent 100 liter per person per dag. Andelen av det totale vannforbruket i husholdningen som ender som gråvann er dermed omtrent 69 %. En oppsummering kan ses i Tabell 8.

Tabell 8: Oppsummering av estimert spesifikt vannforbruk (KV), varmtvannsforbruk (VV) og gråvann (GV) per person per dag.

Parameter	Forutsetning	Resultat
Energi til varmt tappevann	3,44 kWh/pd	VV 50,9 l/pd
Varmtvann andel av tot. vannforbruk	35 %	KV 145,4 l/pd
Gråvann andel av tot. vannforbruk	69 %	GV 100,3 l/pd

5.2.3 Gråvannstemperatur

Det antas at det som er funnet av temperaturer i litteraturen er mer overførbart til «norske» forhold. Bakgrunnen for dette er at samme type aktiviteter ofte vil kreve vanntemperaturer i samme område. For eksempel er det sannsynlig at folk flest foretrekker samme temperatur når de dusjer, uavhengig av om personen er tysk, svensk eller norsk. De mest dominerende gråvannsproduserende aktivitetene innebærer vanligvis vanntemperaturer over 30 grader. Fra funnene i litteraturen har følgende antagelser blitt gjort.

- Forventet gråvannstemperatur er 20-30 °C.
- Temperaturen omfatter alt gråvannet fra bygget. Ekskluderes vann fra kjøkkenkum kan sannsynligvis temperaturen være høyere, men dette innebærer også reduserte vannmengder.
- Temperaturen representerer innkommende gråvann i samlestock eller eventuell gråvannstank innenfor bygningens klimaskall.
- Temperaturen på gråvannet er høyest når massestrømmen er størst, og lavest ved minste massestrøm.

5.2.4 Forbruksmønster

På bakgrunn av innhentet informasjon og litteratur ble det gjort et forsøk på å estimere en forbruksprofil for både varmt tappevann og gråvann. I dette arbeidet ble det også forsøkt å skille mellom ukedag og helg.

Forutsetningene som har blitt gjort her er en kombinasjon av resultater fra litteraturstudiet, og forfatterens oppfatning av trender og drivere som kan tenkes å påvirke et «typisk norsk forbruk». Forbruksprofiler funnet i litteraturen har blitt undersøkt og sammenlignet med den standardiserte profilen for energibehov til varmt tappevann i SN/TS 3031:2016.

Det ble bare gjort to funn i litteraturen av målte produksjonsmønstre for gråvann. Disse stammet dessuten fra relativt få målinger. Det ble heller ikke gjort funn hvor gråvannsmengder og varmtvannsforbruk eller totalt vannforbruk var målt i samme studie, eller i samme bygg.

En viktig forutsetning for resultatene i dette kapittelet var derfor at det er en direkte korrelasjon mellom forbruk av varmtvann, og produksjonen av gråvann. Dette vil sannsynligvis kunne avvike noe fra virkeligheten siden ulike aktiviteter krever ulik andel varmtvann. I mangel på konkrete måledata fra Norge ble dette likevel ansett som en mulig tilnærming.

Kaldtvannsdominerte aktiviteter som toalettspyling ekskluderes, og de fleste prosesser som produserer gråvann innebærer bruk av en viss andel varmtvann.

Videre ble det tatt utgangspunkt i timesverdiene for varmt tappevann i SN/TS 3031:2016. Profilen domineres av to forbrukstopper. Den første oppstår mellom klokka sju og åtte på morgenen, mens den andre toppen oppstår mellom fem og sju på kvelden. Morgentoppen antas å komme av at mange personer dusjer til samme tid før jobb. Profilen i TS antas derfor å passe forbruket på ukedager bedre enn for fridager. Dette underbygges av resultatene fra to studier basert på måledata [50, 52].

Helg og ferie

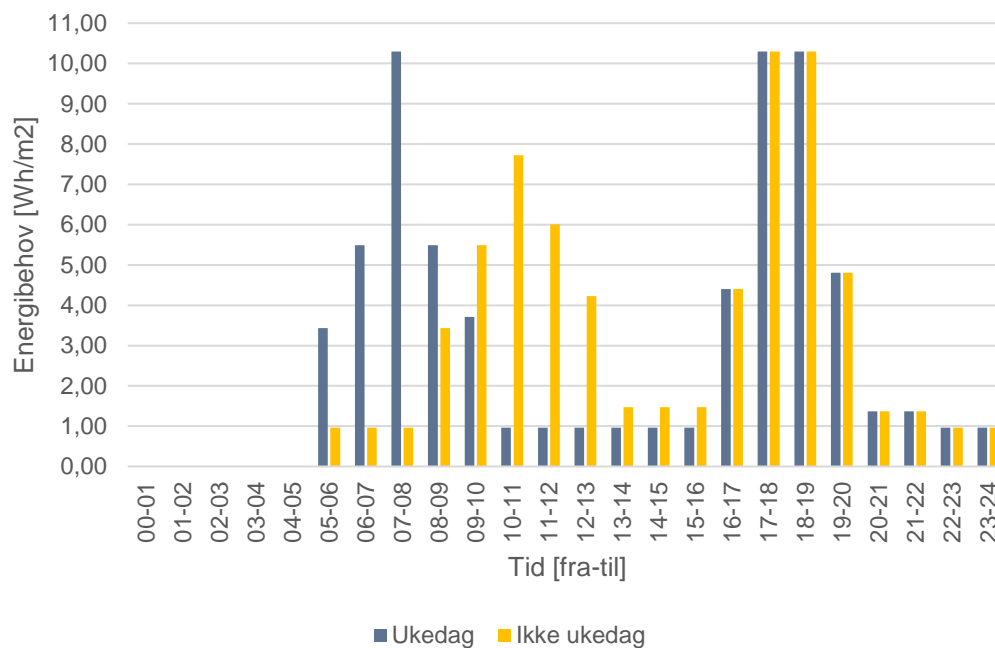
Overnevnte studier presenterte profiler som tydelig skiller mellom typiske forbruksmønstre for ukedag og helg. På helgedager oppstår morgentoppene noe senere, og er mindre dominerende enn på ukedager.

Profilene for helger ser også ut til å ha et noe jevnere fordelt forbruk midt på dagen. Forklaringen på dette kan være at folk har ulike og mer spredde rutiner på fridager. Morgenforbruket på hverdager er derimot styrt mer av når folk begynner på jobb. I de nevnte studiene var dessuten morgentoppen mellom 20 og 30 % lavere i helger enn for ukedager.

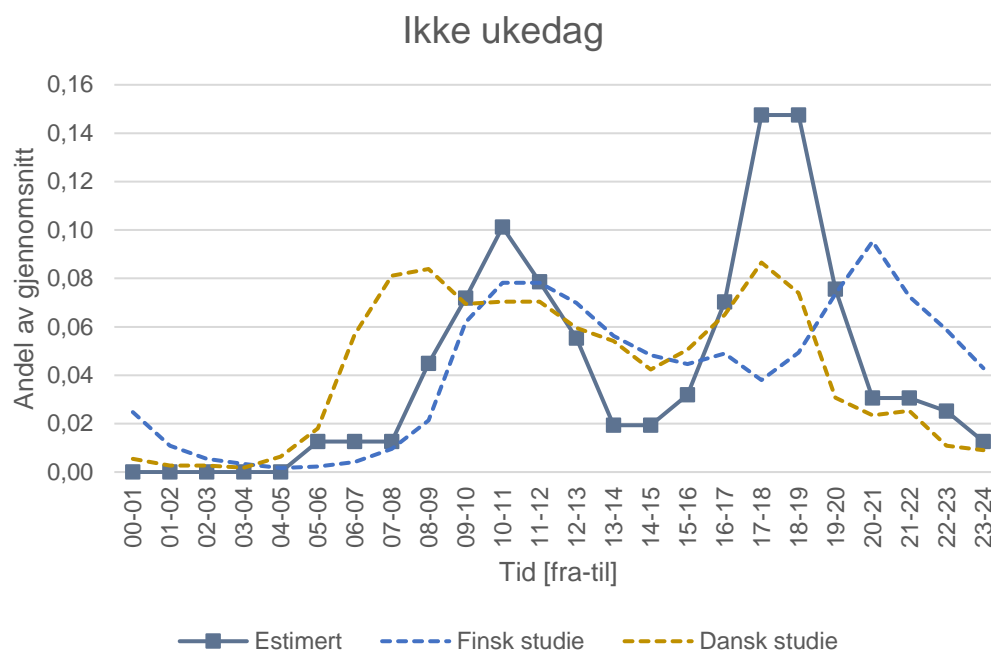
Avvikene mellom profilene er langt mindre etter klokka 16. På bakgrunn av disse observasjonene ble forutsetningene nedenfor brukt til å estimere profilene i Figur 21. Videre i arbeidet har dette blitt benyttet for å beskrive varmtvannsforbruk. Figur 22 og Figur 23 viser estimert forbruksprofil i tillegg til sammen med profiler fra studiene [50, 52].

- Totalt døgnforbruk av vann likt for ukedag og helg.

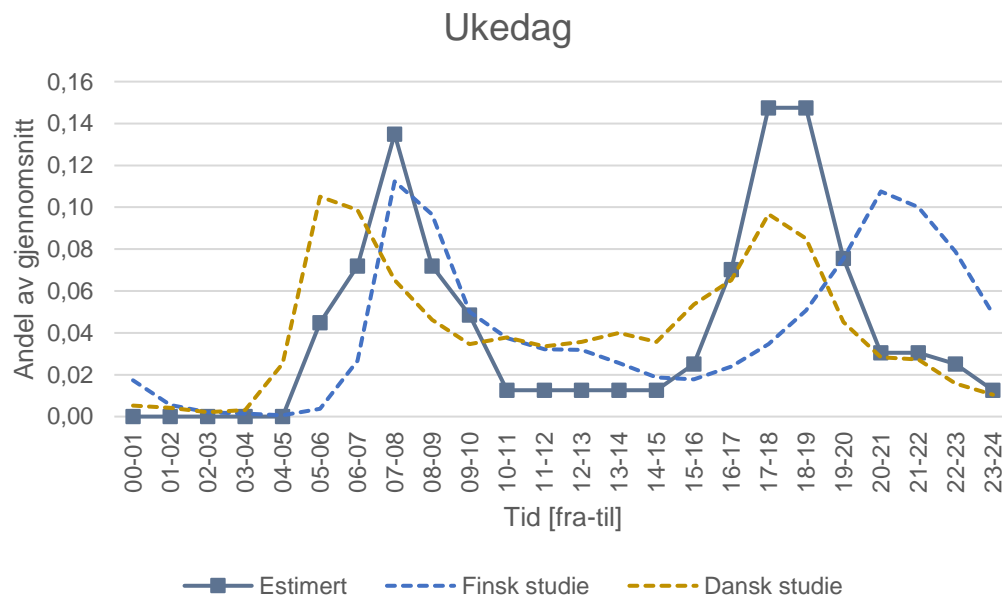
- Forbrukstopp på morgenen oppstår mellom 10:00 og 11:00. Lavt forbruk mellom 05:00 og 08:00.
- Forbrukstoppen på morgenen reduseres med 25 % og fordeles på timene frem til kl. 16:00.
- Ingen endring mellom kl. 16:00 og 24:00.



Figur 21: Energibehov time for time for varmt tappevann på ukedag og ikke ukedag.



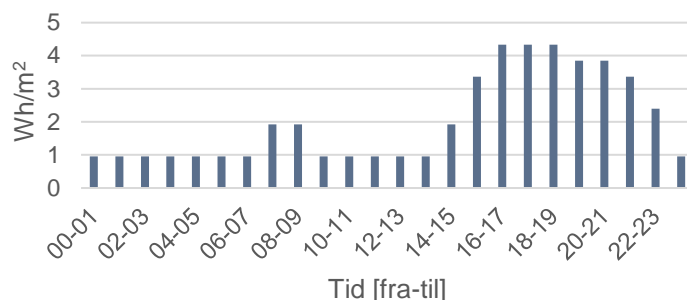
Figur 22: Forbruksprofiler: ikke ukedag. Estimert profil og to tappeprofiler fra litteraturen.



Figur 23: Forbruksprofiler: ukedag. Estimert profil og to tappeprofiler fra litteraturen.

Bidrag fra hvitevarer

Energibehov til hvitevarer inngår i energibehovet for teknisk utstyr i SN/TS 3031:2016. Figur 24 illustrerer forbruksmønsteret for teknisk utstyr gitt i TS. Sammenlignet med tappevann er her kun et dominerende forbruk på kveldstid. Den konstante lavere effekten på rundt 1 W/m^2 antas å representere døgkontinuerlige laster som kjøleskap og fryser.

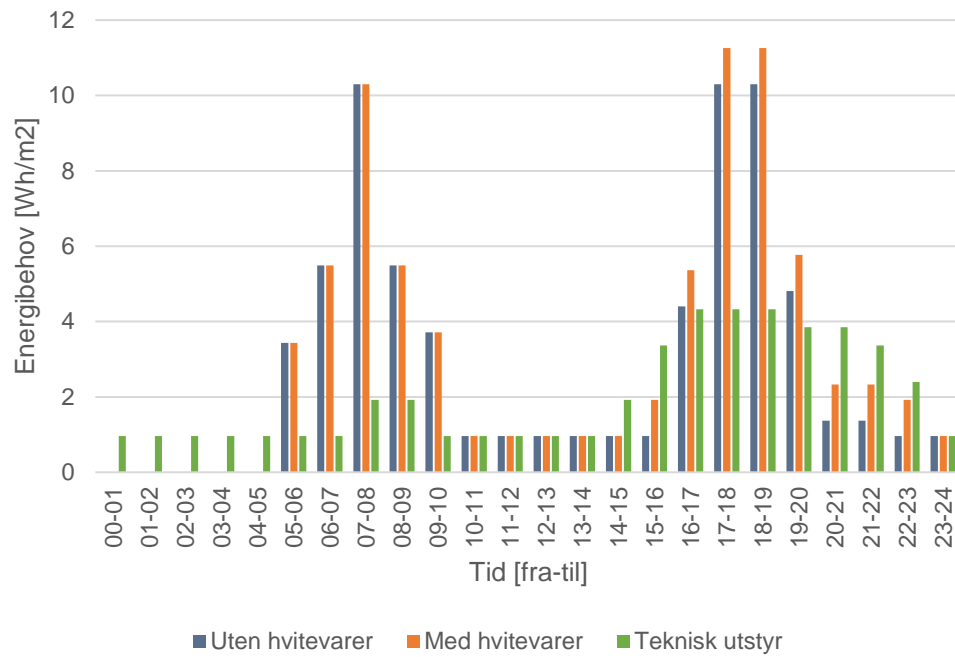


Figur 24: Energibehov til teknisk utstyr i SN/TS 3031:2016.

Tillegg G.2 i TS angir en metode for å inkludere termisk energibehov fra eventuelle varmtvannstilkoblede hvitevarer. I følge tillegget kan 8 % av energibehovet til teknisk utstyr konverteres til termisk energibehov. Det ble videre antatt at dette energibehovet representerte ren vannoppvarming. På den måten kunne varmtvannsmengden fra hvitevarer estimeres. Noen forutsetninger er listet opp nedenfor.

- En gjennomsnittlig leilighet har både vaskemaskin og oppvaskmaskin.
- Energibehovet til teknisk utstyr i boligblokker er $48,07 \text{ Wh/(m}^2 \cdot \text{døgn)}$. Av dette utgjør 8 % termisk energibehov for henholdsvis vaskemaskin og oppvaskmaskin.
- Energi til varmtvann inkludert termisk energibehov fra hvitevarer blir $76,35 \text{ Wh/(m}^2 \cdot \text{døgn)}$, eller omtrent $3,8 \text{ kWh}$ per person per døgn.

Estimatet stemmer med funn som ble gjort for varmtvannsrelatert energibehov i leiligheter i Oslo i 2009 [47]. Videre ble det antatt at det er på kveldstid mellom klokken 15 og 23 hoved-forbruket av vaskemaskin og oppvaskmaskin oppstår. Bidraget fra hvitevarer ble derfor lagt til energibehovet for varmtvann som en jevn last mellom klokka 15 og 23. Figur 25 illustrerer energibehov time for time for varmt tappevann med og uten bidrag fra hvitevarer.

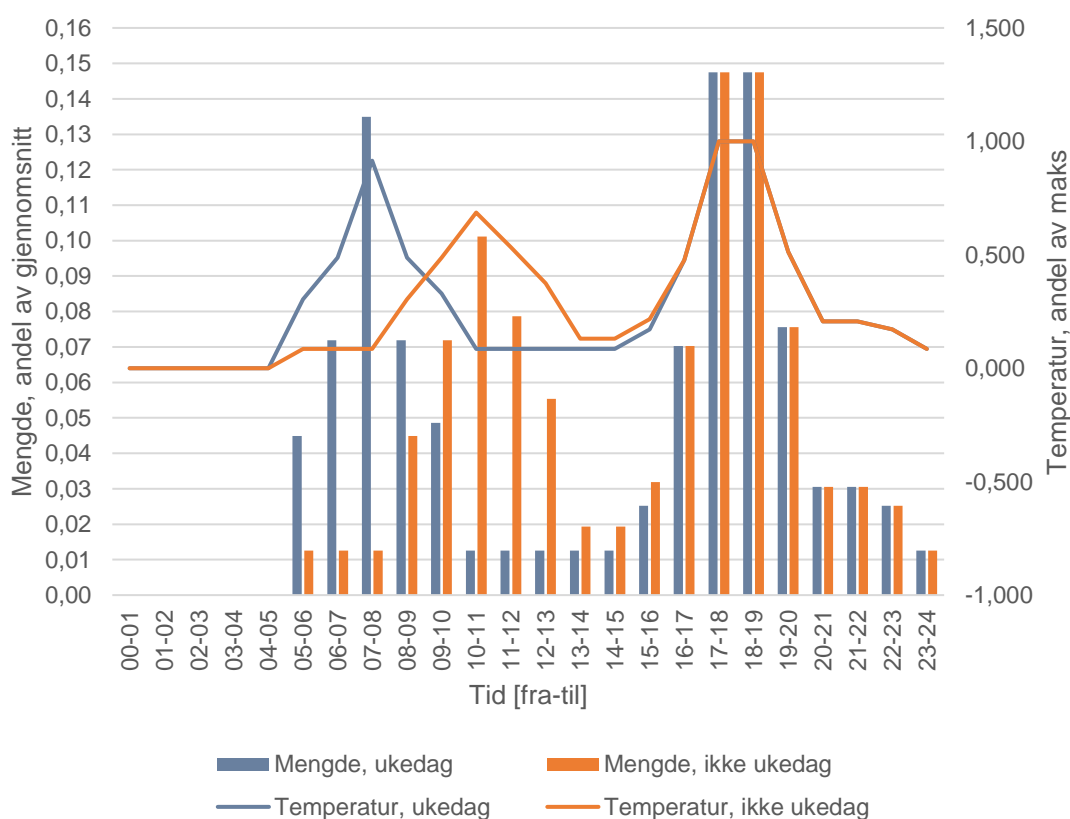


Figur 25: Energibehov time for time for varmt tappevann med og uten vannoppvarming av hvitevarer. I tillegg vises energibehovet til teknisk utstyr.

Gråvann

På bakgrunn av analysen ovenfor, har det blitt foreslått et produksjonsmønster og en temperaturprofil for gråvann. Profilen er illustrert i Figur 26. Kurvene må ikke forveksles med forbruksprofilen for varmtvann i Figur 21, da profilene for gråvann nedenfor også tar hensyn til bidrag fra hvitevarer. Gråvannsmengder per time kan beregnes ved å multiplisere et døgngjennomsnitt med andelen for den gitte timen. Temperaturen på gråvannet for hver time kan beregnes ut ifra en antatt øvre og nedre temperatur.

Dette anses som et mer riktig utgangspunkt ved evaluering av systemer for gråvannsgjenvinning, enn om kun et døgngjennomsnitt benyttes. Ved å benytte timesverdier kan effekten av ulike dynamiske faktorer synliggjøres bedre. I beregningene videre i rapporten ble profilen i Figur 26 benyttet for gråvann.



Figur 26: Foreslåtte produksjonsmønster og temperaturprofil for gråvann, ukedag og ikke ukedag.

5.2.5 Usikkerhet

Gråvannskarakteristikk

Mengden gråvann som produseres i løpet av et døgn er avhengig av den enkelte beboers livsstil og daglige rutiner. Det er derfor en større usikkerhet knyttet til å benytte gjennomsnittlige verdier. En boligblokk, med et høyt antall familier med tenåringer, vil sannsynligvis ha et døgngjennomsnitt som er langt høyere enn hvis beboerne består av voksne uten barn, eller pensjonister. Dette anses, sammen med kulturelle forskjeller, som noen av grunnene til den store variasjonen av gråvannsmengder funnet i litteraturen. I dette følgende avsnitt ble det derfor gjort en vurdering av forventede variasjoner i gråvannets karakteristikk.

I en rapport fra 2015 ble det gjort en vurdering av fremtidig vannforbruk [41]. Der ble det blant annet sett på effekten av vannbesparende teknologi og informative tiltak som kampanjer og bevisstgjøring. Etter «best guess» fra forfatter, kunne tiltakene redusere vannforbruket med ca. 13 %.

Hvis samme reduksjon antas som følge av beboere med høyere miljøfokus og vannbesparende installasjoner, havner totalt vannforbruk på ca. 126 l/pd. Med tidligere benyttede forutsetninger gir dette en gråvannsmengde på 87 l/pd og en varmtvannsandel på 40 % av det totale vannforbruket. Tidligere bransjetall for vannforbruk i husholdningen har ligget på rundt 160 liter per person per dag. Dette tilsvarer omtrent 10 % økning sammenlignet med det totale vannforbruket som har blitt estimert tidligere i kapittelet. I dette tilfellet ble det valgt å benytte samme prosentforhold som for lavt forbruk, på 13 %. Da havner totalt vannforbruk på 164 l/pd og gråvann på 113 l/pd. Varmtvann utgjør i dette tilfellet 31 % av totalt vannforbruk.

Gråvannstemperaturen er også usikker. Tappetemperaturen ved kilden, valg av rørmateriale samt grad av isolasjon, og lengden på rørstrekk vil alle påvirke varmetapet fra kilden og frem til eventuell oppsamlingstank. Hvor godt isolert tanken er vil i neste omgang påvirke temperaturen. Beregninger ble derfor gjennomført med en antatt høy og lav gråvannstemperatur, basert på lave og høye verdier funnet i litteraturen. Tabell 9 viser en oversikt over estimerte høye og lave verdier.

Tabell 9: Oppsummering av høyt og lavt vannforbruk (KV), og gråvann (GV) per person per dag. Oppsummering av høyt og lavt anslag for gråvannstemperatur.

	Parameter	Forutsetning		Resultat		
Lavt forbruk	VV energi	3,44	kWh/pd	VV	50,9	l/pd
	VV andel	40	%	KV	127,2	l/pd
	GV andel	69	%	GV	87,8	l/pd
Høyt forbruk	VV energi	3,44	kWh/pd	VV	50,9	l/pd
	VV andel	31	%	KV	164,1	l/pd
	GV andel	69	%	GV	113,3	l/pd
Lav gråvannstemperatur					18-25	°C
Høy gråvannstemperatur					25-31	°C

5.3 Beregningsstudie

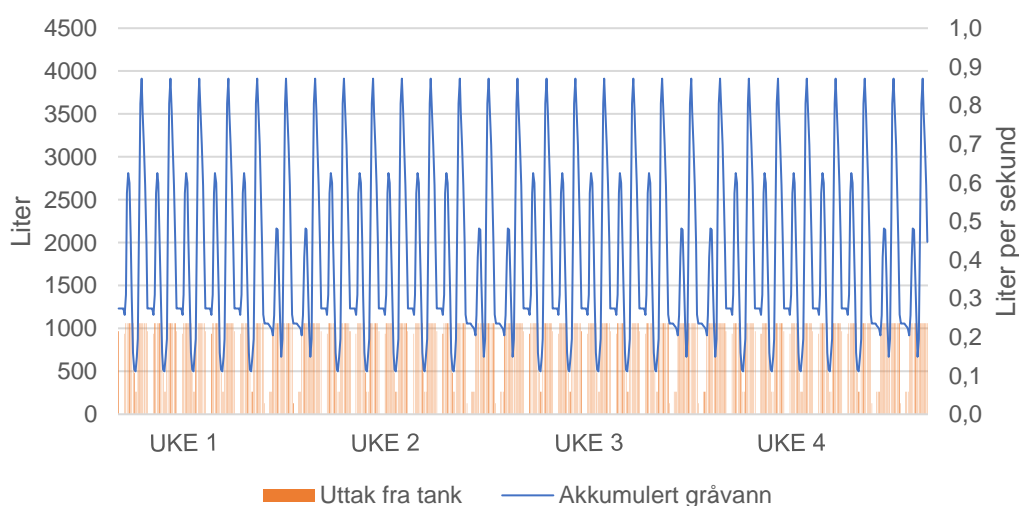
Beregningene ble utført for en fiktiv boligblokk, beskrevet i kapittel 4.2. Boligblokka har 150 beboere, og et daglig varmtvannsbehov på totalt 514,9 kWh, eller omtrent 3,4 kWh per person.

Varmesentralen var utstyrt med et totalt akkumuleringsvolum på 4,5 m³ for varmt tappevann. Detaljer fra berederdimensjonering og beregning av nødvendig ladeeffekt finnes i Vedlegg 4. Fjernvarme (29 kW) er tenkt installert som spisslastkilde og backup i alle beregningstilfellene. Volumet på oppsamlingstanken for gråvann var også 4,5 m³. En oversikt over inn-data finnes i Vedlegg 2.

På bakgrunn av innledende beregninger og funn i litteraturen ble det anslått et grunnsenario, som dannet selve utgangspunktet for inndata brukt i beregningene. Da flere av disse parameterne ble ansett som usikre, ble det også utført beregninger for ulike variasjoner av grunnsenarioet.

Simuleringer av gråvannstemperaturen i oppsamlingstanken ble utført i IDA ICE, og resultatene kan ses i Vedlegg 5. Ettersom varmetap fra tanken ble neglisjert, var temperaturen og mengden på innkommende gråvann den eneste påvirkningskilden. Resultatene viste at snittemperaturen over døgnet i tanken var på 25-26 grader både for ukedager og helgedager.

I Figur 27 illustreres uttak av, og akkumulert mengde gråvann i oppsamlingstanken over hele beregningsperioden på 28 døgn. Største akkumulerte gråvannsmengde var rundt 3900 liter.



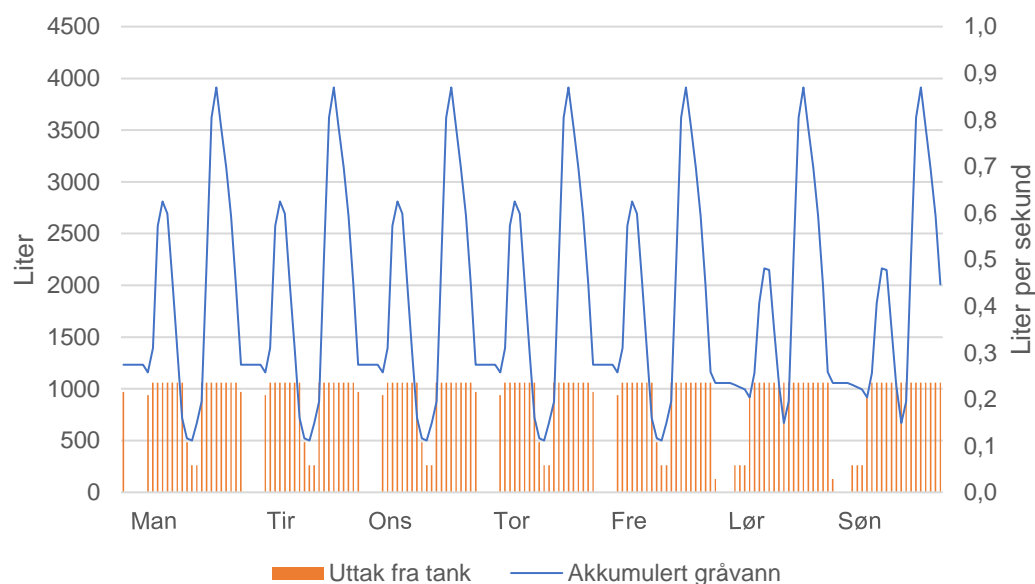
Figur 27: Akkumulert gråvann i oppsamlingstank (liter t.v.) og uttak av gråvann (liter per sekund t.h.) for hele beregningsperioden. Vist for forvarmingstemperatur på 45 °C.

I Figur 28 nedenfor illustreres akkumulering og uttak av gråvann i tanken i løpet av en typisk uke (tredje uke i beregningen). Av figuren kan det observeres at anlegget i hovedsak er i drift samtidig som det tappes varmtvann fra berederen. Tappingen medfører ladebehov, og varmepumpa reguleres etter dette så lenge det er gråvann i oppsamlingstanken.

Tilgjengeligheten på gråvann er god, og det kan observeres et overskudd på rundt 500 liter i døgnet. Dette resulterer i et fåtall stopp for varmepumpa, som ellers ville ha kunnet medført unødvendig kompressorslitasje og redusert gjennomsnittlig effektfaktor.

Som beskrevet i kapittel 4.2.2, ble forholdet mellom varmtvann og produsert gråvann, C , benyttet som den styrende faktoren for uttak av gråvann fra tanken i hvert tidssteg. En økning av denne faktoren på fem prosent resulterte i et daglig overskudd av gråvann på nesten 2000 liter, samt økt behov for energi til varmepumpas kompressor.

Det ble også forsøkt å redusere faktoren med fem prosent. Dette resulterte i to-tre stopp i løpet av dagen som følge av for lite gråvann i oppsamlingstanken. I tillegg økte behovet for supplement av spisslast. Forholdet mellom døgngjennomsnittlig varmtvannsforbruk og produsert gråvann, ble av den grunn ansett som et egnet utgangspunkt for faktoren C i de videre beregningene.

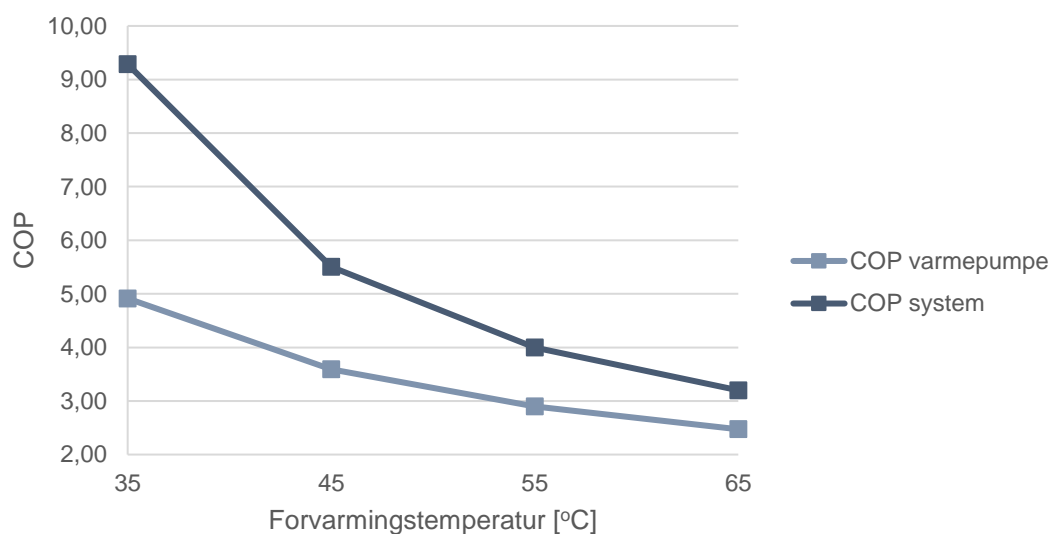


Figur 28: Akkumulert gråvann i oppsamlingstank (liter t.v.) og uttak av gråvann (liter per sekund t.v.) for den tredje uken av beregningene.

Varmevekslerens største registrerte effekt var 7,3 kW, med et gjennomsnitt på 5,8 kW i drift. Installert effekt på varmepumpa var avhengig av hvilken forvarmingstemperatur som ble valgt. Ved forvarming av tappevann til 35 grader var nødvendig installert effekt omtrent 8 kW.

For 45 grader var den 13 kW, mens en forvarming på 55 og 65 grader medførte en nødvendig installert effekt på henholdsvis 18 og 23 kW. Den laveste gråvannstemperaturen ut fra fordampere ble observert ved produksjon av 65 graders tappevann, og var 4,45 grader. Fordampningstemperaturen i det samme tidspunktet var -0,55 grader.

Figur 29 illustrerer årsvarmefaktorer for henholdsvis varmepumpa og for systemet ved ulike forvarmingstemperaturer. Høyest årsvarmefaktor for grunnsenariot var 4,91 for varmepumpa og 9,28 for systemet, ved en forvarmingstemperatur på 35 grader. Ved en forvarmingstemperatur på 65 grader er beregnet årsvarmefaktor 2,47 for varmepumpa alene, og 3,2 for systemet. Da dekker systemet hele varmtvannsbehovet.



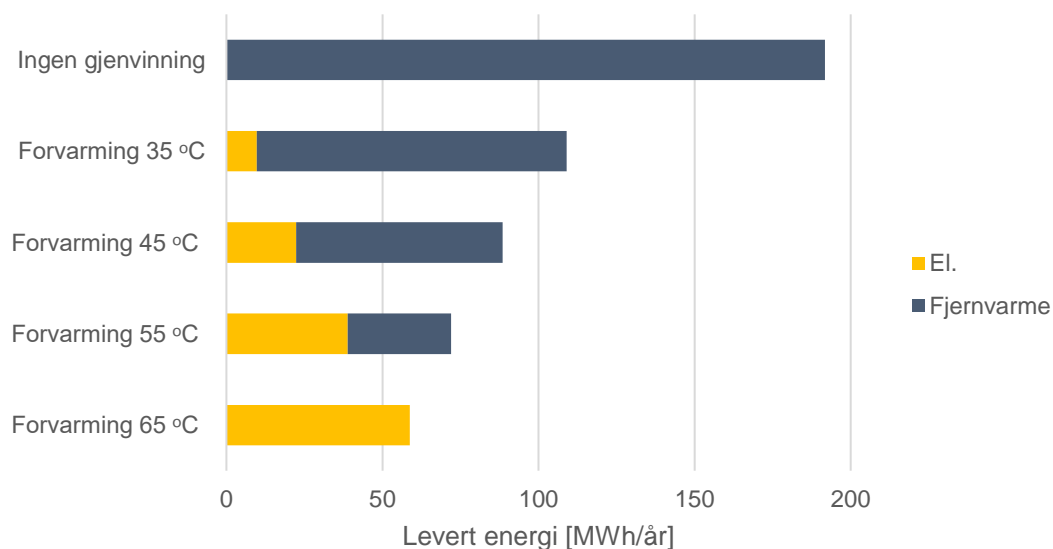
Figur 29: COP som funksjon av forvarmingstemperatur.

5.3.1 Energibesparelse

Figur 30 under illustrerer anleggets energibesparelse som en funksjon av forvarmingstemperaturen. Energibesparelsen har blitt justert for produktionsvirkningsgrader, og representerer levert energi.

Energibesparelsen varierer mellom 43-69 %, og er størst når anlegget står for hele tappevannsoppvarmingen. Da er årsvarmefaktoren 2,5 og systemvirkningsgraden 3,2. En økning av forvarmingstemperatur fra 35 til 45 grader øker den totale energibesparelsen med omtrent 10 %. Dette øker også behovet for levert elektrisitet til kompressoren med 130 prosent som en følge av økt temperaturløft. Årsvarmefaktoren reduseres da fra 4,9 til 3,6.

Med hensyn til nødvendig installert effekt på varmepumpa, er det forvarming av tappevann til 35 grader som kommer best ut. Da er nødvendig størrelse på varmepumpa 8 kW. Den gir en relativ energibesparelse som er nesten det dobbelte av en 23 kW varmepumpe med en forvarmingstemperatur på 65 grader.

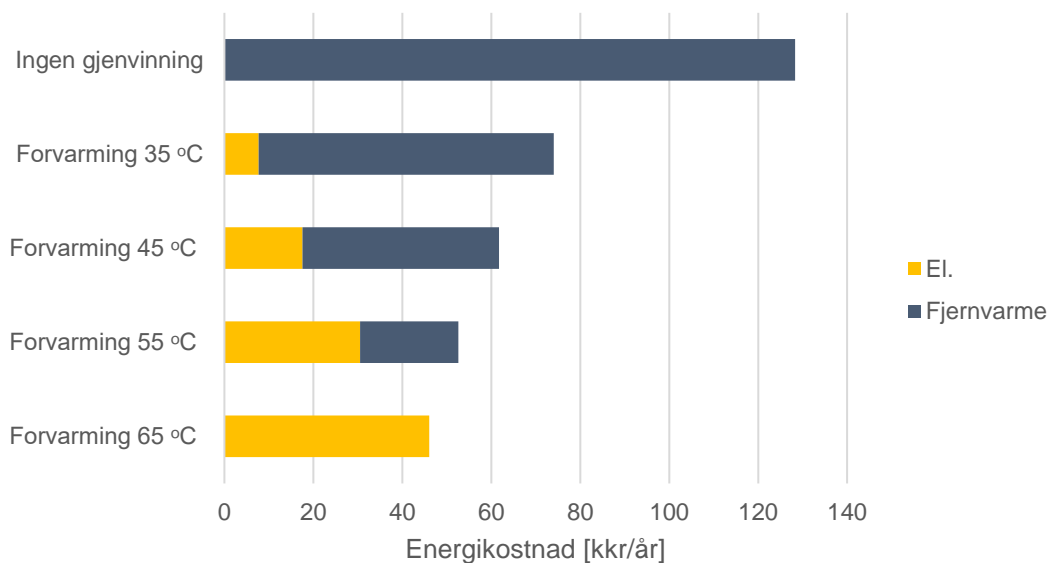


Figur 30: Levert energi som funksjon av ulike forvarmingstemperaturer.

5.3.2 Årlig kostnadsbesparelse

Figur 31 under illustrerer anleggets årlige energikostnad som funksjon av forvarmingstemperaturen. Det ble brukt en energipris på 78,4 øre/kWh for elektrisitet og 66,9 øre/kWh for fjernvarme. Figuren viser at årlig kostnadsbesparelse på 42-64 % oppnås, sammenlignet med tappevannsoppvarming med fjernvarme og ingen gjenvinning.

På samme måte som for energibesparelsen i forrige avsnitt, er det vannoppvarming til 65 grader som står for den største besparelsen. Ses besparelsen i forhold til nødvendig installert effekt på varmepumpa, er det også her en forvarmingstemperatur på 35 grader som gir den høyeste verdien. Da er årlig besparelse omtrent 1,9 ganger høyere enn for forvarming til 65 grader, og 1,3 ganger høyere enn ved forvarming til 45 grader. Beregnet årsvarmefaktor ved forvarming til 35 grader var 4,91 for varmepumpa, og 9,28 samlet for systemet.



Figur 31: Årlige energikostnader som funksjon av ulike forvarmingstemperaturer. Energifkostnad i tusen kroner.

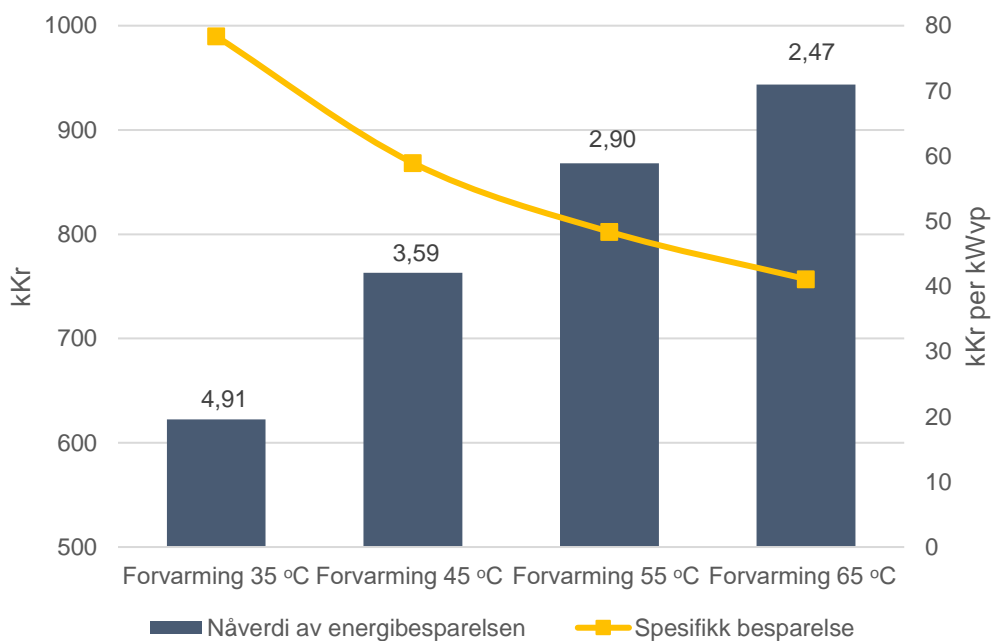
5.3.3 Nåverdi av energibesparelse

For å få et bilde av anleggets lønnsomhet ved ulike forutsetninger, ble nåverdien av energibesparelsen beregnet etter metodikken i kapittel 4.3.

Nåverdien av energibesparelsen kan da, sammen med nåverdien av drifts- og vedlikeholdskostnader, benyttes til å vurdere den tillatte

merinvesteringen for et slikt anlegg. Det er kun nåverdien av energibesparelsen som ble beregnet i dette arbeidet. Resultatene i dette avsnittet må derfor sammenlignes med eventuelle investeringskostnader, og drifts- og vedlikeholdskostnader. Nåverdien av besparelsen kan allikevel gi et inntrykk av systemets potensiale ved ulike konfigurasjoner.

Figur 32 viser nåverdien som funksjon av forvarmingstemperaturen. Av figuren fremkommer det at det er konfigurasjonen med oppvarming av tappevann til 65 grader som gir høyest nåverdi av besparelsen. Konfigurasjonen gir en besparelse på i overkant av 943 000 kroner, og årsvarmefaktoren er 2,47. Laveste besparelse oppnås med en forvarmingstemperatur på 35 grader. Da er nåverdien ca. 622 000 kroner til tross for en årsvarmefaktor i underkant av 5. En lav pris på elektrisitet, sammen med liten forskjell mellom prisen på fjernvarme og elektrisitet, gjør besparelsen stor for høye forvarmingstemperaturer.



Figur 32: Nåverdi av energibesparelsen (søyler, verdi t.v.) og spesifikk nåverdi av besparelse pr. kW nødvendig effekt for varmepumpen (linje, verdi t.h.) som funksjon av forvarmingstemperaturen. Varmepumpas COP er markert over søyler.

Det må derimot bemerkes at vannoppvarming til 65 grader også krever størst installert effekt på varmepumpa. Varmepumper har høy investeringskostnad per kW installert effekt, og det er derfor nyttig å synliggjøre den spesifikke besparelsen. Denne har blitt illustrert som gul linje i

figuren, og representerer hvor stor nåverdi av besparelsen som oppnås for hver kW installert effekt på varmepumpa.

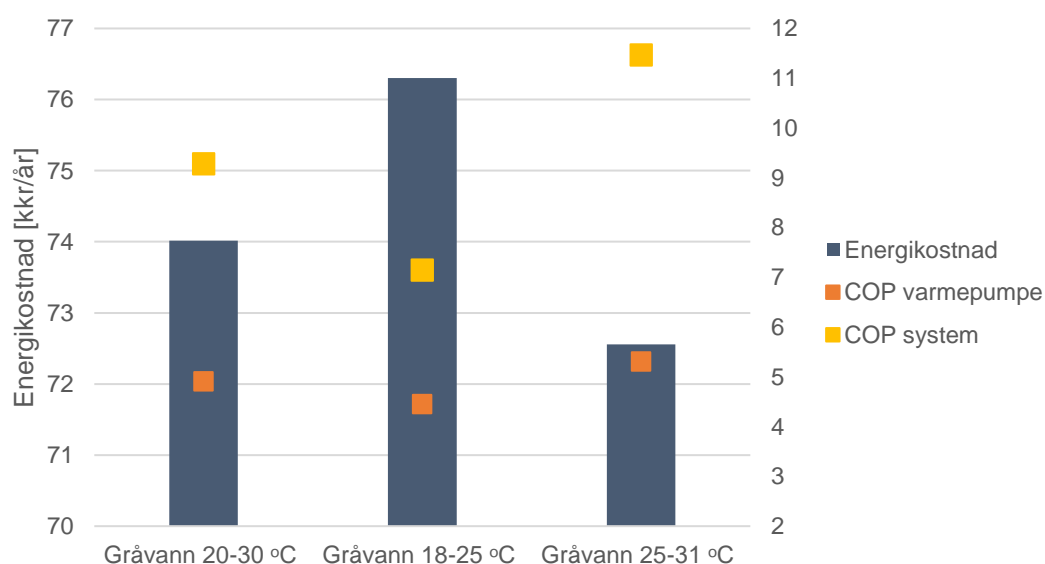
Dette gir et annet bilde, og konfigurasjonen med forvarming til 35 grader kommer best ut. Den spesifikke besparelsen er 78 000 kr/kW med en forvarmingstemperatur på 35 grader, mot 41 000 kr/kW for 65 grader.

5.3.4 Sensitivitet og usikkerhet

Gråvannstemperatur

Temperaturen på gråvannet ble ansett som usikker. Dette skyldes faktorer som varighet og temperatur ved tappested, i tillegg til varmetap i rør og eventuell oppsamlingstank. Variasjoner har blitt observert i ulike studier, men dataenes bakgrunn har i flere tilfeller fremstått som uklare.

I grunnsenarioet, som danner selve utgangspunktet for beregningene, ble temperaturen på gråvannet anslått til 20-30 grader. Middeltemperatur var da omtrent 26 grader. Høy og lav temperatur på gråvannet ble anslått henholdsvis 25-31 og 18-25 grader. Dette resulterte i en mengdevektet middeltemperatur for høyt og lavt senario på henholdsvis 28,6 og 22,0 grader. Figur 33 viser variasjonen i årlige energikostnader som en følge av ulike gråvannstemperaturer ved en forvarmingstemperatur på 35 grader.



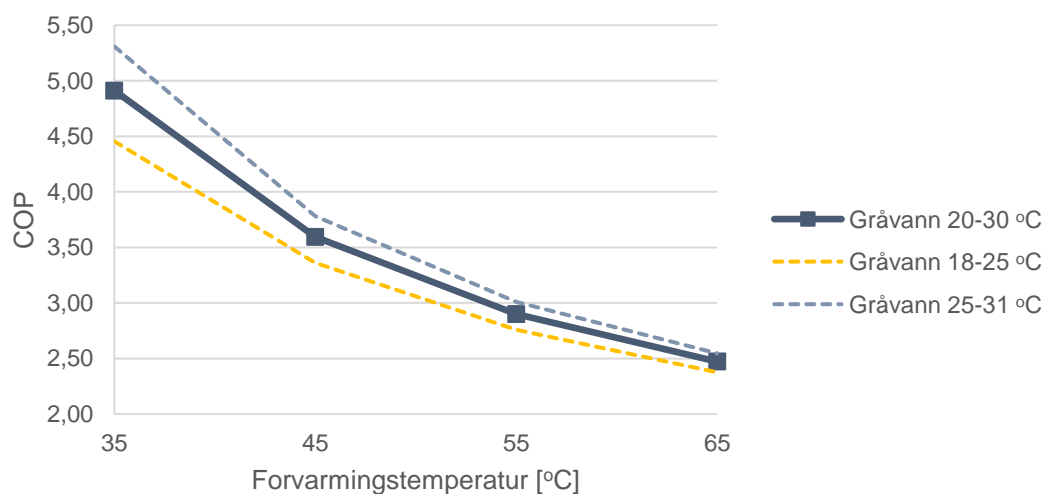
Figur 33: Årlige energikostnader (t.v.), samt COP for hhv. varmepumpe og system (t.h.) ved ulike temperaturer på gråvannet. Illustrert for en konfigurasjon med forvarmingstemperatur på 35 °C.

Senarioet med lav temperatur på gråvannet reduserte varmeveksleren sitt årlige bidrag med nesten 9 MWh, eller cirka 20 %. En konsekvens av dette var omtrent 23 % lavere samlet effektfaktor for systemet. Hovedgrunnen

er mindre gjenvunnet varme i varmeveksleren som en følge av lavere temperaturforskjell mellom kaldt tappevann og gråvann. Varmepumpas kompressor bidrar dermed mer som en følge av et høyere temperaturløft. Dette reduserer den passive delen av systemet, mens den aktive økes.

Det ble observert en økning i nødvendig varmepumpe-effekt på 5-15 % avhengig av hvilken forvarmingstemperatur som ble benyttet. Størst var økningen ved en forvarmingstemperatur på 35 grader. Dette medførte også at den årlige kostnadsbesparelsen reduseres med 2-4 %. En gråvannstemperatur mellom 18-25 grader ga en COP på 4,45 ved en forvarmingstemperatur på 35, og en COP på 2,38 ved en forvarmingstemperatur på 65 grader. Varmepumpas COP som funksjon av forvarmingstemperaturen illustreres i Figur 34 nedenfor.

Variasjoner i temperaturen på gråvannet påvirker i stor grad det passive bidraget fra varmeveksleren. Konfigurasjoner med høyere forvarmingstemperatur og dermed lavere COP, er mindre følsomt for temperaturvariasjoner.



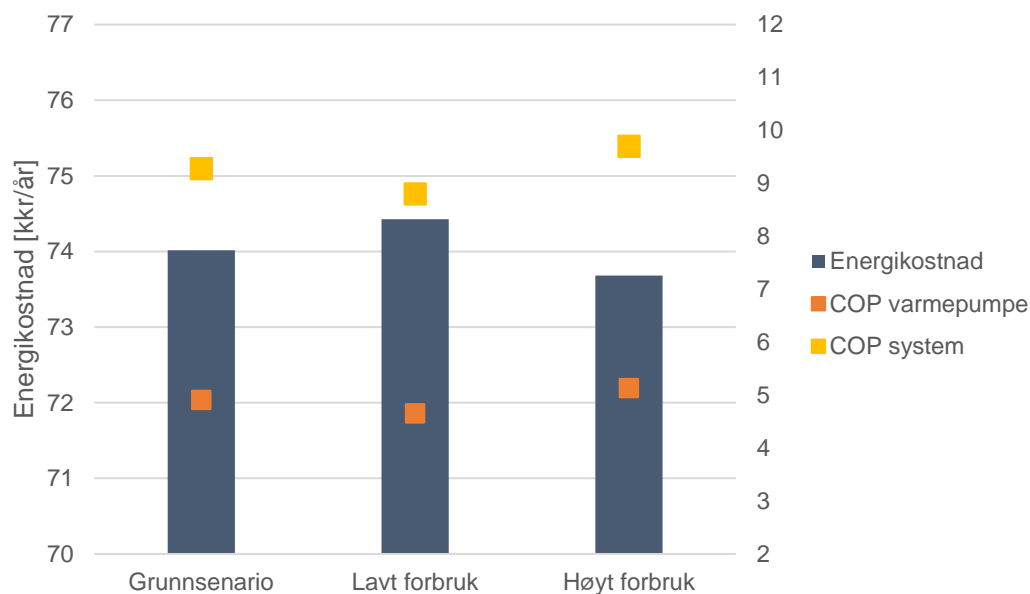
Figur 34: Varmepumpas COP som funksjon av forvarmingstemperaturen.

Gråvannsmengde

Gråvannsmengden benyttet i beregningene anses også som usikker. Siden anlegget benytter gråvann som varmekilde, ble systemets årlige kostnadsbesparelse undersøkt ved en antatt høy og lav daglig gråvannsmengde. Bemerk at det kun er mengden gråvann som ble endret i dette tilfellet.

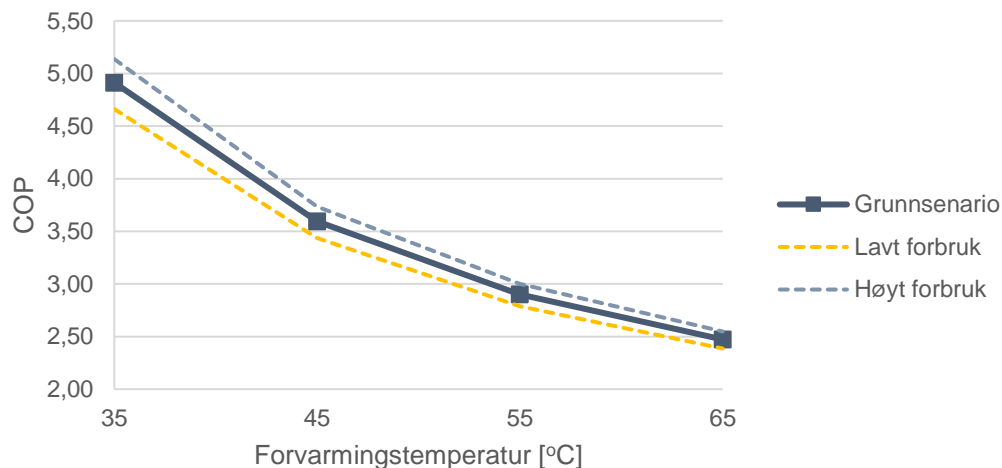
Energibehovet for varmt tappevann, og således varmtvannsforbruket, ble forutsatt å være uforandret.

Figur 35 viser årlige energikostnader som følge av ulik gråvannsmengde for en forvarmingstemperatur på 35 grader. Redusert mengde medfører noe økte årlige energikostnader, og reduseres ved høyere mengde. Dette kommer av sammenhengen gitt i formel (13); en lavere døgngjennomsnittlig gråvannsmengde medfører at det også tappes en mindre mengde fra oppsamlingstanken ved varmebehov.



Figur 35: Årlige energikostnader (t.v.), samt COP for hhv. varmepumpe og system (t.h.) som funksjon av ulike gråvannsmengder. Illustrert for en konfigurasjon med forvarmingstemperatur på 35 oC.

Variasjon av gråvannsmengdene hadde ingen effekt på gjenvunnet energi i varmeveksleren ettersom denne i beregningene kun var avhengig av temperaturen på gråvannet og innkommende kaldtvann. I scenarioet med høy mengde ga dette derfor en høyere gråvannstemperatur etter varmeveksleren, og et lavere temperaturløft for varmepumpa. Det motsatte skjedde i tilfellet med lav gråvannsmengde. Den laveste gråvannstemperaturen ut fra fordamperen ble registrert for tilfellet med lav mengde, og var 2 grader. Dette ga en variasjon i COP for varmepumpa, fra 4,66 for lav mengde, til 5,14 for tilfellet med høy mengde. Figur 36 illustrerer varmepumpas COP som funksjon av forvarmingstemperaturen.

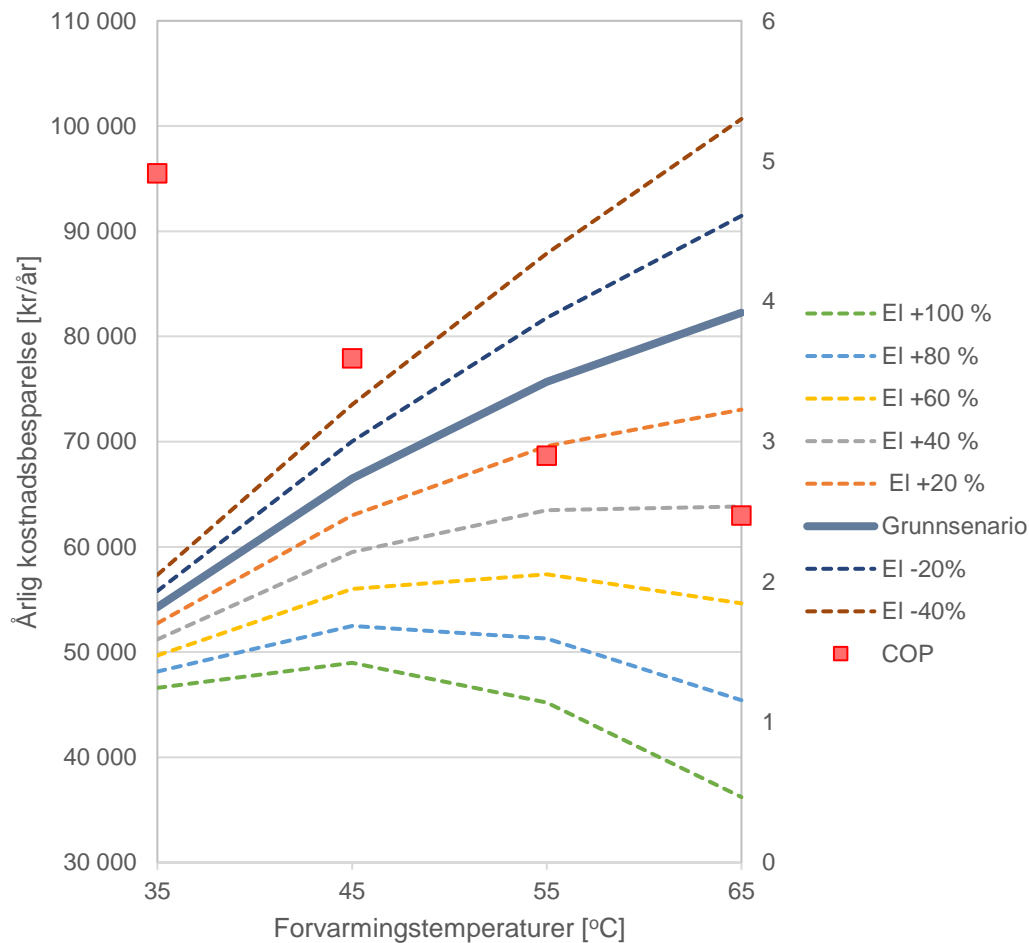


Figur 36: Varmepumpas COP som funksjon av forvarmingstemperaturen.

Energipriser

Bakgrunnen for beregningsstudien var en kombinert passiv og aktiv løsning, altså bruk av varmepumpe. Siden varmepumpas kompressor drives av elektrisitet, og spisslastkilden dekkes av fjernvarme, påvirkes resultatene av prisen på energi. Varmepumper med lav COP er spesielt følsomme for høyere energipriser da de forbruker mer strøm i forhold til levert varmeenergi. I denne analysen ble kostnadsbesparelsen for grunnsenarioet undersøkt ved å variere prisen på elektrisitet.

I Figur 37 illustreres kostnadsbesparelsen som funksjon av forvarmingstemperaturen. I dette tilfellet ble resultatenes sensitivitet undersøkt når prisen på elektrisitet var satt til mellom 47 og 156 øre/kWh, og fjernvarmeprisen holdes konstant. COP for de respektive konfigurasjonene er markert i rødt. Figuren viser at konfigurasjonen med lav forvarmingstemperatur og høy COP var langt mindre følsom for påvirkninger fra strømprisen enn høy forvarmingstemperatur. Dette kan ses som en korrelasjon mellom økt COP og redusert påvirkning av strømprisen på den årlige besparelsen. En økning i strømprisen på mellom 40 og 60 % (110-125 øre/kWh), resulterer i at den største kostnadsbesparelsen forskyves mot lavere forvarmingstemperaturer enn 65 grader. Ved en prisøkning på 60 % gjøres den største årlige besparelsen i området rundt 55 grader.



Figur 37: Årlig kostnadsbesparelse (t.v.) som funksjon av forvarmingstemperatur ved ulike elektrisitetspriser. Årsvarmefaktoren (t.h.).

Basert på tidligere års utvikling av energipriser virker det sannsynlig at fremtidig fjernvarmepris i stor grad følger fortsetter å følge prisen på elektrisitet. Så lenge forholdet mellom disse ikke gjennomgår betydelige forandringer i årene fremover vil det være ønskelig for varmepumpa å dekke så mye av varmtvannsbehovet som mulig med hensyn til årlig kostnadsbesparelse.

Flere ferske markedsundersøkelser spår en usikker markedsutvikling for prisen på elektrisitet. Det anses allikevel som mest sannsynlig at en økning av prisen på elektrisitet også medfører en økning av fjernvarmeprisen. Ønskes en langsiktig sikkerhet mot forandringer i energimarkedet er det derimot mer gunstig med en konfigurasjon med lavere forvarmingstemperatur og høyere COP.

Sammendrag sensitivitetsanalyse

Resultatene fra sensitivitetsanalysen viser at variabel gråvannskaraktistikk hadde vanskeligere for å påvirke varmepumpas COP når forvarmingstemperaturen var høy. Samtidig har konfigurasjon med høy forvarmingstemperatur og lav COP vist seg å være mer følsom for forandringer av energipriser. Resultatene viste også at en endring av gråvannets temperatur på noen få grader kan påvirke COP og energibesparelsen med flere prosent.

6 KONKLUSJON

Målet med dette arbeidet var å undersøke potensialet ved lokal varmegjenvinning av gråvann i norske boligblokker. Dette skulle i hovedsak vurderes ved hjelp av en litteraturstudie, i tillegg til resultater fra beregninger og en enkel vurdering av lønnsomhet.

Hensikten med litteraturstudien var å kartlegge faktorer som i liten grad påvirkes av valgt gjenvinningsløsning. Dette omfattet blant annet forbruk av varmt og kaldt vann, gråvannets karakteristikk, og variasjoner i løpet av døgnet. Norsk litteratur viste seg tidlig å være svært mangelfull når det kom til studier om gråvann. Resultater fra flere skandinaviske og europeiske studier ble derfor brukt til å anslå representative verdier.

Spesifikt døgnforbruk av vann ble anslått til rundt 145 liter per person. Forbruk av varmt tappevann per døgn ble estimert til omtrent 51 liter per person, og utgjorde 35 % av totalt vannforbruk. En følge av disse resultatene var at en gjennomsnittlig gråvannsmengde ble anslått til omtrent 100 liter per person, eller nesten 70 % av det totale vannforbruket. Gråvannets temperatur ble anslått til mellom 20 og 30 grader.

Faktorer som i stor grad påvirkes av valgt gjenvinningsløsning, var blant annet gjenvunnet energi, energibesparelse, og systemvirkningsgrader. Dette ble undersøkt for en fiktiv boligblokk med 150 beboere gjennom en beregningsstudie. Valgt løsning var et system med kombinert passiv og aktiv gjenvinning. Resultatene viste at varmegjenvinning på bygningsnivå kunne gi en energibesparelse på opp mot 70 %, og redusere de årlige energikostnadene med rundt 64 % sammenlignet med fjernvarme. Den daglige produksjonen av gråvann var tilstrekkelig for å dekke hele tappevannsbehovet.

Resultatene viste også at varmepumpa kunne oppnå en årsvarmefaktor mellom 2,5 og 4,9 med forvarmingstemperaturer mellom 65 og 35 grader. Systemets effektfaktor inkludert bidrag fra varmeveksleren varierte mellom 3,2 og 9,3. Lønnsomhetsanalysen viste at nåverdien til besparelsen var størst når anlegget stod for hele tappevannsoppvarmingen, altså oppvarming av tappevann til 65 grader. Dette ga en nåverdi av besparelsen på rundt 943 000 kroner, mens besparelsen var 622 000 kroner, og lavest, for en forvarmingstemperatur på 35 grader. Sistnevnte ga derimot omtrent

dobbelt så stor besparelse i forhold til nødvendig installert effekt på varmepumpa.

Variabel gråvannskarakteristikk hadde vanskeligere for å påvirke varmepumpas COP når forvarmingstemperaturen var høy. Samtidig viste konfigurasjon med høy forvarmingstemperatur og lav COP seg å være mer følsom for forandringer av energipriser. Resultatene viste også at en endring av gråvannets temperatur på noen få grader kan påvirke COP og energibesparelsen med flere prosent.

Beregningene i dette arbeidet ble basert på en rekke forutsetninger og forenklinger. De forventes derfor ikke å gi et helhetlig bilde av ytelsen et slikt anlegg kan ha. Resultatene belyser heller ikke potensielt store utfordringer som reduserte virkningsgrader på grunn av beleggdannelse, varmetap, eller energisentralens plassbehov. Resultatene viser derimot at gråvannsproduksjonen i større boligblokker kan være omfattende nok til å dekke store deler av bygningens oppvarmingsbehov for varmt tappevann.

Det er åpenbart at det finnes betydelige mengder energi i gråvannet, som i de aller fleste tilfeller i dag slipper ut av bygninger som et rent tap.

Det er også åpenbart at varmegjenvinning av gråvann innebærer flere utfordringer.

I første omgang må bygningen utstyres med separate avløpsrør for gråvann og svartvann. Dette gjør gråvannsgjenvinning mindre aktuelt i eksisterende bygninger med felles avløpssystem. Gråvannet er sjeldent en stabil varmekilde siden den er direkte knyttet til beboernes vannforbruk. Anlegget vil derfor ha behov for en supplerende varmekilde for å oppnå god forsyningssikkerhet. Dette medfører økte investeringskostnader.

Oppsamlings- og akkumulatortanker opptar dessuten areal som ellers kunne blitt benyttet til noe annet.

Forurensninger i gråvannet stiller særlige krav til valg av egnet vannfiltrering og valg av komponenter. I tillegg er det stor risiko for at dannelse av belegg og biofilm kan medføre redusert varmeoverføring i varmevekslere. Tilrettelegging for effektivt renhold og vedlikehold er derfor essensielt for optimal drift, og kan anses som en ekstra utgiftspost for slike systemer. Samtlige overnevnte faktorer må adresseres og vurderes opp mot en forventet besparelse hvis lønnsomheten av et slikt system skal kunne vurderes.

7 VIDERE ARBEID

I forbindelse med dette arbeidet ble flere angrepsvinkler for beregningsstudien undersøkt. En av disse var dynamiske simuleringer av energisentralen i IDA ICE. Modellering av tekniske systemer i IDA ICE gir rom for stor fleksibilitet, men kan samtidig kreve høy brukerkompetanse.

En velfungerende modell gir derimot gode muligheter for detaljerte vurderinger av anleggets ytelse ved ulike forutsetninger og reguleringsstrategier. Sammen med optimaliserings-verktøy som MOBO, kan modellen dessuten benyttes til å optimalisere enkeltkomponenter eller systemet som helhet. Programnets komplekse natur gir fort et stort antall variabler, og en analyse på komponentnivå kan være mest hensiktsmessig. Forslag til aktuell tematikk for videre arbeid med IDA ICE og MOBO kan være:

- Optimalisering av varmeveksler for gråvannsgjenvinning: optimalt varmeoverførende areal, materialvalg (U-verdi), renholds- og vedlikeholdsstrategier (variabel U-verdi som følge av $R_{fouling}$). Variablene kan optimaliseres med hensyn til anleggets samlede energiytelse og lønnsomhet.

8 KILDER

- [1] D. Zijdemans, *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*, 1. utg. Skarland Press AS, 2014.
- [2] T. A. Larsen, "Co2-neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective," *Water Research*, vol. 87, s. 513-521, 2015/12/15/ 2015.
- [3] J. Sievers, J. Londong, A. Stübler og D. Bestenlehner, *Heat recovery potential of domestic grey water in the pilot project jenfelder au in hamburg*. 2014.
- [4] E. Fuentes, L. Arce og J. Salom, "A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, s. 1530-1547, 2018/01/01/ 2018.
- [5] Eurostat. 2018. *Energy consumption in households*. Hentet fra: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households. Lastet ned: 07.04.
- [6] J. Frijns, J. Hofman og M. Nederlof, "The potential of (waste)water as energy carrier," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, s. 357-363, 2013/01/01/ 2013.
- [7] A. Bertrand, R. Aggoune og F. Maréchal, "In-building waste water heat recovery: Urban-scale methods for the characterisation of water streams and the assessment of energy savings and costs," [Journal Articles] vol. 192, s. 16, 2017 2017.
- [8] *Om varmtvann2030*. Hentet fra: <https://www.sintef.no/projectweb/varmtvann/>. Lastet ned: 17.01.2018.
- [9] F. Meggers og H. Leibundgut, "The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump," *Energy and Buildings*, vol. 43, nr. 4, s. 879-886, 2011/04/01/ 2011.
- [10] J. de Santiago, O. Rodriguez-Villalón og B. Sicre, "The generation of domestic hot water load profiles in swiss residential buildings through statistical predictions," *Energy and Buildings*, vol. 141, s. 341-348, 2017/04/15/ 2017.
- [11] K. Ahmed, P. Pylsy og J. Kurnitski, "Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in finnish apartment buildings," *Energy and Buildings*, vol. 97, s. 77-85, 2015/06/15/ 2015.

- [12] D. George, N. S. Pearre og L. G. Swan, "High resolution measured domestic hot water consumption of canadian homes," *Energy and Buildings*, vol. 109, s. 304-315, 2015/12/15/ 2015.
- [13] T. H. Dokka, A. Svensson, T. Wigenstad, I. Andresen, I. Simonsen og T. F. Berg, "Energibruk i bygninger. Nasjonal database og sammenligning av beregnet og målt energibruk," 2011.
- [14] B. Bøhm, F. Schrøder og N. C. Bergsøe, "Varmt brugsvand. Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger " i "SBI 2009:10 " 2009 vol. 1.
- [15] *Ns 3031:2014*. Hentet fra:
<http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=702386>. Lastet ned: 17.04.2018.
- [16] M. Thyholt og T. H. Dokka, "Nye forskriftskrav til bygningers energibehov," Sintef Bygg og miljø11 12 2003,
https://www.energimerking.no/download?objectPath=/upload_images%2F653EF43617AF4B62B7B924C51E919689.pdf.
- [17] A. J. Petersen, "Sv: Bakgrunn for timesverdier i sn/ts 3031," O. Øvrevik, red., utg. Email, 19.03.2018.
- [18] *Sn/ts 3031:2016 bygningers energiytelse : Beregning av energibehov og energiforsyning*, 2016.
- [19] A. J. Petersen og S. Gedsø, "Notat: Tappevannsbehov," 2015.
- [20] *Ns-en 12831-3:2017 bygningers energiytelse - metode for beregning av dimensjonerende effektbehov til varme - del 3: Effektbehov til varmtvann og beskrivelse av behov, modul m8-2, m8-3*, ICS 91.140.10; 91.140.65, 2017.
- [21] J. C. Sievers og J. Londong, "Estimation of design values for greywater treatment units," *RAMIRAN 2015 – 16th International Conference Rural-Urban Symbiosis*, s. 658-661, 2015.
- [22] D.-E. Archer, "Utvärdering av system för bdt-vattenrening med avseende på resurseffektiva städer och hållbar urban livsstil inom evaa-projektet och h+ området, helsingborg. ," Emulsionen Ekonomisk Förening 2012,
https://hplus.helsingborg.se/wp-content/uploads/sites/74/2016/11/delutredning_06_h-eva-bdt-vatten-emulsionen-20121.pdf.
- [23] A. R. Mazhar, S. Liu og A. Shukla, "A key review of non-industrial greywater heat harnessing," *Energies*, vol. 11, nr. 2, s. 386, 2018.

- [24] A. Andreadakis, C. Noutsopoulos, I. Mantziaras og N. Kouris, *Grey water characterization and treatment*. 2015.
- [25] E. Eriksson, K. Auffarth, M. Henze og A. Ledin, "Characteristics of grey wastewater," *Urban Water*, vol. 4, nr. 1, s. 85-104, 2002/03/01/ 2002.
- [26] *Abva - allmänna bestämmelser för vatten- och avloppsanläggningen i stockholm och huddinge*, Stockholm Vatten och Avfall, 2018.
- [27] "Telefonkontakt med vann- og avløpsetaten (vav) i oslo," utg., 2018.
- [28] *Abonnementsbetingelser ved tilknytning til kommunens vann- og avløpsledninger. Lover og informasjon. "Sanitærreglementet for oslo"* Vann- og avløpsetaten Oslo.
- [29] O. Culha, H. Gunerhan, E. Biyik, O. Ekren og A. Hepbasli, "Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review," *Energy and Buildings*, vol. 104, s. 215-232, 2015/10/01/ 2015.
- [30] S. Chao, J. Yiqiang, Y. Yang, D. Shiming og W. Xinlei, "A field study of a wastewater source heat pump for domestic hot water heating," *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 34, nr. 4, s. 433-448, 2013.
- [31] J. Stene og T. Hjerkin, "Høyeffektiv co2-varmepumpe for varmtvannsberedning," vol. 25, nr. 1
http://www.kulde.biz/kulde/2009/KULDE_1-09_net.pdf. Hentet fra:
http://www.kulde.biz/kulde/2009/KULDE_1-09_net.pdf
- [32] 05.02.2018. Produktdatablad. *Menerga aquacond 44* Hentet fra:
http://www.menerga.com/imagevault/publishedmedia/smt952vch5v3sz7pa5bi/Aquacond_44_2016_en.pdf.
- [33] N. C. Baek, U. C. Shin og J. H. Yoon, "A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source," *Solar Energy*, vol. 78, nr. 3, s. 427-440, 2005/03/01/ 2005.
- [34] J. Hille, M. Simonsen og C. Aall, "Trender og drivere for energibruk i norske husholdninger. Rapport til nve " Vestlandsforskning 2011, ISBN: 978-82-428-0313-9
https://www.vestforsk.no/sites/default/files/migrate_files/vf-rapport-13-2011-nve-energibruk-i-norske-husholdninger.pdf.
- [35] M. Husebø og I. Husby, "Drikkevannskvalitet i oslo 2017," Vann- og avløpsetaten 22.02 2018,
<https://www.oslo.kommune.no/getfile.php/13201634/Innhold/Vann%20og%20avl%C3%B8p/Drikkevannskvalitet/Drikkevannskvalitet%20Oslo%202017%20rapport.pdf>.

- [36] T. Ericson *et al.*, "Varmepumper i energisystemet. ", Norges vassdrags- og energidirektorat 2016, vol. Rapport nr 60-2016. ,
http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_60.pdf.
- [37] S. Sentralbyrå. Elektrisitetspriser: Kraftpris, nettleie og avgifter for husholdninger 2012 - 2017 [Online]. Hentet fra:
<https://www.ssb.no/statbank/table/09007/?rxid=af32534f-1aad-4fa5-90eb-b1f501d0b2a0>
- [38] S. Sentralbyrå. Fjernvarme og fjernkjøling [Online]. Hentet fra:
<https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/fjernvarme>
- [39] "Langsiktig markedsanalyse - norden og europa 2016–2040," Statnett 2016.
- [40] J. S. Amundsen *et al.*, "Kraftmarkedsanalyse 2017 - 2030 " Norges vassdrags- og energidirektorat, Rapport nr 78-2017, 2017.
- [41] A.-M. Bomo og M. Schade. (2015) Vannforbruk i husholdninger. En erfaringsinnhenting. . *Tidsskriftet VANN*. Hentet fra:
https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2015_929348.pdf
- [42] S. Sentralbyrå. 2017. *Kommunal vannforsyning*. Hentet fra:
https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/vann_kostraaar. Lastet ned: 18.04.2018.
- [43] E. Sivertsen og A.-M. Bomo, "Norske tall for vannforbruk med fokus på husholdningsforbruk," Norsk Vann, B20-2016 2016, ISBN 978-82-414-0384-2
- [44] 06.03.2018. *Svensk vatten: Dricksvattenfakta*. Hentet fra:
<http://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/dricksvattenfakta/>. Lastet ned: 01.05.2018.
- [45] 2017. *Skal forske på varmtvann*. Hentet fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/skal-forske-pa-varmtvann/>. Lastet ned: 15.04.2018.
- [46] T. S. Plessner, "Re: Varmtvann 2030: Boligblokker," O. Øvrevik, red., utg. Email, 2018.
- [47] G. Venkatesh og H. Brattebø, "Studying the demand-side vis-à-vis the supply-side of urban water systems – case study of oslo, norway," *Environmental Technology*, vol. 35, nr. 18, s. 2322-2333, 2014/09/17 2014.
- [48] "Vattenanvändning i hushåll. Med schabloner och mätningar i fokus," Statens Energimyndighet 2011, <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=2591>.

- [49] "Mätning av kall- och varmvattenanvändning i 44 hushåll," ER 2009:26. Statens energimyndighet 2009.
- [50] R. L. Jensen, J. Nørgaard, O. Daniels og R. O. Justesen, "Person- og forbrugsprofiler: Bygningsintegreret energiforsyning," Department of Civil Engineering, Aalborg University 2011, [DCE Technical Report, No. 69].
- [51] R. M. Hummelshøj, J. Larsen og S. E. Mikkelsen, "Feasibility of heat recovery from waste water, pvt and heat storage in multi-family buildings," COWI, READY-project 2016, http://www.smartcity-ready.eu/wp-content/uploads/2016/11/D-3-1-1_Report-describing-the-feasibility-of-heat-recovery.pdf.
- [52] K. Ahmed, P. Pylsy og J. Kurnitski, "Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings," *Solar Energy*, vol. 137, s. 516-530, 2016/11/01/ 2016.
- [53] H. Almqvist, Å. Andersson, A. Jensen og H. Jönsson, "Sammansättning och flöden på bdt-vatten, urin, fekalier och fast organiskt avfall i gebers," Svensk Vatten AB 2007.
- [54] H. Palmquist og J. Hanæus, "Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary swedish households," *Science of The Total Environment*, vol. 348, nr. 1, s. 151-163, 2005/09/15/ 2005.
- [55] H. Jönsson, A. Baky, U. Jeppsson, D. Hellström og E. Kärrman, "Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the urware model," Chalmers University of Technology 2005.
- [56] S. De Gisi, P. Casella, M. Notarnicola og R. Farina, "Grey water in buildings: A mini-review of guidelines, technologies and case studies," *Civil Engineering and Environmental Systems*, vol. 33, nr. 1, s. 35-54, 2016/01/02 2016.
- [57] A. Morel og S. Diener, "Greywater management in low and middle-income countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods," *Sandec Report. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)* vol. 14, nr. 06, 2006.
- [58] D. M. Ghaitidak og K. D. Yadav, "Characteristics and treatment of greywater: A review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 20, nr. 5, s. 2795-2809, 2013.
- [59] E. Friedler, "Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities," *Environmental Technology*, vol. 25, nr. 9, s. 997-1008, 2004/09/01 2004.

- [60] M. F. Brunk og C. Seybold, "Dezentrale abwasserwärmerückgewinnung zur steigerung der energieeffizienz von gebäuden," Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-9430-1, F 2934 2015.

9 VEDLEGG

Vedlegg 1	NS-EN 12831-3:2017	79
Vedlegg 2	Referansebygningen	80
Vedlegg 3	Tiltenkt systemløsning	81
Vedlegg 4	Varmtvannsbereder	83
Vedlegg 5	Temperaturforhold i oppsamlingstank (IDA ICE)	87
Vedlegg 6	Forbruksprofiler	88
Vedlegg 6.a	Grunnsenario.....	88
Vedlegg 6.b	Høy temperatur	89
Vedlegg 6.c	Lav temperatur	90
Vedlegg 6.d	Høyt forbruk	91
Vedlegg 6.e	Lavt forbruk	92

Vedlegg 1 NS-EN 12831-3:2017

Beregningsmetodikk for varmt tappevann gitt i tillegg B.2.2 i *NS-EN 12831-3:2017*.

$$n_{P,eq,max} = \begin{cases} 1 & \text{hvis } A_h < 10 \text{ m}^2 \\ 1,75 - 0,01875 * (50 - A_h) & \text{hvis } 10 \text{ m}^2 < A_h < 50 \text{ m}^2 \\ 0,035 * A_h & \text{hvis } A_h > 50 \text{ m}^2 \end{cases}$$

$$n_{P,eq} = \begin{cases} n_{P,eq,max} & \text{hvis } n_{P,eq,max} < 1,75 \\ 1,75 + 0,3 * (n_{P,eq,max} - 1,75) & \text{hvis } n_{P,eq,max} \geq 1,75 \end{cases}$$

$$V_{W,P,day} = \min(x; (y * \frac{A_h}{n_{P,eq}}))$$

Hvor	
A_h	Habitable area
$n_{P,eq,max}$	Maximum number of equivalent persons corresponding to the part of the group supplied by the same DHW transmitter (individual or attached house and collective housing)
$n_{P,eq}$	Number of equivalent persons used for calculating the DHW requirements
x	40,71
y	3,26
$V_{W,P,day}$	Hot water requirement per day [l/d]

Vedlegg 2 Referansebygningen

Bygning

Antall beboere	150	Personer
Bruksareal per person	50	m ² /pers
Totalt bruksareal boligblokk	7500	m ²

Vannforbruk

Totalt vannforbruk	145,4	l/pd
Varmtvannsforbruk	50,9	l/pd
Varmt tappevann andel av totalt vannforbruk	0,35	-
Gråvann	100,3	l/pd
Gråvann andel av totalt vannforbruk	0,69	-

Temperaturer

Innkommende kaldtvann	7	°C
Varmt tappevann bereder	65	°C
Varmt tappevann tappested	55	°C
Temperatur gråvann	20-30	°C

Energibehov

Varmtvannsbehov (tapping)	3,44	kWh/pd
---------------------------	------	--------

Energisentral

Oppsamlingstank for gråvann	4500	Liter
Bereder for varmt tappevann	4500	Liter
Installert effekt spisslast/backup	29	kW

Vedlegg 3 Tiltent systemløsning

Kortfattet beskrivelse av prinsipp.

1. GV fra leiligheter samles i oppsamlingsbasseng.
 2. Ved varmebehov starter varmepumpen, samt PU1 og PU2.
 3. GV varmeveksles med kaldt tappevann i HX
 4. GV føres deretter til fordamper i HP
 5. Nedkjølt GV føres til sluk.
-
1. Kaldt tappevann passiv veksling i HX (rørveksler).
 2. Varmes ytterligere i kondensator i HP (eks. plateveksler).
 3. Forvarmet vann ytterligere oppvarming til nødvendig temperaturnivå av spisslastkilde.
-
- Fireveis-ventil sørger rengjøringsprogram
 - Nivåbryter i oppsamlingstank sørger for at HP stopper hvis det går tomt for gråvann.
 - Overløpsrør fører gråvann til avløp om det tilføres mer enn det er plass til i oppsamlingstanken. Også bypass ved eventuelt vedlikehold.



Vedlegg 4 Varmtvannsbereder

Forutsetninger

Middeltemperatur oppladet	65,0 °C
Middeltemperatur utladet	42,5 °C
Middeltemperaturdifferanse	22,5 °C
Beredervolum	4500 liter

Ukedag

DIMENSJONERING: VVB - UKEDAG

Kolbe **29** kW

← forslag: **21,453125** kW, minsteverdi for kolbe-effekt

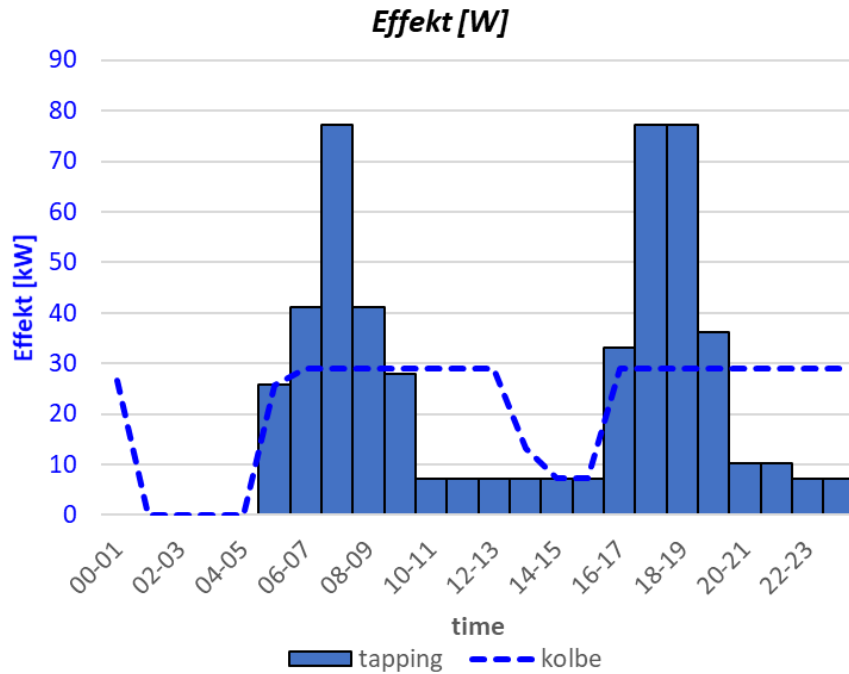
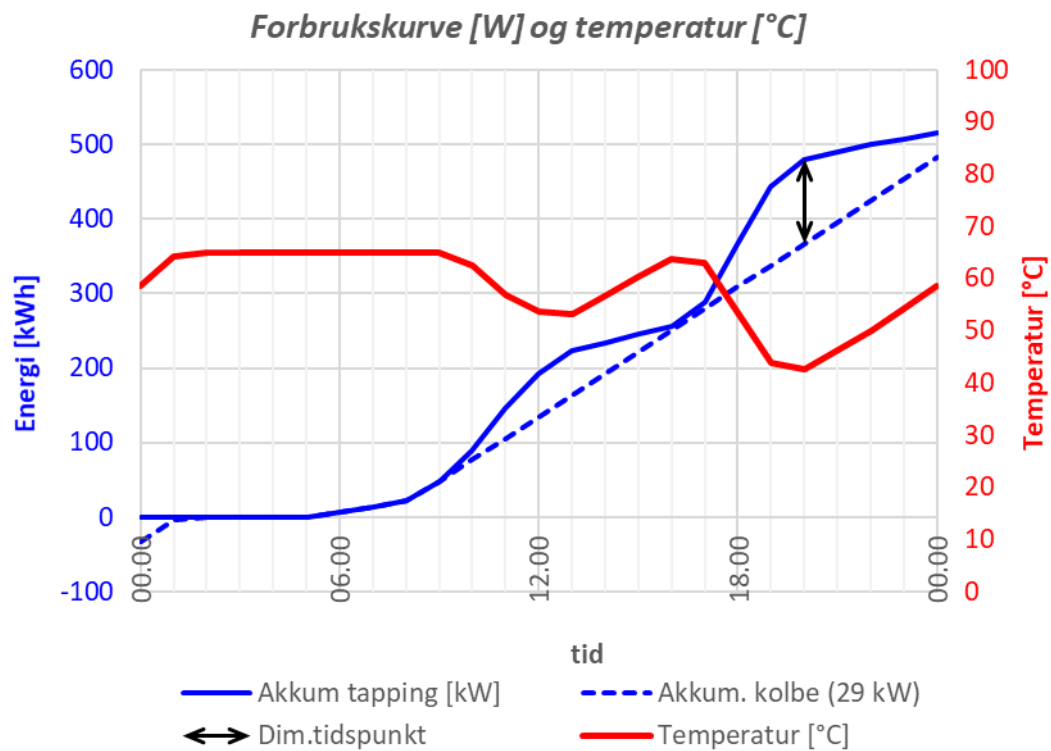
T_min **42,5** °C

T_max **65** °C

Temperaturfall, ΔT 22,5 K

Volum **4098** liter (minsteverdi for beredervolum)

tid	time	tapping [kW]	Akkum tapping [kW]	Mellom-verdi [kW]	Akkum. kolbe (29 kW)	Kolbe-effekt [kW]	Temperatur [°C]	Varme-mangel [kWh]
00:00			0		-26,525		59,4521264	
01:00	00-01	0	0	667	0	26,525	65	0
02:00	01-02	0	0	638	0	0	65	0
03:00	02-03	0	0	609	0	0	65	0
04:00	03-04	0	0	580	0	0	65	0
05:00	04-05	0	0	551	0	0	65	0
06:00	05-06	25,725	25,725	547,725	25,725	25,725	65	0
07:00	06-07	41,175	66,9	559,9	54,725	29	62,4535208	12,175
08:00	07-08	77,25	144,15	608,15	83,725	29	52,3617244	60,425
09:00	08-09	41,175	185,325	620,325	112,725	29	49,8152452	72,6
10:00	09-10	27,825	213,15	619,15	141,725	29	50,061004	71,425
11:00	10-11	7,2	220,35	597,35	170,725	29	54,6206135	49,625
12:00	11-12	7,2	227,55	575,55	199,725	29	59,1802231	27,825
13:00	12-13	7,2	234,75	553,75	228,725	29	63,7398327	6,025
14:00	13-14	7,2	241,95	531,95	241,95	13,225	65	0
15:00	14-15	7,2	249,15	510,15	249,15	7,2	65	0
16:00	15-16	7,2	256,35	488,35	256,35	7,2	65	0
17:00	16-17	33	289,35	492,35	285,35	29	64,1633744	4
18:00	17-18	77,25	366,6	540,6	314,35	29	54,071578	52,25
19:00	18-19	77,25	443,85	588,85	343,35	29	43,9797815	100,5
20:00	19-20	36,075	479,925	595,925	372,35	29	42,5	107,575
21:00	20-21	10,275	490,2	577,2	401,35	29	46,4164536	88,85
22:00	21-22	10,275	500,475	558,475	430,35	29	50,3329073	70,125
23:00	22-23	7,2	507,675	536,675	459,35	29	54,8925168	48,325
00:00	23-24	7,2	514,875	514,875	488,35	29	59,4521264	26,525



Ikke ukedag

DIMENSJONERING: VVB - IKKE UKEDAG

Kolbe **29** kW

← forslag: **21,453125** kW, minsteverdi for kolbe-effekt

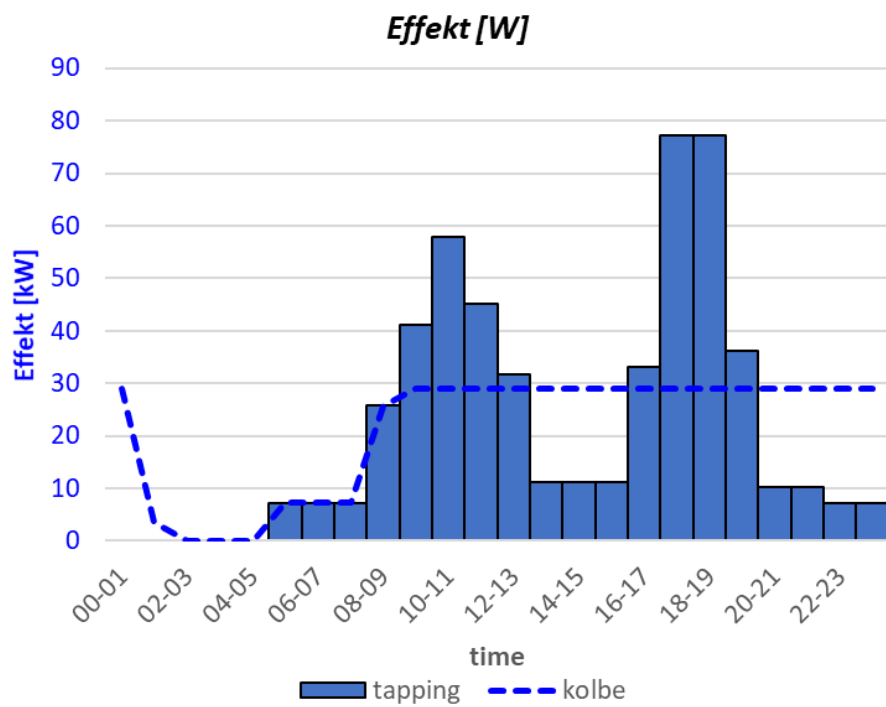
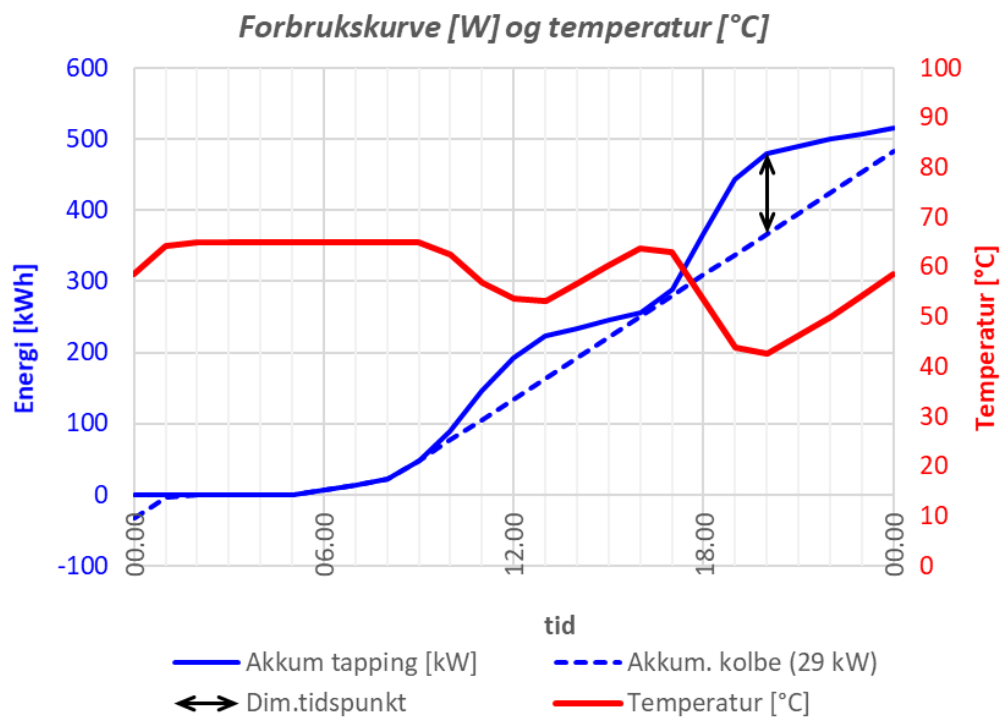
T_min **42,5** °C

T_max **65** °C

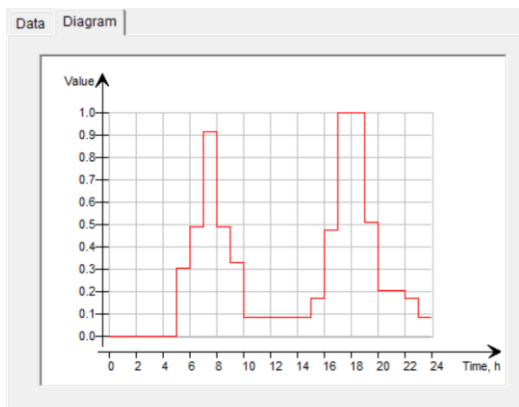
Temperaturfall, ΔT 22,5 K

Volum **4328** liter (minsteverdi for beredervolum)

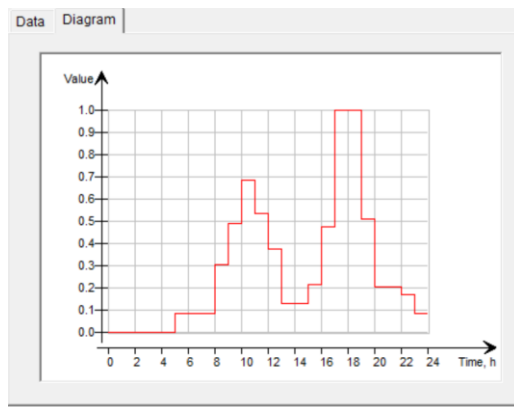
tid	time	tapping [kW]	Akkum tapping [kW]	Mellom-verdi [kW]	Akkum. kolbe (29 kW)	Kolbe-effekt [kW]	Temperatur [°C]	Varme-mangel [kWh]
00:00			0		-32,55		58,553037	
01:00	00-01	0	0	667	-3,55	29	64,296875	3,55
02:00	01-02	0	0	638	0	3,55	65	0
03:00	02-03	0	0	609	0	0	65	0
04:00	03-04	0	0	580	0	0	65	0
05:00	04-05	0	0	551	0	0	65	0
06:00	05-06	7,2	7,2	529,2	7,2	7,2	65	0
07:00	06-07	7,2	14,4	507,4	14,4	7,2	65	0
08:00	07-08	7,2	21,6	485,6	21,6	7,2	65	0
09:00	08-09	25,725	47,325	482,325	47,325	25,725	65	0
10:00	09-10	41,175	88,5	494,5	76,325	29	62,5885783	12,175
11:00	10-11	57,9375	146,4375	523,4375	105,325	29	56,8571193	41,1125
12:00	11-12	45,0375	191,475	539,475	134,325	29	53,6806778	57,15
13:00	12-13	31,6875	223,1625	542,1625	163,325	29	53,1483825	59,8375
14:00	13-14	11,0625	234,225	524,225	192,325	29	56,7011444	41,9
15:00	14-15	11,0625	245,2875	506,2875	221,325	29	60,2539063	23,9625
16:00	15-16	11,0625	256,35	488,35	250,325	29	63,8066681	6,025
17:00	16-17	33	289,35	492,35	279,325	29	63,0144146	10,025
18:00	17-18	77,25	366,6	540,6	308,325	29	53,4578565	58,275
19:00	18-19	77,25	443,85	588,85	337,325	29	43,9012984	106,525
20:00	19-20	36,075	479,925	595,925	366,325	29	42,5	113,6
21:00	20-21	10,275	490,2	577,2	395,325	29	46,2087368	94,875
22:00	21-22	10,275	500,475	558,475	424,325	29	49,9174736	76,15
23:00	22-23	7,2	507,675	536,675	453,325	29	54,2352553	54,35
00:00	23-24	7,2	514,875	514,875	482,325	29	58,553037	32,55



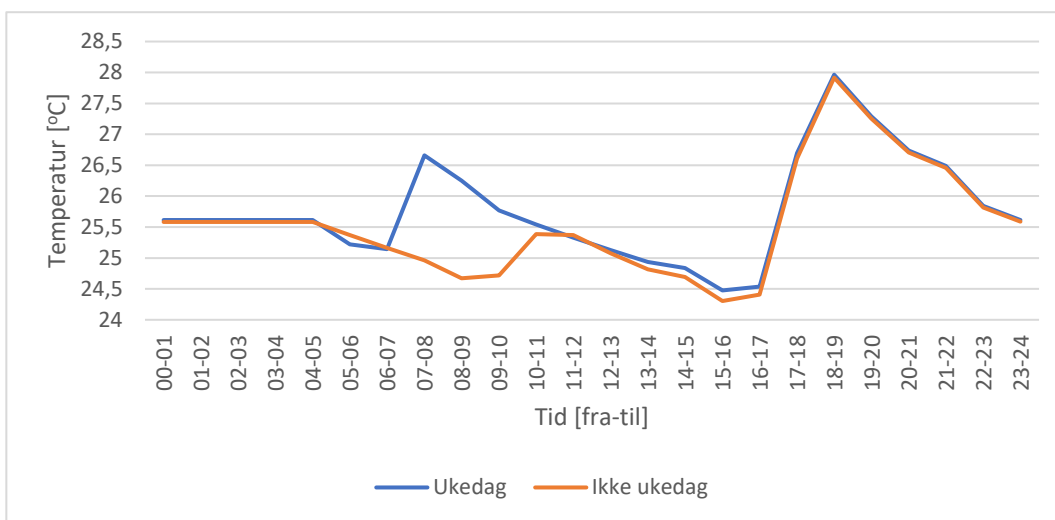
Vedlegg 5 Temperaturforhold i oppsamlingstank (IDA ICE)



Benyttet temperaturprofil for ukedag i IDA ICE.



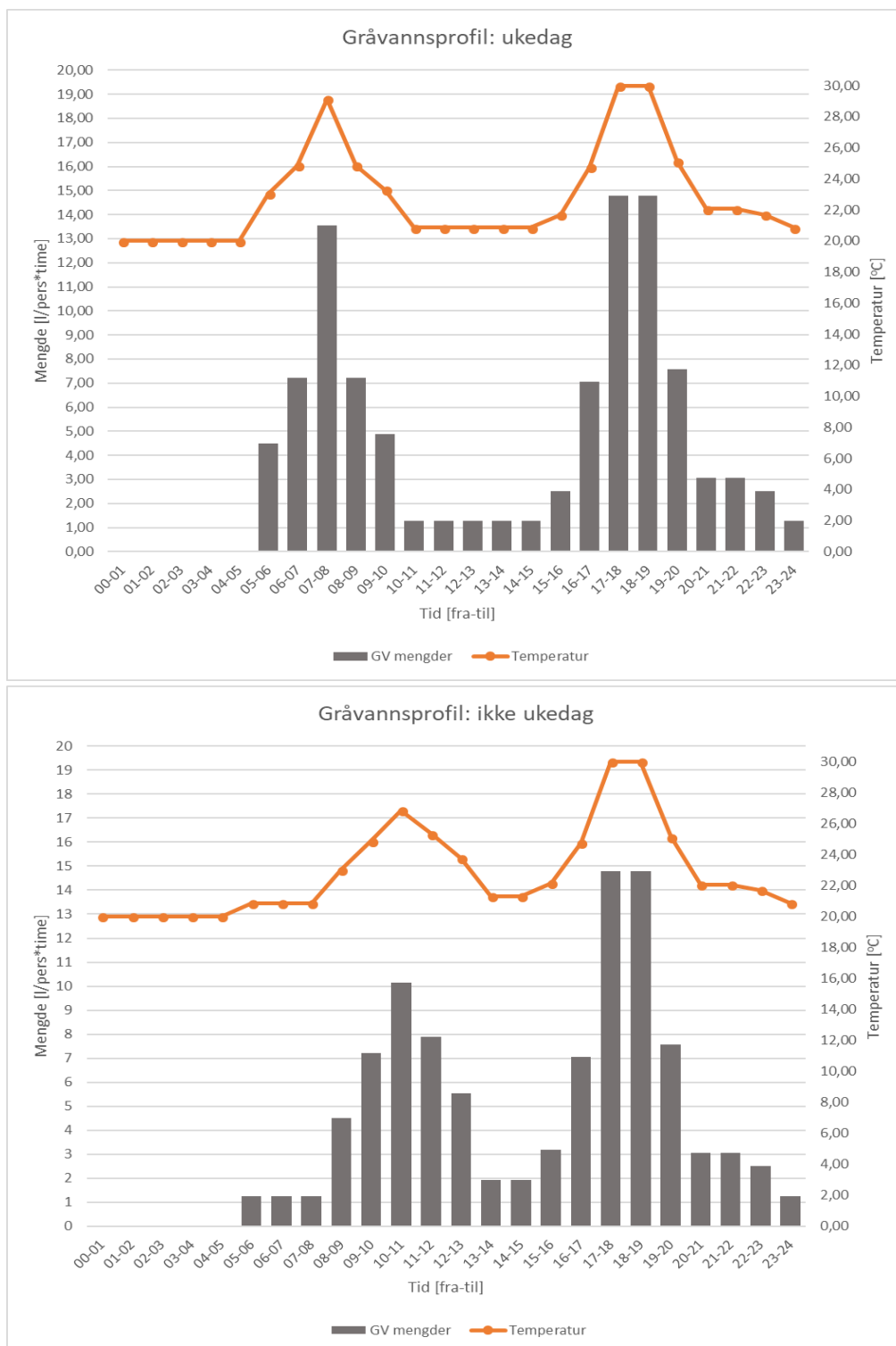
Benyttet temperaturprofil utenfor ukedag i IDA ICE.



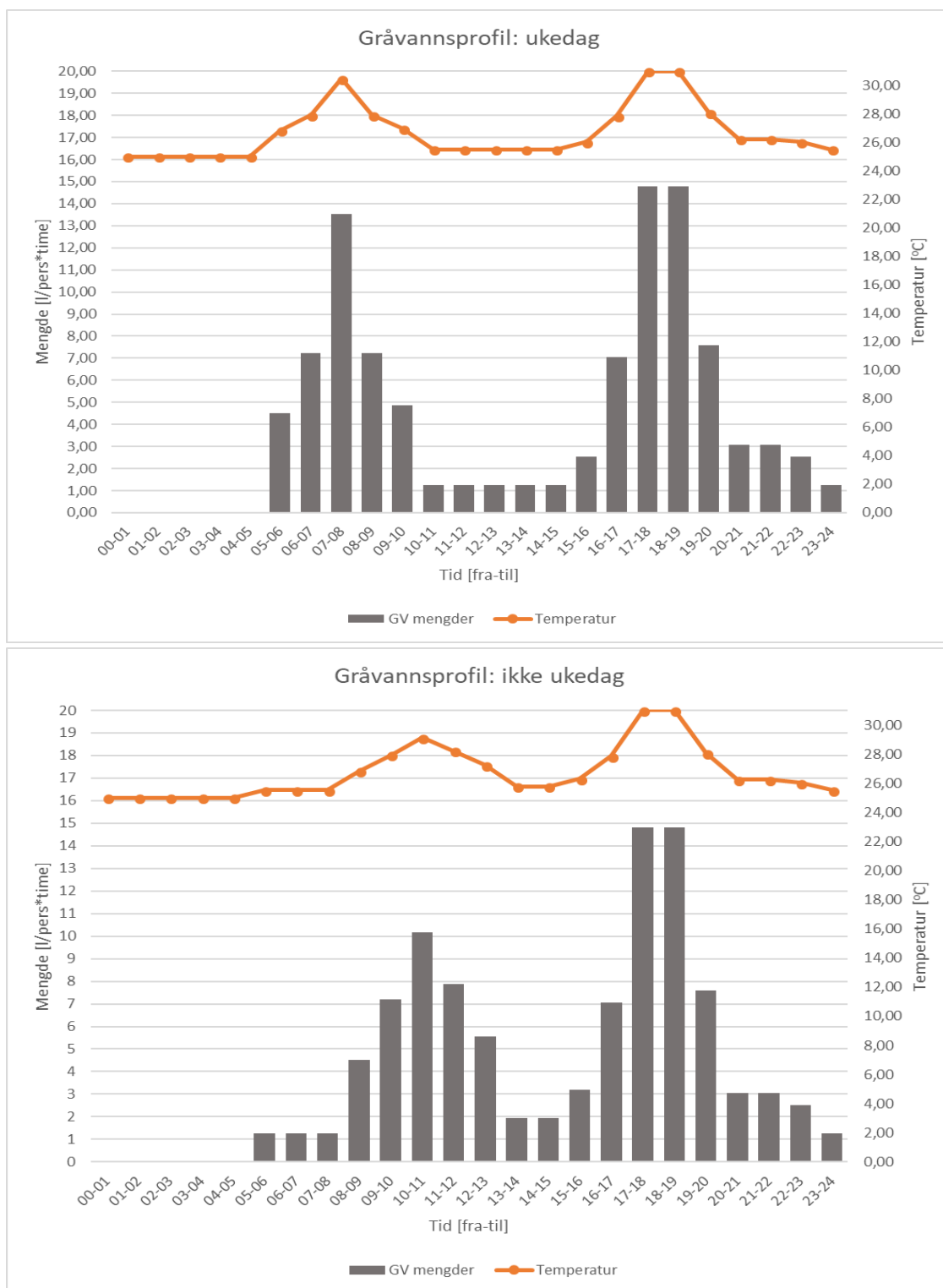
Temperaturvariasjon i oppsamlingstanken for gråvann. Den konstante temperaturen mellom 24 og 04 er et resultat av forutsetningen om neglisjert varmetap, samt ingen tilførsel og ingen uttak av vann fra tanken.

Vedlegg 6 Forbruksprofiler

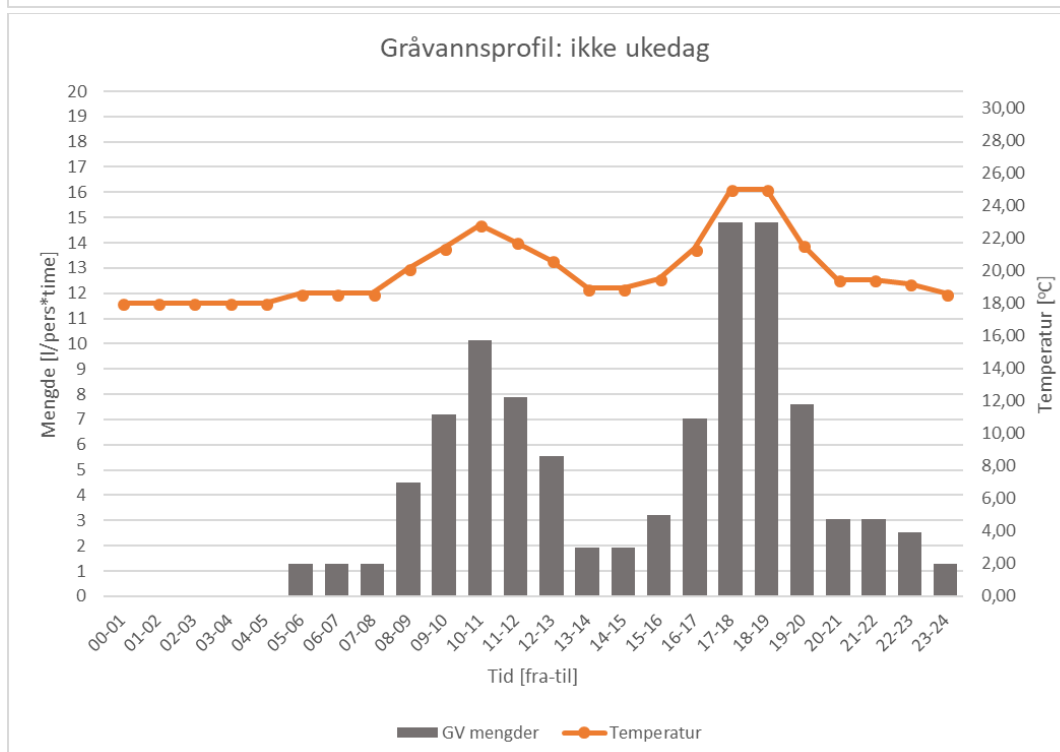
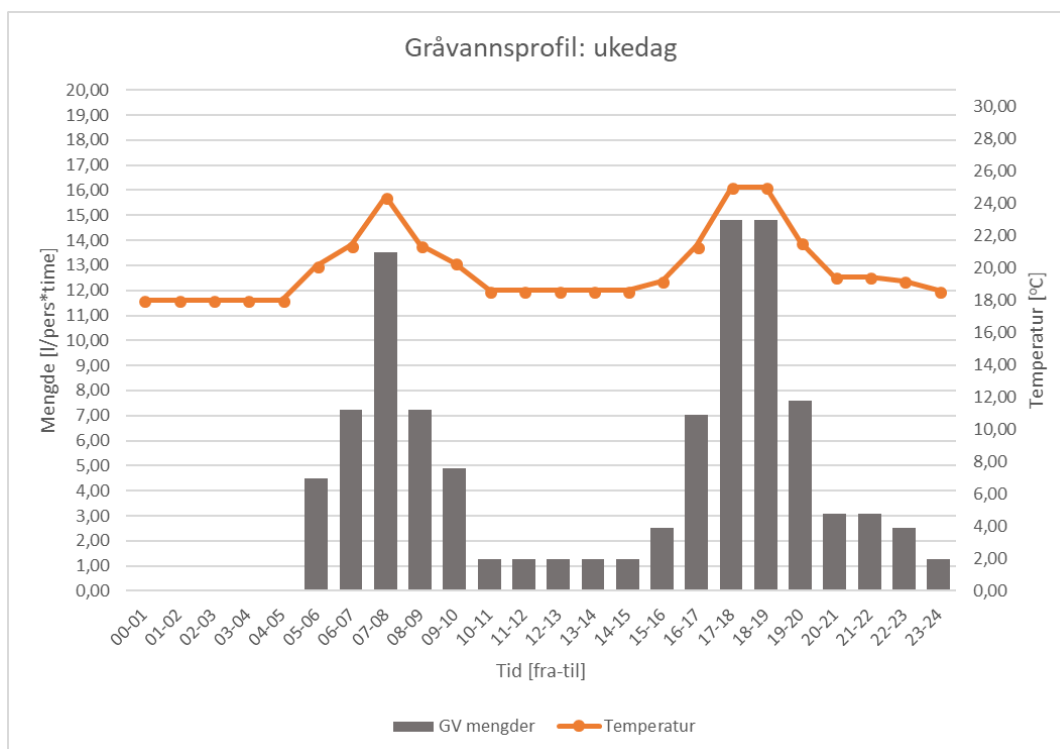
Vedlegg 6.a Grunnsenarario



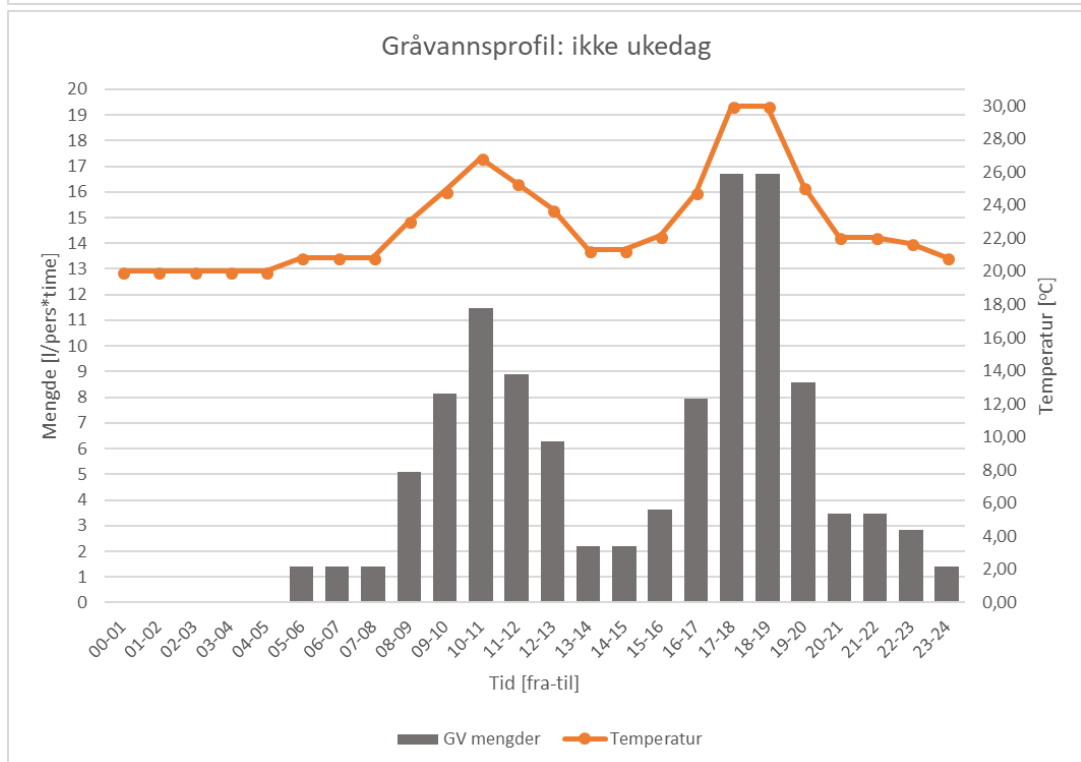
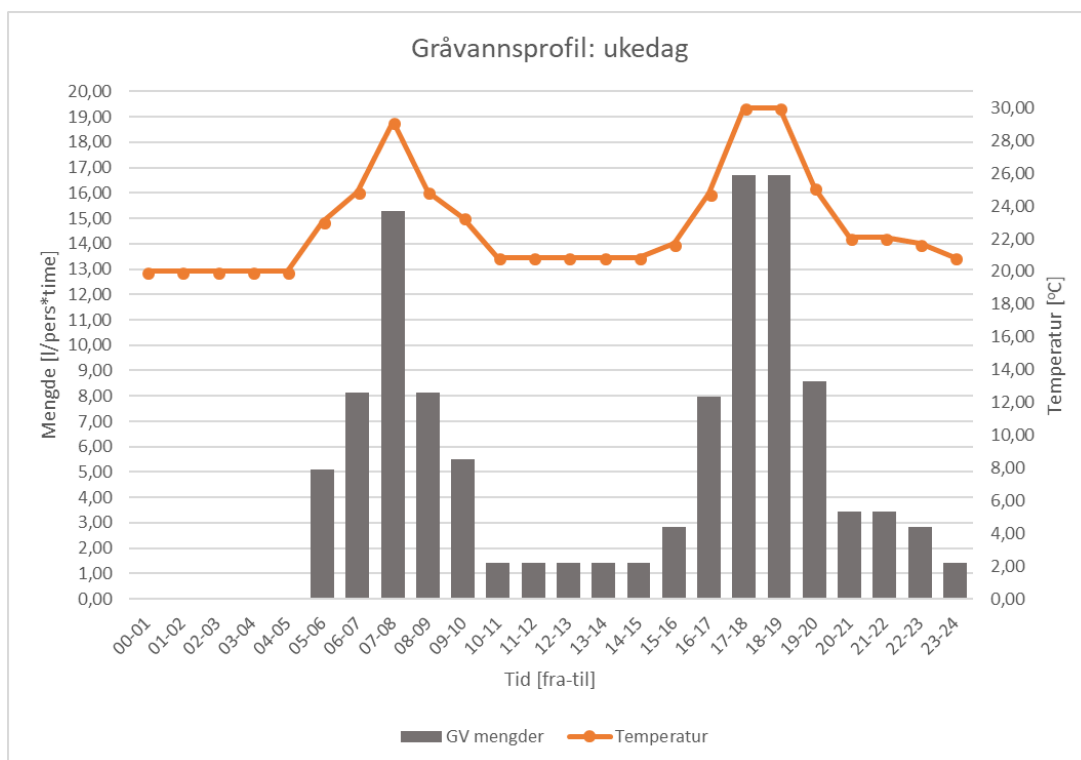
Vedlegg 6.b Høy temperatur



Vedlegg 6.c Lav temperatur



Vedlegg 6.d Høyt forbruk



Vedlegg 6.e Lavt forbruk

