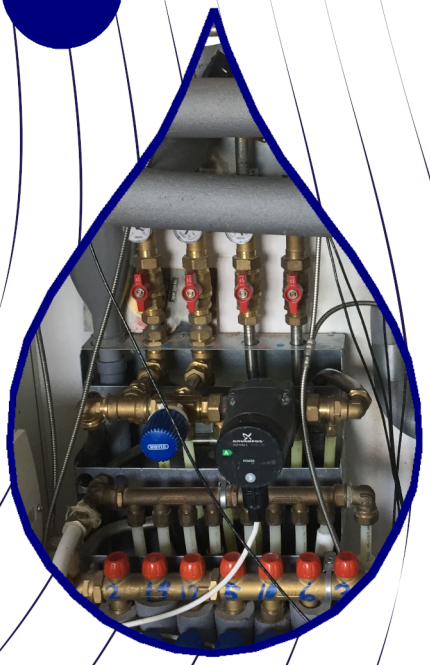
Varmt brugsvand i parcelhuse

Afgangsprojekt
2018/2019



Jacob Scharling Jørgensen
Sofie Sand Knudsen

Aalborg Universitet
Indoor Environmental and Energy Engineering

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri og Anlæg
Indoor Environmental and Energy Engineering
Aalborg Universitet
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
www.civil.aau.dk

Titel:

Varmt brugsvand i parcelhuse

Projekt:

Afgangsprojekt

Projektperiode:

September 2018 - Juni 2019

Deltagere:

Jacob Scharling Jørgensen
Sofie Sand Knudsen

Vejledere:

Anna Marszal-Pomianowska
Rasmus Lund Jensen

Sidetal:

182

Appendiks:

7

Afleveringsdato:

07. juni 2019

Synopsis:

Strengere krav til rumopvarmning og elektricitet har medført, at varmt brugsvand i dag udgør en større andel af det samlede energibehov for boliger. Men grundet fåtallige målinger er kendskabet til danskernes varmtvandsforbrug og effektiviteten af brugsvandssystemer begrænset, hvorfor kravene på området endnu ikke er blevet skærpet. I et forsøg på at opnå større indsigt på området dokumenteres det samlede vandforbrug samt varmtvandsforbruget derfor i dette afgangsprojekt for tre boliger.
For alle tre boliger er det gennemsnitlige varmtvandsforbrug dokumenteret, mens der for to af boligerne også er foretaget nærmere analyser af de enkelte tapsteder, hvor rørlængder, ventetider, vandspild og energiforbrug er fastlagt. Målingerne er ligeledes anvendt til at fastlægge effektiviteten af alle tre brugsvandssystemer samt identificere de mest kritiske tapsteder i forhold til energitab.
Med tanke på at reducere energiforbruget til produktion af varmt brugsvand er to varmegenvindingssystemer undersøgt i en brusekabine og effektiviteten fastlagt. Denne er, sammen med resultater for varmtvandsforbruget, anvendt i en energiberegning for én af boligerne med det formål at dokumentere ændringernes betydning for den samlede energiramme.

Abstract

Within the last decade, more stringent demands for space heating and electric energy consumption together with new, lower energy frames have become effective. Though, a lack of knowledge, including measurements, with regards to domestic hot water (DHW) consumption in single-family houses means no further restrictions for production and consumption of DHW have been made in the same period. Hence, the same standard value of 250 L/m^2 year for DHW consumption as 15 years ago is still used for single-family houses, even though several studies have pointed the consumption rates of DHW has decreased since 1996.

Therefore, the aim of this study is to provide further knowledge into the area by measuring the DHW consumption in three single-family houses in Denmark. The measurements tend to provide more information with regards to daily consumption rates and consumption profiles. Likewise, the measurements will be used to determine the energy consumption for producing DHW as well as the heat losses in the water system of each single-family house.

Results from two of the measured houses proved a lower daily DHW consumption rate compared to the standard value used for calculating the energy frame, being 166 L/m^2 year and 101 L/m^2 year respectively. Measurements from the third house documented a daily DHW consumption rate of 525 L/m^2 year, being twice as high as the standard value, though it should be mentioned the house is smaller and older than the other houses. Also, the water system is old, whereas a high waiting time of DHW was observed, leading to a large amount of wastewater. The measurements also stated that the largest energy loss occurred in the pipelines, showers contributing the most, whereas the future focus should be on reducing this.

Forord

Denne rapport er et afgangsprojekt, udarbejdet i perioden fra d. 1. september 2018 til d. 7. juni 2019, af to studerende ved *Indoor Environmental and Energy Engineering* uddannelsen på Aalborg Universitet. Projektet omhandler varmt brugsvand i parcelhuse, med særligt fokus på at undersøge varmtvandsforbruget og energiforbruget til produktion af varmt brugsvand. Undersøgelserne er foretaget gennem målinger i tre parcelhuse i Danmark og er yderligere suppleret med forsøg og målinger foretaget i laboratoriet på Aalborg Universitet. Formålet med projektet har været at undersøge varmtvandsforbruget i relation til tideligere studier og Bygningsreglementet [2018] samt undersøge betydningen af energiforbruget i henhold til energirammen.

Der skal lyde en stor tak til personer, der har været behjælpelige med indsamling af data og databehandling i forbindelse med udarbejdelse af rapporten:

- Rasmus Lund Jensen, vejleder og lektor v. Institut for Byggeri og Anlæg
- Anna Marszal-Pomianowska, vejleder og lektor v. Institut for Byggeri og Anlæg
- Olena Kalyanova Larsen, lektor v. Institut for Byggeri og Anlæg
- Kim Trangbæk Jønsson, Forskningsassistent v. Institut for Byggeri og Anlæg
- Lars Isbach Poulsen, Ingeniørassistent v. Institut for Byggeri og Anlæg
- Joakim Levi Haslund, studerende v. Aalborg Universitet
- Casper Skov Mathisen, studerende v. Aalborg Universitet
- Stefan Høg og Christina Ravn Nielsen, beboere v. Kildebjerg Søvej

Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen
Aalborg Universitet, 07. juni 2019

Indholdsfortegnelse

I Introduktion **1**

Kapitel 1 Indledning **3**

Kapitel 2 Problembeskrivelse **13**

II Casebeskrivelse **15**

Kapitel 3 Boligpræsentation **17**
3.1 Kærhavebakken, Aalborg 18
3.2 Kildebjerg Søvej, Ry 20
3.3 Petersborgvej, Aalborg 21

Kapitel 4 Måleudstyr **23**
4.1 Flowmålere 23
4.2 KATflows 26

Kapitel 5 Kvalitetssikring af målinger **29**
5.1 Målinger ved tapsteder 29
5.2 Målinger i teknikrum 31
5.3 Opsummering 33

IIIAnalyse **35**

Kapitel 6 Overordnet forbrug **37**
6.1 Vandforbrug ved Kærhavebakken 37
6.2 Vandforbrug ved Kildebjerg Søvej 41
6.3 Vandforbrug ved Petersborgvej 44
6.4 Opsummering 45

Kapitel 7 Statistisk analyse **47**
7.1 Varighed pr. tapning 47
7.2 Temperatur pr. tapning 50
7.3 Energiforbrug pr. tapning 51
7.4 Opsummering 52

Kapitel 8 Forbrugsprofiler **53**
8.1 Opløsning 53
8.2 Forbrugsprofiler 58
8.3 Opsummering 63

Kapitel 9 Analyse af tapsteder **65**

9.1 Brusere . . . 65
9.2 Håndvaske . . . 70
9.3 Opvaskemaskine . . . 73
9.4 Vaskemaskine . . . 75
9.5 Opsummering . . . 77

Kapitel 10 Energiforbrug og tab i brugsvandssytemer **79**
10.1 Energiforbrug og tab ved Kærhavebakken . . . 80
10.2 Energiforbrug og tab ved Kildebjerg Søvej . . . 87
10.3 Energiforbrug og tab ved Petersborgvej . . . 90
10.4 Opsummering . . . 94

IV Fremtidsløsninger **97**

Kapitel 11 Bruser med varmegenvinding **99**
11.1 Varmegenvindingssystemer . . . 99
11.2 Testresultater af varmegenvindingssystemer . . . 100
11.3 Fremløbstemperatur ved tapsted . . . 105
11.4 Opsummering . . . 108

Kapitel 12 Energiberegning **111**
12.1 Energiforbrug med varmegenvinding . . . 111
12.2 Energiforbrug med målt varmtvandsforbrug . . . 113
12.3 Energiforbrug med målt varmtvandsforbrug og varmegenvinding . . . 114
12.4 Opsummering . . . 115

V Afrunding **117**

Kapitel 13 Diskussion **119**

Kapitel 14 Konklusion **121**

Kapitel 15 Perspektivering **125**

Litteratur **127**

Appendiks A Kalibrering af flowmålere **129**

Appendiks B Kalibrering af KATflows **139**

Appendiks C Kontroltest af flowmålere **147**

Appendiks D Analyse af brusere ved Kærhavebakken **155**

Appendiks E Håndtering af KATflow data **161**

Appendiks F Opvaskemaskine og vaskemaskine **169**

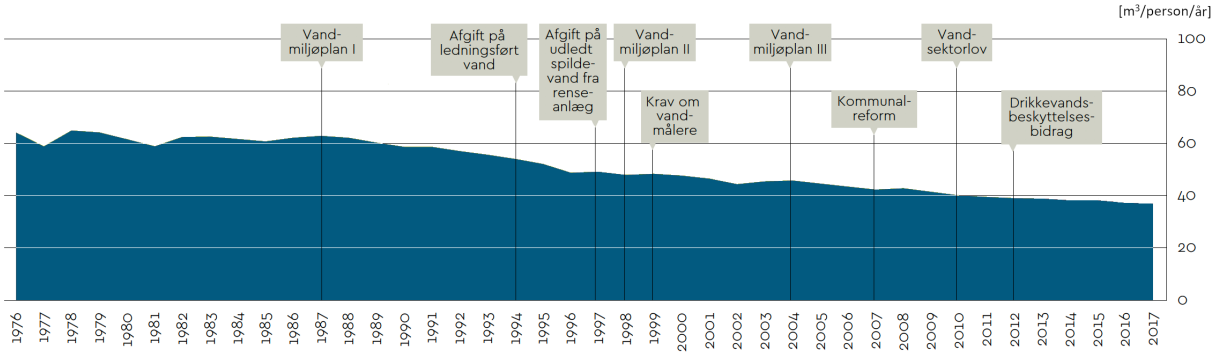
Appendiks G Bruser med varmegenvinding **177**

Del I

Introduktion

Indledning 1

Tørke og mangel på rent drikkevand er som følge af den globale opvarmning et udbredt problem over hele verden, og det har i flere lande ført til restriktioner fra regeringens side omkring brugen af drikkevand. I Danmark er situationen dog en anden. Her betragter størstedelen af befolkningen formodentligt rent drikkevand som en naturlig del af hverdagen og tager let denne ressource for givet. Men i fremtiden kan denne luksus med rent vand i hanen også gå hen at blive en mangelvare i Danmark. Manglen på rent drikkevand er et verdensomspændende problem, og netop derfor skal hele verden samarbejde om at finde en løsning, der kan sikre rent drikkevand på verdensplan i fremtiden også. I Danmark har man udviklet og indført forskellige tiltag henover de seneste 30 år for at imødekomme problematikken omkring rent vand med det formål at reducere danskernes vandforbrug. Statistikker over vandforbruget i Danmark for perioden 1976 - 2017, se Figur 1.1, viser da også, at det samlede vandforbrug er reduceret markant gennem de sidste 30 år.



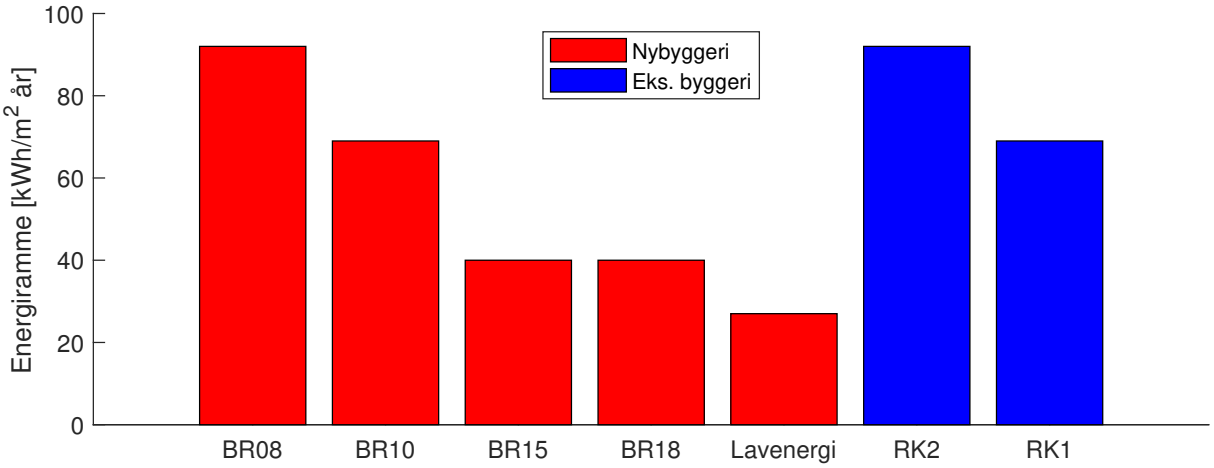
Figur 1.1: Udvikling i samlet vandforbrug i Danmark i perioden 1976 - 2017 [DANVA - Dansk Vand og Spildevandsforening, 2018, Modificeret].

Figuren viser, at mens forbruget var stabilt i perioden 1976 - 1986, skete der med indførslen af Vandmiljøplan I i 1987 store ændringer, idet befolkningen blev mere miljøbevidste og spildevandstaksten steg. Efterfølgende blev der indført en drikkevandsafgift på ledningsført vand, krav om vandmålere i alle boliger samt yderligere to Vandmiljøplaner. Som det fremgår af figuren, har indførelsen af disse tiltag ført til, at vandforbruget gennem de seneste 30 år er faldet med 40% fra 63 m^3/pers./år i 1987 til 38 m^3/pers./år i 2017. Selvom manglen på rent drikkevand ikke har ramt Danmark, indikerer udviklingen tydeligt, at der siden slutningen af 1980'erne i langt højere grad end tidligere har været fokus på vandforbruget, og at indførslen af de enkelte tiltag har reduceret vandforbruget i Danmark.

Udover de ovennævnte tiltag har den teknologiske udvikling også haft indflydelse på danskernes vandforbrug gennem de seneste årtier. Eksempelvis benytter nyere toiletter mindre vand pr. skyl end tidligere og er ofte udstyret med en 2-skylsknap, hvormed brugeren selv har indflydelse på, hvor meget vand der bruges pr. skyl. Herudover har nyere vandhaner og brusere ofte indbyggede

vandbegrænsere, mens nye vaskemaskiner og opvaskemaskiner bruger mindre vand pr. vask sammenlignet med ældre modeller. Ændringerne har alle været med til at reducere forbruget af varmt brugsvand og påvirket forholdet mellem koldt og varmt vand i forhold til det samlede vandforbrug. Og idet det kræver mere energi at producere varmt brugsvand, er netop forholdet mellem koldt og varmt vand i det samlede vandforbrug ikke en uvæsentligt faktor at undersøge. Selvom den teknologiske udvikling har haft positiv effekt på produktionen af varmt brugsvand, i form af mere effektive varmevekslere og bedre isolerede vandledninger, udgør energiforbruget til varmt brugsvand dog fortsat en stor del af boligers samlede energiforbrug.

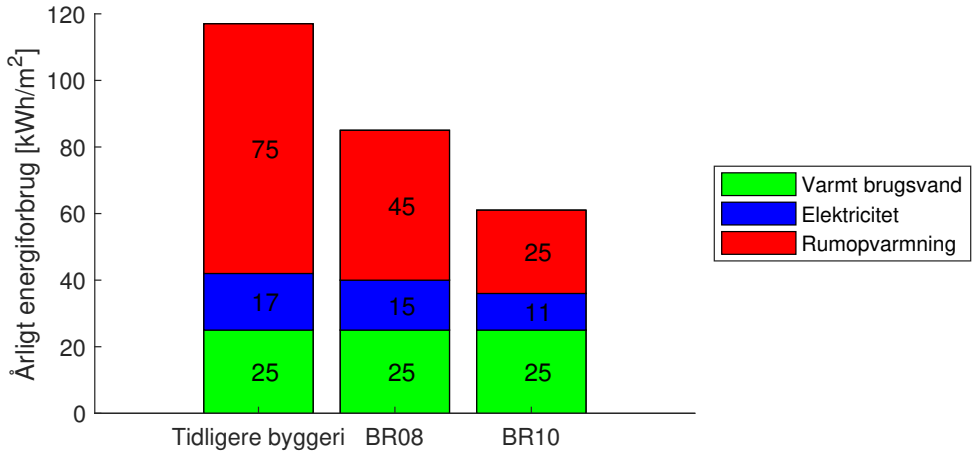
Den globale opvarmning har medført, at emner som klimaet, forurening, energiforbrug og grøn energi i dag fylder mere end nogensinde på verdensplan. Herhjemme er ingen undtagelse, hvor Danmark med Energistrategi 2050 har en målsætning om at have en fossilfri el- og varmeforsyning i 2035 samt i 2050 at være fuldstændigt uafhængige af kul, olie, gas og andre fossile brændstoffer [Klima- og Energiministeriet, 2011]. Grøn- og vedvarende energi spiller derfor en stor rolle, hvis målsætningen skal indfries. Klimadebatten og den strammere energipolitik afspejler sig også i de senere års Bygningsreglementer, hvor kravene til energibehovet i både nye og allerede eksisterende boliger er blevet skærpet. På Figur 1.2 fremgår udviklingen i energirammen siden 2008 til 2018 for en 100 m^2 bolig.



Figur 1.2: Udvikling i energirammen fra 2008 til 2018 for en 100 m^2 bolig.

Udviklingen i energirammen viser, at der i dag stilles strengere krav til byggeri sammenlignet med 2008, og netop denne udvikling er en nødvendighed, hvis Energistrategi 2050 skal realiseres. I 2013 stod energisektoren for 37% af den samlede udledning af drivhusgasser i Danmark, mens energiforbruget til boliger alene i dag udgør ca. 40% af det samlede energiforbrug i hele landet ([Energistyrelsen, 2015], [Energistyrelsen, 2019]). Årsagen til den reducerede energiramme fremgår ikke af Figur 1.2, men skal i stedet findes i fordelingen af energiforbruget. Et eksempel på fordelingen af det årlige energiforbrug for tre forskellige boliger, der hver skal overholde det respektive krav til energirammen, er vist på Figur 1.3.

Som det fremgår af figuren, skyldes de skærpede energirammer særligt ændringer i kravene til rumopvarmning, herunder krav til U-værdier, utætheder og varmegenvinding. Opsigtvækkende er det, at kravene til varmt brugsvand fortsat er de samme som for snart 15 år siden, hvorfor energiforbruget til varmt brugsvand i dag udgør en større andel af det samlede energiforbrug end tidligere. Så længe der ikke stilles strengere krav til varmt brugsvand og ikke mindst produktionen af dette, vil energiforbruget kun udgøre mere og mere af det samlede energibehov



Figur 1.3: Eksempel på fordeling af det årlige energiforbrug i tre forskellige boliger, som alle opfylder krav til den respektive energiramme [Bøhm et al., 2010, Fig. 3.6.1].

på sigt. Ved energiberegninger udført under det nuværende Bygningsreglementet [2018] skal angives den samme årlige standardværdi på 250 L/m^2 for boliger, som blev brugt tilbage i 2006 under Bygningsreglementet [2007]. Standardværdien tager derfor ikke højde for udviklingen i det samlede vandforbrug, selvom dette er faldet med 14% siden 2006. Dertil angives standardværdien udelukkende på baggrund af boligarealet, hvorfor værdien ikke tager højde for eksempelvis antallet af beboere og tapsteder.

Årsagen til anvendelsen af en standardværdi baseret på boligarealet fremfor en værdi baseret på eksempelvis forbrug pr. person skal findes i, at kendskabet til varmtvandsforbruget i Danmark er begrænset den dag i dag. Kun et begrænset antal af studier har undersøgt varmtvandsforbruget i boliger, og derfor er det svært at fastlægge en nøjagtig, repræsentativ værdi for eksempelvis forbruget pr. person. I 1987 dokumenterede et studie af Bøhm et al. [2009], at varmtvandsforbruget var 10 m^3/pers./år. Et studie i 1996 dokumenterede et, at varmtvandsforbruget var steget siden 1987, men i perioden fra 2000 - 2007 er der jf. et fåtal af studier ikke sket mærkbare ændringer i varmtvandsforbruget. Den seneste værdi angivet i Bøhm et al. [2009] ligger over 10 år tilbage, mens antallet af studier omhandlende varmtvandsforbrug i boliger indenfor det seneste årti er begrænset. Med tanke på udviklingen i det samlede vandforbrug pr. husstand er der derfor et behov for nye studier og målinger, der kan dokumentere det nuværende forbrug af varmt brugsvand, ikke kun for boliger men for alle typer af byggerier. Dette understreges også af det faktum, at varmtvandsforbruget i dag udgør en større andel af boligens samlede energiforbrug sammenlignet med tidligere, og denne udvikling vil fortsætte, såfremt der ikke investeres flere ressourcer i at dokumentere energiforbruget til varmt brugsvand.

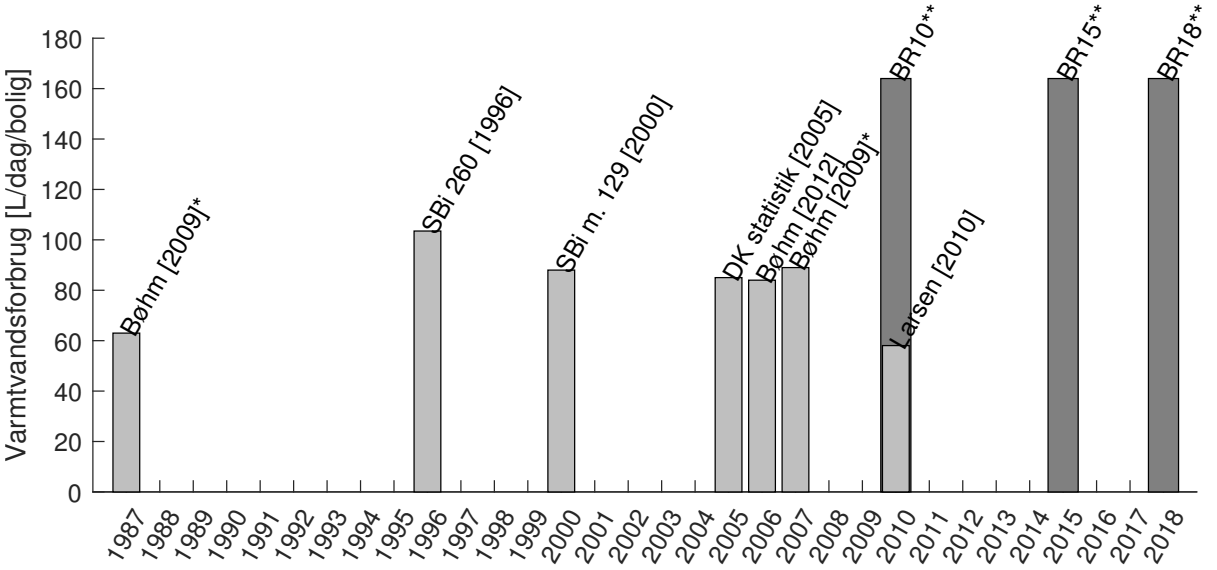
Litteraturgennemgang

Som beskrevet i afsnittet ovenfor vil varmt brugsvand udgøre en større andel af det samlede energiforbrug i Danmark i fremtiden. Men på trods af det øgede fokus på at nedbringe boligers samlede energiforbrug, blandt andet gennem strengere krav til isolering, U-værdier og energirammen for byggeri, er der ikke indført skærpede krav til varmt brugsvand, og den samme standardværdi som for snart 15 år siden for boliger på 250 L/m^2 år anvendes fortsat i dag. Ligeledes stilles der ingen krav til effektiviteten af gennemstrømsvekslere, som det er tilfældet med ventilationsanlæg, eller til det maksimale rørtab for et brugsvandssystem. Årsagen kan bl.a.

skyldes et begrænset kendskab til forbruget og energiforbruget af varmt brugsvand. Formålet med denne litteraturgennemgang er derfor at kortlægge, hvad tidligere studier har undersøgt ift. forbrug, tappeprofiler og produktionsformen af varmt brugsvand. Afslutningsvist opsummeres de enkelte studier i Figur 1.7, hvor kvaliteten af de målte data vurderes.

Studierne, der gennemgås i litteraturgennemgangen, er foretaget i Amerika og Europa, hvor varmtvandsforbruget er undersøgt i forskellige enfamiliehuse og lejligheder. Studierne er bl.a. med til at understrege den allerede nævnte udvikling i Danmark, hvor varmtvandsforbruget gennem en årrække har været stigende. Studierne dokumenterer også, at forbrugsprofiler på tværs af landegrænser er meget ens, men at der derimod er stor forskel på gennemsnitsforbruget af varmt brugsvand mellem Europa og Amerika; her er gennemsnitsforbruget af varmt brugsvand i Canada og USA i 1980'erne over tre gange så stort som forbruget i Danmark i samme periode. En af årsagerne kan skyldes, at det i Amerika er mere normalt end i Danmark at have opvaskemaskiner og vaskemaskiner tilsluttet varmt vand og ikke koldt vand.

Idet det gennemgående emne for dette projekt er undersøgelsen af varmt brugsvand i Danmark, er der på Figur 1.4 vist en tidslinje for udviklingen i varmtvandsforbruget i Danmark. Tidslinjen viser gennemsnitsforbruget af varmt brugsvand målt i liter pr. dag pr. bolig [L/dag/bolig] for nogle af de studier, der beskrives nærmere i litteraturgennemgangen. Dertil er der vist værdier for en række studier og standarder, som ikke gennemgås nærmere i litteraturgennemgangen.



Figur 1.4: Tidslinie af studier med undersøgelse af varmtvandsforbrug i Danmark. *Angiver studier, der ikke er nærmere beskrevet i litteraturgennemgangen, men hvor varmtvandsforbruget blot er angivet. **Angiver maksimal værdi for varmtvandsforbruget jf. SBi 213 [2018].

Tidslinjen viser, at varmtvandsforbruget i Danmark steg fra 61 L/dag/bolig i 1987 til 84 L/dag/bolig i 2007. Hertil var forbruget højere i 1996, mens det efterfølgende faldt igen. I 2010 blev der foretaget en række målinger af varmtvandsforbruget i syv parcelhuse, og her blev gennemsnitsforbruget fastlagt til 58 L/dag/bolig, en værdi væsentligt lavere end de tidligere studier. Resultaterne af de forskellige målinger og statistikker indikerer derfor, at der er stor usikkerhed på området samt at varmtvandsforbruget varierer, alt efter hvor målingerne foretages. På tidslinjen er også indtegnet det maksimalt antagne varmtvandsforbrug jf. SBi 213 [2018] for en husstand i Danmark på 60 m^3 pr. år, svarende til 164 L/dag/bolig. Her fremgår det, at

denne værdi ligger væsentligt højere end nogle af de tidligere målinger. Selvom værdien er en maksimalværdi, indikerer den væsentlige afvigelse ift. alle de præsenterede studier i perioden 1987 - 2010, at der forsat er stor usikkerhed på området.

I perioden fra 1987 - 2010 blev ikke kun danske men også internationale studier foretaget. Becker og Stogsdill [1990] udførte i slutfirserne et af sin tids største studier omhandlende varmt brugsvand, hvor resultater fra fem tidligere studier blev sammenfattet til én database, indeholdende mere end 30 mio. data for boliger og lejligheder i USA og Canada. Ud fra databasen analysererede Becker og Stogsdill [1990] bl.a. forbruget af varmt brugsvand på time- og dagsbasis for hverdage og weekender. Studiet dokumenterede et gennemsnitligt varmtvandsforbrug på 238 L/dag/boligenhed for hverdage og weekender, og identificerede samtidig peaks med et forbrug over 13 L/time om morgenen fra 06:00 - 11:00 og om aftenen fra 17:00 - 21:00.

I 2005 gennemførte Yao og Steemers [2005] et studie, der havde til formål at udvikle en simpel model til estimering af det daglige energiforbrug i boliger i Storbritannien, heriblandt energiforbrug til varmt brugsvand. Modellen skulle efterfølgende kunne anvendes ved planlægning og design af vedvarende energisystemer til boliger. Til udviklingen af modellen blev statistikker for forskellige størrelser husstande inklusiv boligernes samlede energiforbrug anvendt. Statistikkerne indikerede, at varmt brugsvand udgjorde omkring 20% af boligernes samlede energiforbrug benyttet til forskellige formål. Den simple model blev valideret ved sammenligning med et forbrugsprofil for en familie på tre personer, hvortil studiet konkluderede en fin overensstemmelse mellem resultaterne.

Et studie fra 2011 af Thomas et al. [2011] anses som værende et af de største studier af sin slags i nyere tid. Baseret på målinger i perioden fra 2007 - 2008 i 74 canadiske boliger, havde studiet til formål at undersøge varmtvandsforbruget. Herudover undersøgte studiet, om der var sket markante ændringer siden 1990'erne, hvor de dengang gældende standarder for Nordamerika blev indført, idet måleudstyr til måling af vandforbrug, teknologien for vandvarmere og personers vaner har ændret sig gennem årene. Resultaterne fra studiet viste, at det gennemsnitlige varmtvandsforbrug var 186 L/dag, og dermed at forbruget var faldet henover de sidste 17 år med ca. 60 L/dag sammenlignet med værdien fra den Nordamerikanske standard på 243 L/dag. Dertil viste målingerne også, at der var sket en markant ændring i antallet af tapninger pr. dag, hvor studiet dokumenterede 79 tapninger/dag sammenlignet med standardværdien på 6 sammenhængende tapninger/dag efterfulgt af 18 timer uden forbrug. Som forklaring på stigningen af tapninger var det gennemsnitlige volumen af varmt vand pr. tapning faldet, hvor værdien for studiet blev fastlagt til 2,7 L/tapning, mens standardværdien var 41 L/tapning. Studiet dokumenterer derved markante ændringer i forbruget af varmt brugsvand sammenlignet med de gældende standardværdier fra 1990'erne; standardværdier der, ligesom studiet gør det, kan sættes spørgsmålstegn ved, idet de virker urealistiske og i høj grad bærer præg af manglende viden og dokumentation på området. En mulig forklaring er, at standardværdierne primært er udarbejdet for blot at have et standard tappeprofil at arbejde ud fra ved bygningsprojektering.

I perioden fra 2007 - 2008 blev et dansk studie gennemført, hvor målinger af varmt brugsvand for 40 lavenergibygninger i Lystrup blev foretaget [Brand et al., 2010]. Formålet med studiet var at undersøge, hvordan varmt brugsvandssystemer skal udformes i fremtiden, hvis temperatursættet for fjernvarmen ændres til 50/25. Varmt brugsvandssystemet bestod for 29 af boligerne af en varmeveksler, mens de resterende 11 boliger havde en varmtvandsbeholder til lagring af fjernvarme. Resultaterne for boligerne er ikke inkluderet i dette studie, men DTU har testet en prototype af varmeveksleren, der anvendes i Lystrup, under de samme betingelser. Studiet

tester tre forskellige systemopsætninger for varmeveksleren, hvoraf resultaterne viser, at alle tre løsninger kan opfylde krav til komforttemperaturer, men kun én løsning opfylder krav til ventetid på 10 sekunder. Selvom det er muligt at nedbringe ventetiden ved at isolere varmeveksleren, hvormed alle tre løsninger vil have potentiale, stilles der i studiet spørgsmåltegn ved "10 sekunders reglen"for ventetid. Dertil konkluderes det, at der ikke opstår hygiejneproblemer ift. legionella ved brug af en varmeveksler med fremløbstemperatur på 50°C, såfremt volumen af varmt brugsvand i systemet er under 3 L.

I forlængelse af ovennævnte studie præsenterede Bøhm [2012] i 2012 resultater fra målinger af varmt brugsvand for 13 lejlighedskomplekser i Danmark. Formålet var at dokumentere effektiviteten af de daværende varmt brugsvandssystemer for lejlighederne og ud fra resultaterne foreslå mere energieffektive og miljøvenlige løsninger. Studiet rettede også fokus på cirkulationstabet for varmt brugsvandsinstallationerne, da dette område kun i et begrænset omfang tidligere er blevet undersøgt. Resultaterne fra studier viste, at varmetabet udgjorde mellem 23 - 70% af det samlede energiforbrug. Studiet undersøgte efterfølgende forskellige løsninger med det formål at reducere cirkulationstabet. Her dokumenterede studiet, at nye cirkulationsrør (rør-i-rør og twin-pipes) kunne reducere varmetabet med op til 40% mens en lav returtemperatur på fjernvarmen også var af afgørende betydning. El-tracing blev også undersøgt, men blev ikke anset som værende en optimal løsning, idet denne medførte et højere elforbrug, og derved, grundet energifaktoren på 2,5 i energiberegninger i Danmark, ville have stor betydning for bygningens samlede energibehov. Energifaktoren for el i den frivillige Lavenergiklasse (tidl. Bygningsklasse 2020) er, grundet en stigende andel af elproduktion fra vedvarende energi-anlæg, reduceret til 1,9, hvorfor løsninger med el-tracing i nye bygninger kan have et større potentiale end tidligere.

Endeligt er resultater fra Danmarks Statistik, to SBi-rapporter samt resultater fra syv parcelhuse afrapporteret i en teknisk rapport fra 2011 [Jensen et al., 2011]. Jf. en SBi-rapport var varmtvandsforbruget i Danmark 46 L/pers./dag i 1996 mens det i en SBi-meddelelse fra 2000 blev anslået til 40 L/pers./dag. Ifølge Danmarks Statistik var det samlede vandforbrug for en husholdning i Danmark i 2005 130 L/pers./dag, hvor det blev antaget, at 30% gik til varmt brugsvand, svarende til 39 L/pers./dag varmt vand. Endeligt dokumenterede målinger af syv parcelhuse i 2010, at varmtvandsforbruget, alt efter antal personer i husstanden, varierede mellem 16 - 38 L/pers./dag og havde et gennemsnit på 27 L/pers./dag. Ligeledes fokuserede studiet også på varmtabet fra brugsvandsinstallationer, og jf. en SBi-rapport fra 2009 går op mod 50% af det samlede energiforbrug til tab fra rør og vandvarmere, mens det gennemsnitlige varmetab fra rør blev dokumenteret til 15 W/m, med en variation fra 5 - 30 W/m. Endeligt foretog studiet, ved en antagelse om 33% varmetab, tre beregninger af det årlige energiforbrug til varmt brugsvand for hhv. 2 og 5 personer ved tre forskellige varmtvandsforbrug, hvor resultaterne er vist i Tabel 1.1.

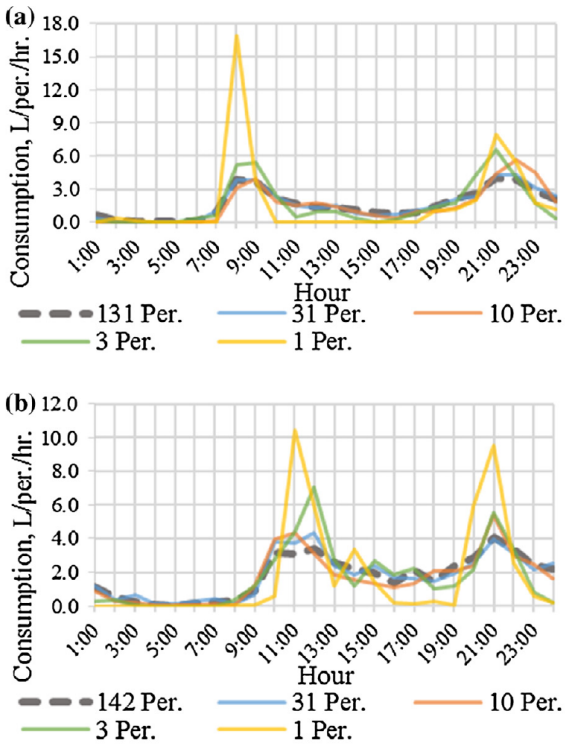
Tabel 1.1: Årligt energiforbrug til opvarmning af varmt brugsvand ved lav, mellem og højt forbrug for 2 og 5 personer.

Varmtvandsforbrug [L/pers./dag]	Årligt energiforbrug 2 pers. [kWh/år]	Årligt energiforbrug 5 pers. [kWh/år]
30	1.461	3.653
40	1.948	4.871
50	2.435	6.088

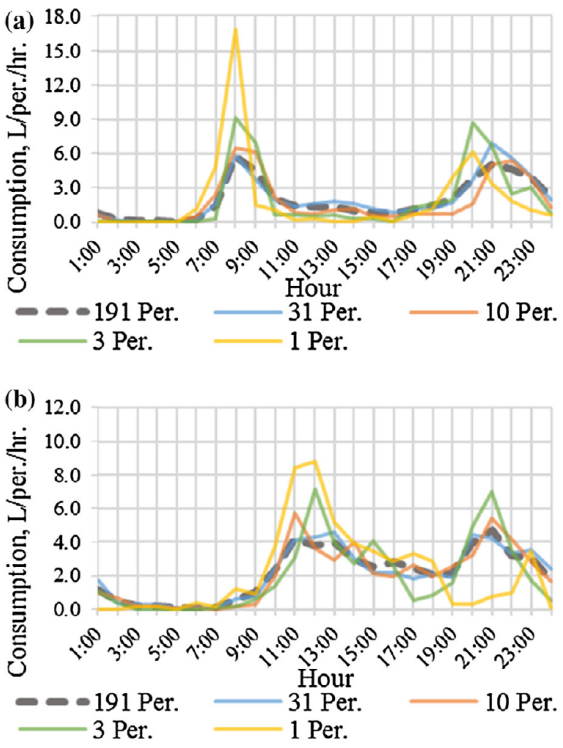
Som nævnt tidligere er det ikke kun i Danmark, at kendskabet til forbruget af varmt brugsvand

er begrænset, denne problematik gør sig gældende over hele verden. I et studie fra 2015 blev der foretaget målinger over to perioder af 182 lejligheder i Finland [Ahmed et al., 2015]. Den første måleperiode forløb fra januar 2012 til april 2013, hvor forbruget af varmt brugsvand blev undersøgt på månedsbasis mens den anden måleperiode forløb fra maj 2013 til juni 2014, hvor forbruget blev undersøgt på dagsbasis. Formålet med studiet var, i lighed med studiet af Bøhm [2012], at undersøge forbrugsprofiler, da disse er af betydning for både at kunne estimere energibehovet og designe brugsvandssystemer. Ud fra resultaterne blev der fastlagt et gennemsnitligt varmtvandsforbrug på 43 L/pers./dag, hvilket kun var 3 L fra værdien opgivet det finske bygningsreglement for lejligheder. Sammenlignet med standardværdierne for Danmark, Sverige og Norge var forbruget højere, da forbruget i disse lande var hhv. 40 L/pers./dag, 33 L/pers./dag og 40 L/pers./dag.

I 2016 foretog Ahmed et al. [2016] yderligere et studie i Finland, denne gang af 86 lejligheder. Her foregik måleperioden for forbruget af varmt brugsvand fra maj 2014 til februar 2015, hvor formålet var at undersøge forbrugsprofiler på timebasis for fem forskellige størrelsesgrupper, igen for efterfølgende at kunne estimere energibehovet. Resultaterne blev sammenlignet med det tidligere studie fra Ahmed et al. [2015]. På Figur 1.5 og Figur 1.6 er vist forbrugsprofiler for varmt brugsvand for hverdage og weekender for hhv. august og november måned.



Figur 1.5: Varmt brugsvandsprofiler for hverdage (a) og weekender (b) for fem forskellige størrelsesgrupper i august [Ahmed et al., 2016, Fig. 8].



Figur 1.6: Varmt brugsvandsprofiler for hverdage (a) og weekender (b) for fem forskellige størrelsesgrupper i november [Ahmed et al., 2016, Fig. 7].

Ud fra målingerne blev to peaks i hverdagene identificeret, et i perioden 07:00 - 09:00 og et mellem 20:00 - 22:00, og hvor aftenpeaket var størst. For weekender var morgenpeaket forskudt med 2 - 3 timer, mens aftenpeaket faldt i samme tidsrum. Gennemsnitsforbruget af varmt brugsvand pr. time i og udenfor peaks'ne blev fastlagt til hhv. 3,6 L/pers./time og 1,5 L/pers./time. Endeligt

blev det daglige gennemsnitsforbrug af varmt brugsvand for august, november og januar også fastlagt og værdierne sammenlignet med det tidligere studie fra 2015 (Ahmed et al. [2015]). Her blev der dokumenteret en maksimal variation på 6%, med variationer i hverdage og weekender på hhv. 2 - 7% og 3 - 7%.

Inden for de senere år er der foretaget flere studier omhandlende to fremtidige generationer af fjernvarme i Danmark, 4. generations fjernvarme kaldet lav temperatur fjernvarme (LTFJ) med en fremløbstemperatur under 55°C og 5. generations fjernvarme kaldet ultra lav temperatur fjernvarme (ULTFJ) med en fremløbstemperatur under 40°C. I et studie af Yang et al. [2016a] blev der foretaget målinger af et lejlighedskompleks, mens Yang et al. [2016b] foretog målinger af fem enfamiliehuse med fem forskellige opsætninger af brugsvandssystemer. Formålet med begge studier var at undersøge nye løsninger for LTFJ og ULTFJ, mens resultaterne også blev sammenlignet med den nuværende 3. generations fjernvarme med fremløb på 70°C. Yang et al. [2016a] konkluderede, at decentrale substationer med en fremløbstemperatur på 55°C (LTFJ) kan overholde krav ift. både komfort og hygiejne, mens varmetabet kan reduceres med op til 30% ift. den nuværende 3. generations fjernvarme. Yang et al. [2016b] konkluderede, at alle brugsvandssystemer i de fem enfamiliehuse, ved en fremløbstemperatur på 40°C (ULTFJ), kunne overholde krav til både komfort og hygiejne. Her var energiforbruget størst for brugsvandssystemerne med en varmtvandsbeholder, da denne har størst varmetab og samtidig kræver en højere setpunktstemperatur for den supplerende vandvarmer i systemet. Løsningerne med varmeveksler og supplerende el-boostere resulterede derimod i det laveste energiforbrug og etableringsomkostninger.

I et nyere studie fra 2017 gennemgår Fuentes et al. [2018] de meste prominente studier fra 1970'erne og opefter omhandlende varmt brugsvand, heriblandt databasen fra Becker og Stogsdill [1990]. Formålet med studiet er at gennemgå de tidligere studiers konklusioner, og sammenligne dem med gældende standarder for forskellige lande. Herved ønsker studiet at opsummere, hvilke forbrugsprofiler der er repræsentative den dag i dag for forskellige typer af bygninger og samtidig undersøge nutidens værktøjer til generering af nye forbrugsprofiler. Endeligt ønsker Fuentes et al. [2018] også at identificere, hvor vidensniveauet i forhold til varmt brugsvand stadig har sine begrænsninger og hvor der skal sættes ind i fremtiden. Studiet konkluderer, at de gældende tekniske standarder fortsat kan benyttes som retningslinjer for estimering af forbruget af varmt brugsvand. Hertil er det stadig usikkert, om brugen af mere realistiske forbrugsprofiler vil have afgørende indflydelse på nutidens analyser af ydeevnen for bygninger og energisystemer. Selvom mange studier analyserer tappeprofiler for forbruget af varmt brugsvand i boliger, er der fortsat et stort behov for at få en bedre forståelse af de faktorer, som har betydning for varmtvandsbehov, som f.eks. antallet af tapninger, tidspunktet og varigheden for alle tapning samt flowrater for tapninger i forskellige typer af bygninger.

Ovenfor er 11 forskellige studier, der alle omhandler varmt brugsvand, beskrevet. Studierne er gennemført indenfor de sidste 50 år, hvor der for størstedelen er foretaget målinger af varmt brugsvand i forskellige husstande. Målingerne er gennemført i forskellige lande på forskellige tidspunkter, hvorfor der er stor forskel på udførelsen af målingerne, det anvendte måleudstyr og opløsningen af dataene. Der kan ligeledes sættes spørgsmålstegn ved, hvor repræsentative dataene for flere af de ældre studier er i dag, da forbruget af varmt brugsvand, som det allerede er understreget tidligere, har ændret sig gennem årene. Derfor vil studierne i det følgende afsnit vurderes kritisk ud fra deres gyldighed i dag, mens der også kommenteres på kvaliteten af dataene. Ud fra dette kan der opnås en større forståelse for, hvad det nuværende vidensniveauet omkring

varmt brugsvand er i dag, og hvor der fortsat er brug for mere og/eller nyere data for derved at tilegne sig mere viden på området. På Figur 1.7 er vist en oversigt over de 11 studier, hvor de hver især er opsummeret gennem en kort beskrivelse af studiet og dets målinger.

Af oversigten på Figur 1.7 fremgår det, at kun ét af de 11 studier ikke indeholder nogle målinger men udelukkende simuleringer, mens de resterende 10 studier alle inkluderer data, enten fra egne målinger eller målinger foretaget af andre. De første målinger blev foretaget i USA i 1979, hvor forbruget af varmt brugsvand blev målt i 110 enfamiliehuse. Dataene blev opsamlet i 15 min. intervaller og gemt på magnetbånd. I årene efter blev der foretaget yderligere fire studier, hvor forbruget af varmt brugsvand blev målt for enfamiliehuse og lejlighedskomplekser i Canada og USA, igen ved at logge med 15 min. intervaller på magnetbånd. Herefter følger en lang periode, hvor der ingen målinger foretages, indtil Thomas et al. [2011] i perioden 2007 - 2008 gennemfører målinger af 74 husstande i Canada ved brug af flowmålere med en opløsning på 2 - 4 sek. Som Thomas et al. [2011] også nævner det i studiet, så er der ikke foretaget ændringer i de gældende Nordamerikanske Standarder siden 1990. I mellemtiden har både forbrug og måleudstyr ændret sig, hvilket også afspejler sig af de udførte målinger fra 2007 - 2008. Her dokumenterer dataene indsamlet ved en markant højere opløsning sammenlignet med tidligere væsentlige ændringer i forbruget af varmt brugsvand og forbrugsprofilerne.

Ingen af de 11 studier omhandler målinger af varmt brugsvand i Europa før 2000, hvorfor der ikke haves et kendskab til anvendte opløsninger på data før 2000. I oversigten fremgår det, at de ældste målinger er foretaget i 2000, her med en opløsning på 5 min. intervaller. Ikke alle studier angiver opløsningen på de udførte målinger, men for de studier der gør, er denne væsentligt lavere end 15 min., nogle helt ned på sekundbasis. Det indikerer derfor, at der også i Europa er sket en ændring i det anvendte måleudstyr fra 2000 og frem sammenlignet med tidligere.

Konklusionen er derfor den samme for både Amerika og Europa, hvor der er sket væsentlige ændringer i kvaliteten af dataene som følge af nyere måleudstyr med en højere opløsning. Derfor er det vigtigt at forholde sig kritisk til dataene fra 1970'erne og 1980'erne, hvor opløsningen kun var 15 min. Med så lav en opløsning vil det ikke være muligt at give et realistisk billede af et forbrugsprofil, da det ikke er muligt at fastlægge varigheden af de enkelte tapninger. Dette problem afspejler sig også i standarderne og forbrugsprofilerne fra den tid, hvor de afviger fra nyere data. Med en opløsning på 2 - 4 sek. vil både korte og lange tapninger derimod blive registreret med en afvigelse på kun få sekunder, og ved at anvende dette data til fremstilling af forbrugsprofiler kan der opnås mere realistiske profiler.

Studie	Beskrivelse	Varighed af målinger	Geografisk placering	Antal deltagere	Opløsning
Becker og Stogsdill [1990]	Resultater fra fem tidligere studier i Canada og USA sammenfattes til én database med mere end 30 mio. data.	Målinger for de fem studier foretages i perioden 1979 – 1987	(1) 110 enfamiliehuse i USA, (2) 55 boliger i Toronto og Ontario, (3) 142 boliger i Oregon, (4) 74 og 24 enfamiliehuse i hhv. Florida og North-Carolina, (5) fem lejlighedskomplekser i Toronto.	Samlet måles på 208 enfamiliehuse, 198 boliger og fem lejlighedskomplekse	(1) 15-min. intervaller ved brug af magnetbånd, (2) – (3) ikke angivet, (4) 15-min. intervaller ved brug af varmtvandsenergimåler (Btu), (5) 15-min. intervaller ved brug af magnetbånd.
Yao og Steemers [2005]	Udvikling af model til estimering af det daglige energiforbrug i boliger i Storbritannien, heriblandt energiforbrug til varmt brugsvand.	Ingen målinger gennemført. Studiet udarbejdes på baggrund af statistikker for energiforbruget.	Nøjagtig placering ikke angivet i studiet, kun at dette foretages i Storbritannien.	Statistikker baseret på Storbritannien, mens model testes på en bolig med tre personer.	Ingen målinger gennemført.
Thomas et al. [2011]	Måling af varmt brugsvand i husstande i Canada med det formål at undersøge, om der er sket markante ændringer siden 1970 – 1980'erne.	Målinger foretaget i perioden 2007 – 2008, hvor der måles i to-tre uger på hver husstand.	38 husstande i Ottawa-området og 36 husstande i Hamilton, London og Sudbury, Canada.	Samlet måles på 74 husstande.	Studiet anvendte billige data loggere samt nøjagtige flowmålere med en opløsning 0,25 – 0,5 Hz (2 – 4 sek.).
Brand et al. [2010]	Måling af varmt brugsvand i 40 lavenergibygninger i Lystrup med det formål at undersøge fremtidige brugsvandssystemer.	Målingerne stod på i perioden 2007 – 2008 for de 40 boliger.	29 af lavenergiboligerne i Lystrup er forsynet med en varmeveksler, mens de resterende 11 lavenergiboliger har en varmtvandsbeholder.	Samlet måles på 40 lavenergiboliger.	Det anvendte udstyr fra Teknologisk Institut ikke opgivet, men der forekommer mindst ét datapunkt per sek.
Bøhm [2012]	13 lejlighedskomplekse indgår i et studie omhandlende varmt brugsvand. Formålet er at dokumentere effektiviteten af de nuværende brugsvandssystemer.	Målingerne af lejlighedskomplekserne er foretaget i perioden 2000 – 2008.	13 lejlighedskomplekse beliggende i Danmark.	De 13 lejlighedskomplekse består samlet set af 1370 lejligheder.	Måleudstyret lagrer 5-min. værdier for forbruget af varmt brugsvand.
Jensen et al. [2011]	Teknisk rapport der dokumenterer statistikker og målinger af varmtvandsforbruget i danske husstande.	Statistikker fra 1996, 2000 og 2005 samt målinger gennemført i 2010.	Statistikker foretaget over alle husstande i Danmark. Målinger foretaget på syv parcelhuse beliggende i Danmark.	Samlet måles på syv parcelhuse i Danmark.	Opløsningen for målingerne er ikke angivet i studiet.
Ahmed et al. [2015]	Der måles på 182 lejligheder i Finland over to perioder, hvor formålet er at undersøge forbrugsprofiler og fastlægge energibehovet.	Målingerne er gennemført over to perioder, januar 2012 – april 2013 (månedsbasis) og maj 2013 – juni 2014 på dagsbasis.	Målingerne foretages på fire lejlighedskomplekse i Tampere, Finland.	Samlet måles på 182 lejligheder med i alt 379 beboere.	Opløsningen for målingerne er ikke angivet i studiet.
Ahmed et al. [2016]	I forlængelse af studiet fra 2015 måles nu på yderligere 86 lejligheder i Finland. Formålet er at undersøge forbrugsprofiler for at kunne fastlægge energibehovet.	Målingerne er gennemført fra maj 2014 – februar 2015 på timebasis.	Målingerne foretages i ét lejlighedskompleks i Helsinki, Finland.	Samlet måles på 86 lejligheder med i alt 191 beboere.	Der måles på timeværdier. Måleudstyret anses for værende nøjagtigt og logger data med en opløsning på 1L.
Yang et al. [2016a]	Der foretages målinger af ét lejlighedskompleks i Danmark, hvor formålet er at undersøge potentialet for Lav Temperatur Fjernvarme (LTFJ) ved brug af decentrale substationer.	Målingerne er gennemført i 2014.	Målingerne foretages i ét lejlighedskompleks i Danmark.	Samlet måles på ét lejlighedskompleks bestående af 12 lejligheder på hver 110m^2.	Der logges data med et interval på 30 min. Opløsningen af dataene er ikke angivet i studiet.
Yang et al. [2016b]	Der måles på fem enfamiliehuse i Danmark med fem forskellige brugsvandssystemer, alle suppleret med Ultra Lav Temperatur Fjernvarme (ULTFJ). Formålet er at undersøge effektiviteten af systemerne.	Målingerne er gennemført i maj 2015.	Målingerne foretages i fem enfamiliehuse beliggende i Jylland, Danmark.	Samlet måles på fem enfamiliehuse.	I studiet anvendes flowmålere til at logge forbrug af fjernvarme, hvor der logges med et tidsstep på 1,5 min.
Fuentes et al. [2018]	Studiet gennemgår en række af de mest prominente studier fra 1970'erne og frem til 2017 omhandlende varmt brugsvand. Formålet er at gennemgå de tidligere studiers konklusioner og opsummere, hvor videnniveauet for varmt brugsvand er i dag og hvor der skal sættes ind i fremtiden.	Studiet gennemgår målinger og standarder fra 1970'erne og frem til 2017.	Målingerne og standarder præsenteres for både Afrika, Amerika, Asien, Australien og Europa.	Ikke angivet i studiet.	Studiet præsenterer opløsningen for en række studier og kommenter dertil på, at denne har stor indflydelse på kvaliteten af dataene og derved hvor brugbare de er.

Figur 1.7: Oversigt over de 11 studier med en beskrivelse af de udførte målinger.

Problembeskrivelse 2

Som litteraturgennemgangen i Afsnit 1 indikerede, er der fortsat et behov for en nærmere undersøgelse af varmtvandsforbruget i Danmark. Gennem de seneste årtier har strengere krav til særligt rumopvarmning og elektricitet resulteret i, at boligers samlede energiforbrug er faldende, imens kravene til varmt brugsvand fortsat er uændret. For fremtidigt byggeri betyder det, at varmt brugsvand tenderer til at udgøre en større og større del af den samlede energiramme, såfremt kravene ikke skærpes. En dybdegående undersøgelse af danskernes varmtvandsforbrug er derfor en nødvendighed for at tilegne et større kendskab til området og derved kunne validere potentialet i at skærpe kravene iht. Bygningsreglementet [2018].

Udover varmtvandsforbruget indikerede litteraturgennemgangen også, at der fortsat er manglende dokumentation af brugsvandssystemers effektivitet og energiforbrug. Med henblik på at reducere energiforbruget til varmt brugsvand ved fremtidigt byggeri bør en nærmere undersøgelse af hele brugsvandssystemet og dets effektivitet derfor foretages. Hertil skal det undersøges, hvor i brugsvandssystemerne de største tab forekommer, og hvor der dermed er størst potentiale for energibesparelser.

Til validering af standardværdierne benyttet ved nutidige energiberegninger skal flere og mere detaljerede målinger af danskernes varmtvandsforbrug og energiforbrug til produktion af varmt brugsvand foretages. Såfremt kravene til varmt brugsvand på sigt skal skærpes, er sådanne målinger et vigtigt skridt på vejen, idet potentialet for eventuelle energibesparelser skal dokumenteres.

Problemformulering

På baggrund af litteraturgennemgangen og ovenstående beskrivelse har dette projekt til formål at besvare følgende tre overordnede spørgsmål:

- *Hvordan stemmer standardværdien fra Bygningsreglementet [2018] på 250 L/m^2 år overens med varmtvandsforbruget målt i tre danske parcelhuse, og hvordan bør varmtvandsforbruget dokumenteres?*
- *Hvilke tapsteder er mest kritiske ift. produktionen af varmt brugsvand, og hvor i brugsvandssystemerne er der størst potentiale for at opnå energibesparelser?*
- *Hvordan kan energiforbruget til varmt brugsvand reduceres på sigt, og hvilken betydning har det for energirammen?*

Metode og afgrænsning

Til besvarelse af ovenstående problemformulering er der gennem projektperioden foretaget målinger af vandforbruget i tre parcelhuse. I projektet afgrænses der, i modsætning til flere

tidligere studier, til kun at undersøge varmtvands- og energiforbruget for parcelhuse i Danmark. Det betyder, at resultater efterfølgende kun kan sammenholdes med enkelte af de tidligere beskrevne studier og at der kun fokuseres på standardværdierne gældende for boliger iht. Bygningsreglementet [2018].

Gennem kalibrering er målenøjagtigheden af det anvendte måleudstyr dokumenteret og herudover er der foretaget en kvalitetssikring af målingerne med henblik på at validere og klargøre målinger til den videre databehandling. For to af de tre boliger er foretaget en dybdegående analyse af boligernes overordnede vandforbrug samt fordelingen til hhv. koldt og varmt vand for de enkelte tapsteder. Hertil er der for de to boliger foretaget en nærmere analyse af de enkelte tapsteder, hvor rørlængder, ventetider, vandspild og energiforbrug er fastlagt. For den sidste bolig er målingerne kun benyttet til at dokumentere varmtvandsforbruget og energiforbruget i teknikrummet, idet der ikke blev målt ved tapsteder. For alle tre boliger er målingerne også benyttet til at undersøge energiforbruget samt hvor i de tre brugsvandssystemerne, de største energitab forekommer.

Energiforbruget i den første af de tre boliger beregnes på baggrund af målinger i både teknikrum og ved tapsteder, hvorfor energiforbruget er dokumenteret fra primærsiden af veksleren og ud til de enkelte tapsteder. For den anden bolig er målinger via et BMS-system med 5 minutters intervaller benyttet til dokumentation af energiforbruget for brugsvandssystemets sekundærside, og dette sammenholdes med energiforbruget fastlagt på baggrund af målinger ved tapstederne. For denne bolig er der derfor ikke foretaget en analyse af energiforbruget fra primær- til sekundærsiden af brugsvandssystemet. Energiforbruget for den sidste af de tre boliger er dokumenteret fra primær- til sekundærsiden henover brugsvandssystemets varmeveksler gennem målinger foretaget i teknikrummet. Selvom brugsvandssystemet for den sidste bolig er forsynet med cirkulation er dette ikke medtaget i beregningerne for energiforbruget.

I tillæg til målingerne i de tre parcelhuse er der gennemført en række forsøg i laboratoriet på Thomas Manns Vej i Aalborg på en brusekabine med to forskellige varmegenvindingssystemer. Formålet med forsøgene er at dokumentere effektiviteten af varmegenvindingssystemerne og derved undersøge potentialet for at reducere energiforbruget ved bade. Sammen med resultater for varmtvandsforbruget er effektiviteten af varmegenvindingssystemerne benyttet i en energibergning for ét af de tre parcelhuse til at dokumentere ændringerens betydning for den samlede energiramme.

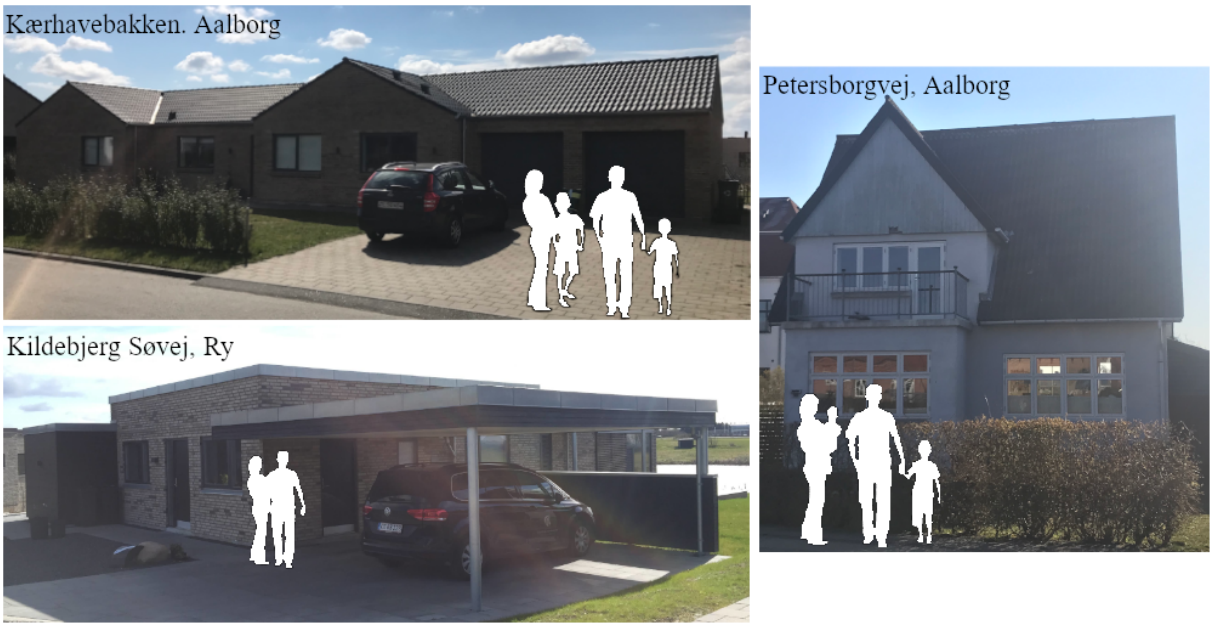
Del II

Casebeskrivelse

Boligpræsentation 3

Til besvarelse af problembeskrivelsen, præsenteret i Kapitel 2, er der gennem projektperioden foretaget målinger i tre forskellige parcelhuse. Formålet med dette kapitel er at præsentere og redegøre for, hvordan måleudstyret var installeret i de tre boliger. Boligpræsentationen danner grundlag for den videre beskrivelse af måleudstyret anvendt gennem projektperioden samt kvalitetssikringen af målingerne, der følger i de kommende kapitler.

Gennem projektperioden blev der foretaget målinger i to nyere parcelhuse, begge i et plan men med forskellige lokation og antal af beboere. Det første parcelhus, hvor målinger blev foretaget, er beliggende på Kærhavebakken i Aalborg og huser til daglig en familie bestående af fire personer, et forældrepar med deres to børn. Det andet parcelhus, som er det nyeste af de tre boliger, er beliggende på Kildebjerg Søvej i Ry og huser et par. Den sidste af de tre boliger er et ældre parcelhus i to plan beliggende på Petersborgvej i Aalborg og huser, ligesom boligen på Kærhavebakken, en familie på fire, et forældre par og deres to børn. På Figur 3.1 er vist et billede af hver af de tre boliger benyttet til målinger gennem projektperioden, mens generel information om boligerne er listet i Tabel 3.1.



Figur 3.1: Facadebilleder af de tre boliger benyttet til målinger gennem projektperioden.

Af Tabel 3.1 fremgår det, at parcelhusene beliggende på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej blev opført iht. to forskellige bygningsreglementer, mens der for boligen på Petersborgvej ikke foreligger information om, hvilket bygningsreglement der var gældende ved opførelsen. Boligen på Kærhavebakken overholder kravene jf. Bygningsreglementet [2010], hvortil klimaskærmen

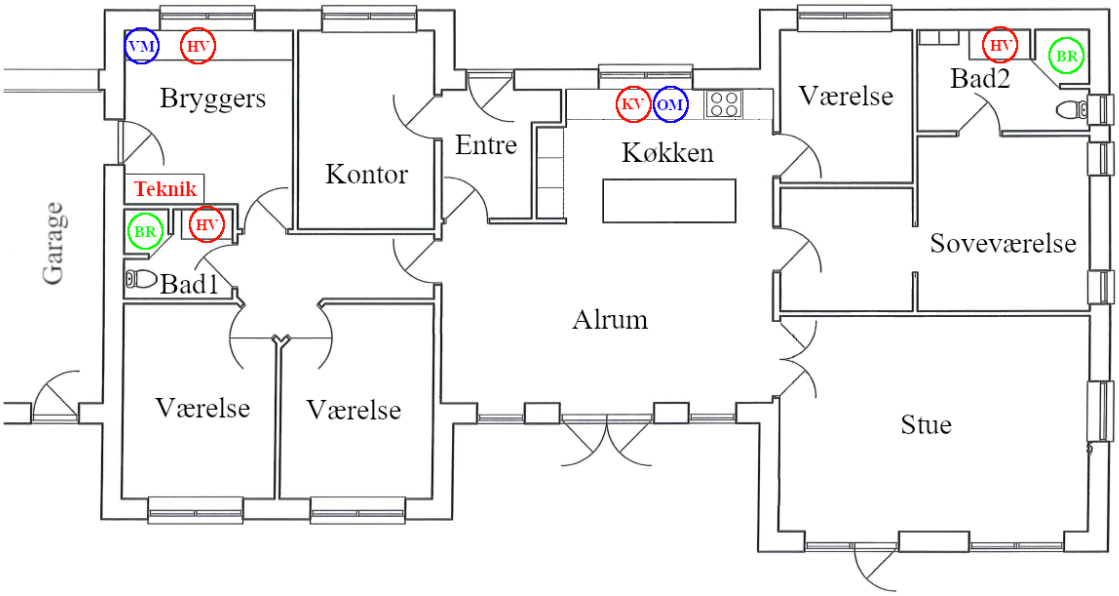
Tabel 3.1: Generel information om de tre boliger benyttet til målinger gennem projektperioden. *Klimaskærm opført med KL2015 isolering.

	Grundareal	Opførelse	Antal personer	Gældende bygningsreglement v. opførelse
Kærhavebakken	195 m^2	2013	4	BR10*
Kildebjerg Søvej	160 m^2	2017	2	BR15 (BK20)
Petersborgvej	127 m^2	1921	4	-

er opført med KL2015 isolering og boligen på Kildebjerg Søvej overholder kravene jf. Bygningsreglementet [2015] og Bygningsklasse 2020. Boligen på Petersborgvej er renoveret løbende gennem de seneste år, hvorfor andre bestemmelser har været gældende end ved opførelsen i 1921, hvor bygninger blev opført iht. Byggeloven og ikke Bygningsreglementet, som tilfældet er det i dag. Som beskrevet i Kapitel 1 er der sket en udvikling i energirammen gennem de senere år, mens kravene for varmt brugsvand fortsat er uændrede, se Figur 1.3 på side 5. Det betyder, at selvom boligerne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej blev opført iht. to forskellige bygningsreglementer, er den årlige standardværdi på 250 L/m^2 for varmtvandsforbruget gældende for begge boliger. I den fremadrettede analyse vil denne årlige standardværdi fra Bygningsreglementet [2018] blive benyttet i alle tre boliger til dokumentation og sammenligning af varmtvandsforbruget. Ved fastlæggelsen af varmtvandsforbruget i de tre boliger blev der gennem projektperioden installeret målere forskellige steder i boligerne, hvilket der redegøres for separat i de følgende afsnit.

3.1 Kærhavebakken, Aalborg

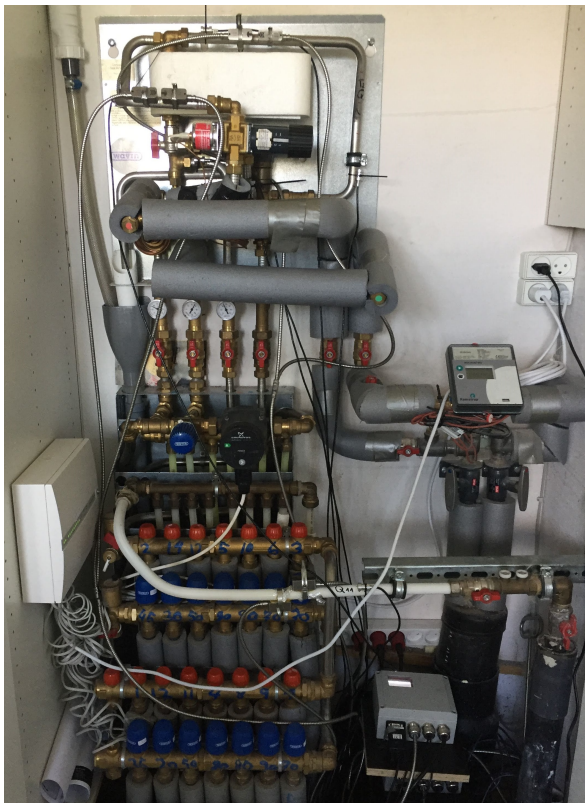
For boligen på Kærhavebakken blev målinger af vandforbruget foretaget både i teknikrummet og ved de enkelte tapsteder henover en måleperiode fra d. 10/09-2018 til d. 22/10-2018. Plantegningen på Figur 3.2 angiver, hvor målinger ved tapsteder blev foretaget samt teknikrummets placering.



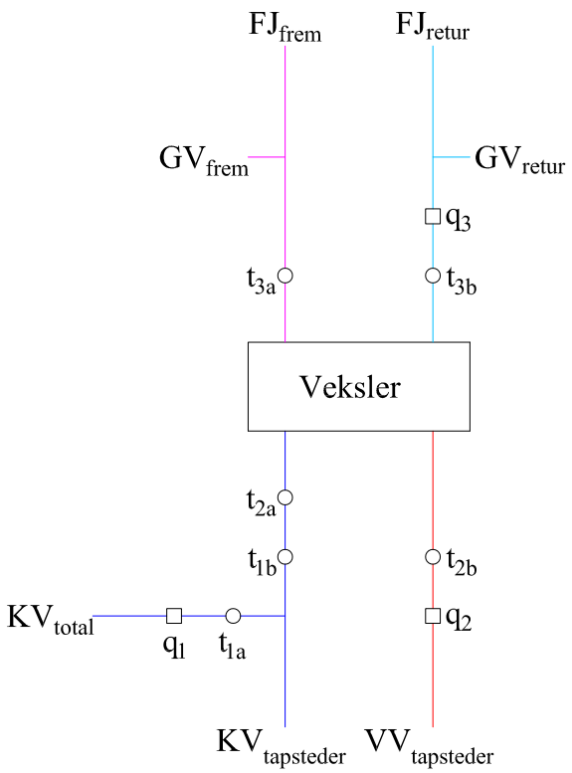
Figur 3.2: Plantegning over Kærhavebakken med angivelse af, hvor målinger er foretaget. Blå angiver KV-målinger, rød angiver KV- og VV-målinger og grøn angiver mix-målinger.

Af Figur 3.2 fremgår det, at der ved Kærhavebakken blev målt på alle tapsteder i boligen, med undtagelse af toiletterne på de to badeværelser. Af praktiske årsager blev vandforbruget for bruserne på de to badeværelset målt efter blandingsbatteriet, hvorfor det var blandingen af koldt og varmt vand der blev målt. Idet vaskemaskinen og opvaskemaskinen kun er tilsluttet koldt vand, blev der kun målt på koldtvandsledningen ved disse tapsteder, mens der blev målt på både koldt- og varmtvandsledningen ved resterende tapsteder. Idet der blev foretaget målinger af både flow og temperatur ved de enkelte tapsteder, vil disse målinger blive benyttet til fremadrettet analyse af både vandforbrug og energiforbrug ved tapsteder for Kærhavebakken.

Udover målinger ved de enkelte tapsteder blev der, som beskrevet tidligere, også målt på vandforbruget i teknikrummet. Ved at måle i både teknikrummet og ved tapstederne er det muligt at sammenholde målinger og herved kontrollere, om vandforbruget stemmer overens. Herudover muliggør målingerne også en analyse af energiforbruget fra varmevekslerens primærside og helt ud til de enkelte tapsteder. På Figur 3.3 er teknikrummet vist, mens en principskitse af vekslerens opbygning og hvor målingerne blev foretaget fremgår af Figur 3.4.



Figur 3.3: Teknikrum, Kærhavebakken.

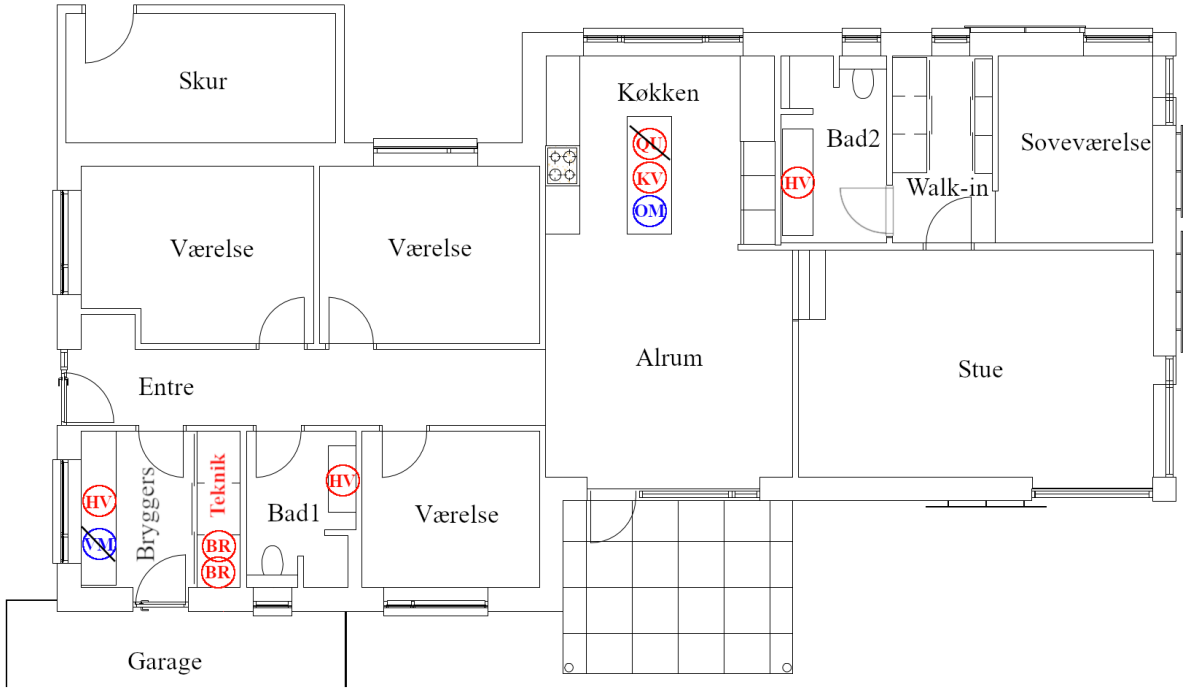


Figur 3.4: Principskitse af veksleropbygning.

Som det fremgår af Figur 3.4 blev flowet målt tre steder i teknikrummet; det totale koldtvandsflow, q_1, varmtvandsflowet, q_2 og fjernvarmeflowet, q_3. For hvert af de tre flows blev et temperatursæt, t_a og t_b, også målt, med henblik på fremadrettet at kunne dokumentere energiforbruget i brugsvandssystemet. Årsagen til at temperaturen blev målt to steder på koldtvandsledningen for vandet ind i veksleren, t_{1b} og t_{2a}, skyldes ledning og konvektion fra veksleren, der gjorde at temperaturen steg jo tættere på veksleren, der blev målt. Målingerne foretaget i teknikrummet benyttes fremadrettet til analyse af vandforbrug og energiforbrug for både primær- og sekundærsiden af brugsvandssystemet ved Kærhavebakken.

3.2 Kildebjerg Søvej, Ry

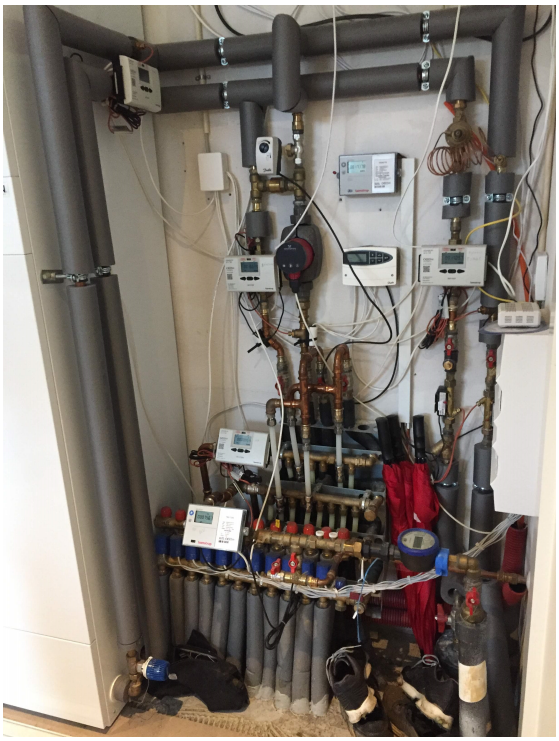
Ligesom for Kærhavebakken blev der for boligen på Kildebjerg Søvej også foretaget målinger ved tapsteder men i en anden måleperiode fra d. 29/03-2019 til d. 25/04-2019. Boligen på Kildebjerg Søvej indgår som en del af et forskningsprojekt, hvorfor der i teknikrummet er installeret en række energimålere, hvorfor der ikke her blev foretaget supplerende målinger i teknikrummet. På plantegningen vist på Figur 3.5 er angivet, hvor målinger ved tapsteder blev foretaget samt teknikrummets placering.



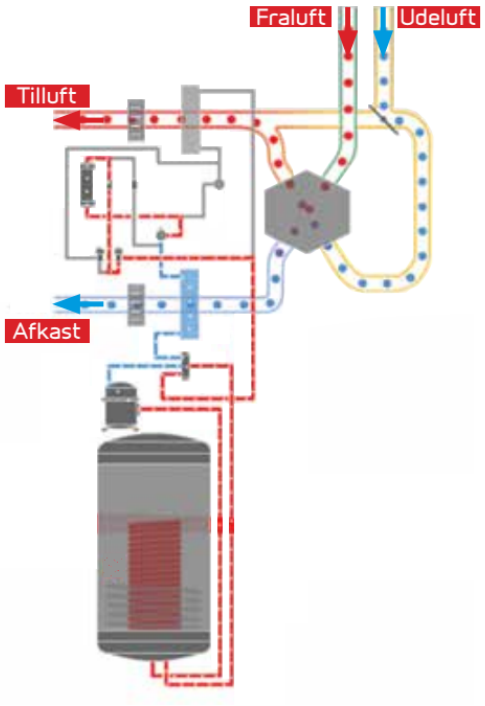
Figur 3.5: Plantegning over Kildebjerg Søvej med angivelse af, hvor målinger er foretaget. Blå angiver KV-målinger og rød angiver KV- og VV-målinger.

Af Figur 3.5 fremgår det, at der for boligen på Kildebjerg Søvej ikke blev målt på vaskemaskinen, quookeren og toiletterne på de to badeværelser. Hertil skal det bemærkes, at målingerne for bruserne blev foretaget i teknikrummet og ikke ved selve tapstedet på de to badeværelser. Med undtagelse af opvaskemaskinen, hvor der kun blev målt på koldtvandsledningen, blev der for alle resterende tapsteder målt flow og temperatur på både koldt- og varmtvandsledninger. Ligesom for Kærhavebakken vil målingerne fra tapstederne benyttes til analyse af både vandforbrug og energiforbrug for tapstederne på Kildebjerg Søvej.

Selvom der ikke blev foretaget supplerende målinger i teknikrummet ved Kildebjerg Søvej, blev data logget gennem de allerede installerede energimålere og overført til BMS-systemet henover måleperioden med 5 minutters intervaller. I modsætning til Kærhavebakken, hvor det varme brugsvand produceres gennem varmeveksleren ved brug af fjernvarme, er brugsvandssystemet for Kildebjerg Søvej anderledes. Her benyttes i stedet en Nilan Compact P enhed, der både fungerer som ventilationsanlæg for boligen og samtidig producerer varmt brugsvand gennem en indbygget varmepumpe, hvor vandet opbevares i en tilhørende varmtvandsbeholder. På Figur 3.6 er teknikrummet med installerede energimålere vist, mens en principskitse af Nilan-enheden til ventilation og produktion af varmt brugsvand fremgår af Figur 3.7.



Figur 3.6: Teknikrum, Kildebjerg Søvej.



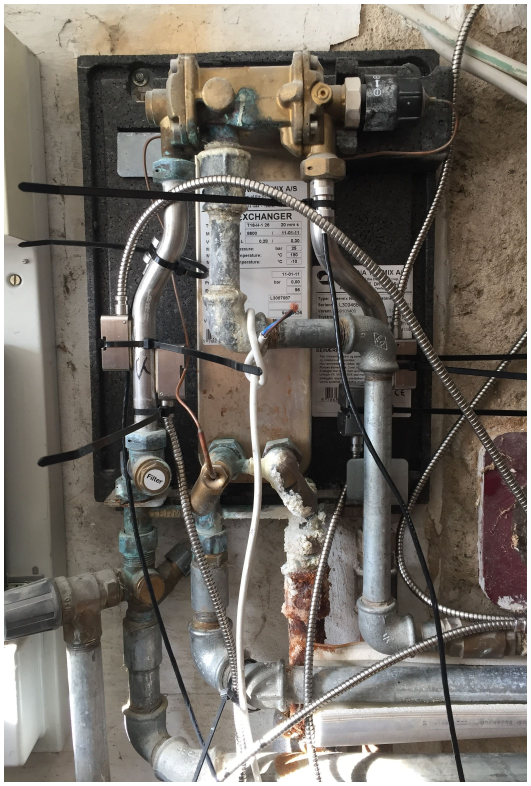
Figur 3.7: Nilan Compact P enhed til ventilation og produktion af varmt brugsvand.

På Figur 3.6 fremgår sekundærsiden af brugsvandssystemet, hvor de installerede energimålere sidder placeret på gulvvarme-, fjernvarme- og brugsvandsledninger. For alle energimålerne blev der gennem måleperioden logget værdier for forbrug, flow og temperatur, med 5 minutters intervaller, hvilke blev registreret via boligens BMS-system. Disse målinger benyttes fremadrettet til analyse af sekundærsiden af brugsvandssystemet og til sammenligning med målingerne foretaget ved tapstederne. Længst til venstre på billedet ses Nilan Compact enheden, der benyttes til ventilation og produktion af brugsvand placeret, hvor principskitsen på Figur 3.7 illustrerer, hvordan enheden er opbygget. Nilan Compact enheden, der benyttes til ventilation af boligen, genvinder energien fra udsugningsluften gennem modstrømsveksleren, der er kombineret med en varmepumpe. Varmepumpen benyttes til produktion af varmt brugsvand gennem spiralen placeret i varmtvandsbeholderen og bidrager samtidig til opvarmning af tilluften ved varmebehov. Ved kølebehov om sommeren har varmepumpen en reversibel kølekreds, der gør, at tilluften i stedet køles, samtidig med at der fortsat produceres varmt brugsvand. I tilfælde af at varmepumpen ikke yder tilstrækkeligt ift. produktion af varmt brugsvand, benyttes i stedet den anden spiral i beholderens bund, tilsluttet fjernvarmen. For Nilan Compact enheden blev ingen målinger foretaget gennem måleperioden, hvorfor der ikke fremadrettet fokuseres på denne del af brugsvandssystemet for Kildebjerg Søvej.

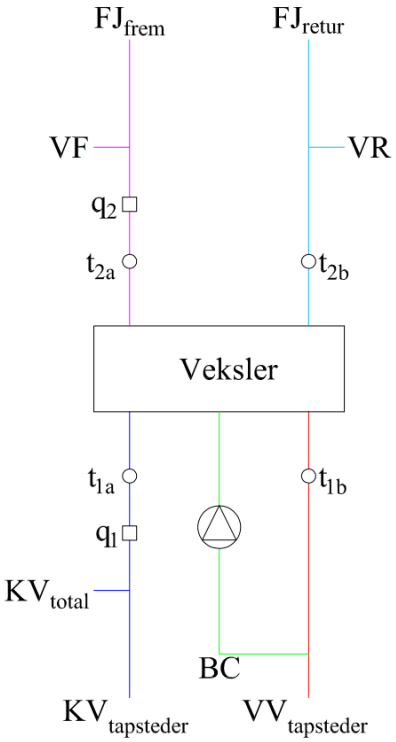
3.3 Petersborgvej, Aalborg

I modsætning til de to forrige boliger blev der for boligen på Petersborgvej kun foretaget målinger i teknikrummet henover en måleperiode fra d. 06/04-2019 til d. 16/04-2019. Da der kun blev målt i teknikrummet for denne bolig, benyttes målinger kun til at dokumentere det overordnede

varmtvandsforbrug og til en nærmere analyse af varmevekslerens effektivitet. Ulempen ved kun at måle i teknikrummet er, at der ikke haves et sammenligningsgrundlag med målinger foretaget på tapstederne. Derfor er det heller ikke muligt at dokumentere, hvilke tapsteder der benyttes. Veksleropbygningen for Petersborgvej er vist på Figur 3.8, mens en principskitse af veksleren og hvor målinger blev foretaget fremgår af Figur 3.9.



Figur 3.8: Varmeveksler, Petersborgvej.



Figur 3.9: Principskitse af veksleropbygning.

Af Figur 3.3 fremgår det, at veksleren på Petersborgvej er af ældre dato og særligt fjernvarmeledningen ind i veksleren og cirkulationsledningen er præget af rust, grundet en utæthed i toppen af veksleren. Af principskitsen på Figur 3.4 for veksleren fremgår det, at der blev foretaget målinger af koldtvandsflowet ind i veksleren, q_1, og af fjernvarmeflowet, q_2. Hertil blev et temperatursæt, t_a og t_b, målt for hvert af flows'ne med henblik på at dokumentere energiforbruget i brugsvandssystemet. Grundet cirkulationen blev målingerne af flowet på sekundærsiden foretaget på koldtvandsledningen i stedet for varmtvandsledningen, idet formålet med analysen ikke var at dokumentere cirkulationens betydning for systemet. Idet cirkulationen ikke undersøges for brugsvandssystemet, vil flowet, q_1 i fremadrettet analyse blive behandlet som varmtvandsflowet ud til tapstederne, når tapninger finder sted. Målingerne foretaget i teknikrummet på Petersborgvej benyttes fremadrettet til dokumentation af varmtvandsforbruget samt analyse af energiforbruget på varmevekslerens primær- og sekundærside.

Måleudstyr 4

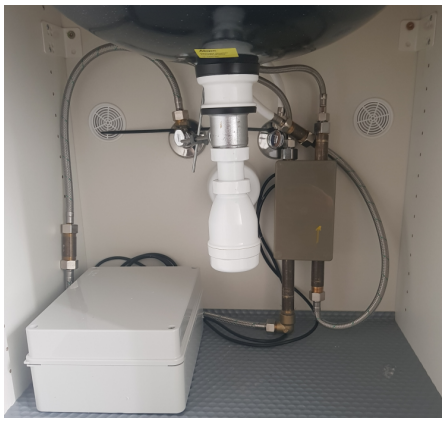
I forlængelse af boligpræsentationerne i Kapitel 3 redegøres i dette kapitel for måleudstyret anvendt under projektet. I de følgende afsnit beskrives de to typer af måleudstyr, der er benyttet til måling af flow og temperatur af både brugsvand og fjernvarme. Formålet med kapitlet er at undersøge og dokumentere målenøjagtigheden af det anvendte måleudstyr, således usikkerheden på det behandlede data minimeres. I hvert afsnit redegøres der for kalibreringen af måleudstyret samt usikkerheder ved brugen af det valgte måleudstyr.

4.1 Flowmålere

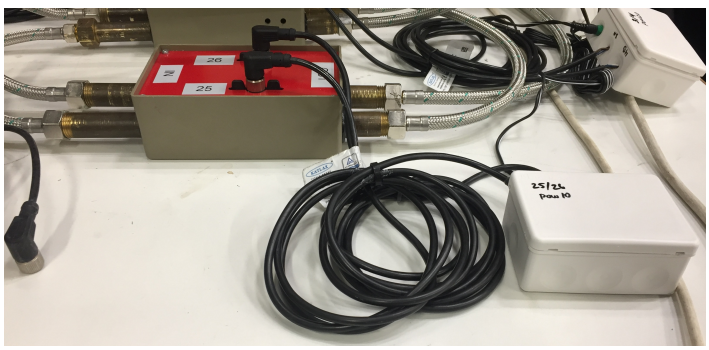
Til måling af hhv. koldt og varmt brugsvand er Huba-flowmålere af typen *Flow Sensor Type 236* anvendt ved tapsteder. Denne type flowmåler placeres så tæt på tapstedet som muligt og er gennem projektet benyttet til undersøgelse af vand- og energiforbrug for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej. Flowmålerne er sammensat i sæt af to-og-to, således der måles flow og temperatur af både koldt og varmt brugsvand ved hvert tapsted.

4.1.1 Flow Sensor Type 236

Den angivne type flowmåler virker ved at måle internt i vandrør, hvorfor flowmålerne skal installeres som en del af brugsvandssystemet. Når flowmålerne er installeret i brugsvandssystemet måles et spædningsoutput for hhv. flow og temperatur, der gennem producentens anvisninger kan omregnes til SI-enheder. Data indsamlet ved brug af flowmålerne har en opløsning på 8 Hz, hvorfor denne er højere end alle de tidligere beskrevne studier i litteraturgennemgangen, se Figur 1.7 på side 12. På Figur 4.1 og Figur 4.2 fremgår eksempler på, hvordan et sæt af flowmålere er installereret i brugsvandssystemet på hhv. Kærhavebakken og i laboratoriet.



Figur 4.1: Flowmåler installeret på Kærhavebakken.



Figur 4.2: Flowmålere installeret i laboratoriet.

Som det fremgår af Figur 4.2, er hver enkelt flowmåler tilkoblet en lille hvid boks, hvori der sidder et board, kaldet en Arduino, som registrerer spændingsoutputtet for både flow og temperatur og logger det på en online server. For at registre et spændingsoutput skal flowmålerne tilkobles strøm, enten ved brug af et batteri eller en 12 V strømforsyning. Når spændingsoutputtet er registreret, foretages en omregning til SI-enheder iht. producentens anvisninger angivet i produktkataloget.

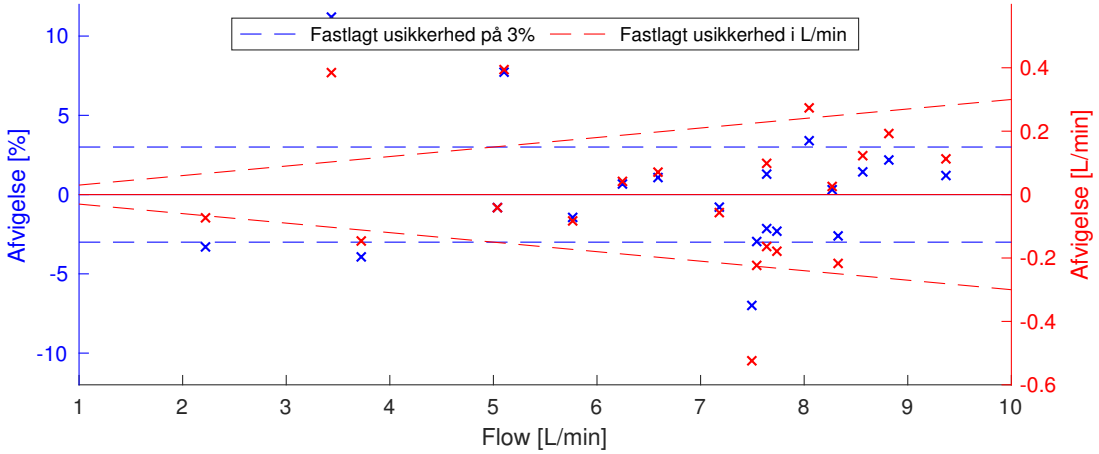
4.1.2 Kalibrering og usikkerhed af flowmålere

Idet måleudstyret ikke bevarer sin målenøjagtighed over tid, er der foretaget en kalibrering af alle flowmålere for at fastlægge målenøjagtigheden. Hertil er en ny kalibreringsformel fastlagt for hver enkelt flowmåler, der i stedet for producentens anvisninger benyttes til omregning af spændingsoutputtet, hvorved der tages højde for målenøjagtigheden. Selvom de mest nøjagtige resultater fås ved at foretage en kalibrering både før og efter at målingerne er foretaget, for derved at tage højde for eventuelle fejl opstået på måleudstyret under måleperioden, har dette af praktiske årsager ikke været muligt. Derfor er flowmålerne kun kalibreret en gang midtvejs i projektperioden.

Til kalibreringen af flowmålerne kobles de alle i serie og spændingsoutputtet for både flow og temperatur logges vha. Arduinoerne. De målte spændingsoutput sammenholdes med et reference flow og en reference temperatur, og ud fra dette genereres regressioner, der benyttes til at fastlægge nye kalibreringsformler for hver enkelt flowmåler. Efter kaliberingen er usikkerheden fastlagt på måleudstyret, da denne også er af betydning ift. kvaliteten på de målte data. Der henvises til Appendiks A for en detaljeret beskrivelse af fremgangsmåden og databehandlingen for kalibreringen samt en oversigt over de fastlagte kalibreringsformler for både flow og temperaturer.

Flowmålinger

Usikkerheden på flowmålinger fastlægges for alle flowmålere ved at sammenholde afvigelsen mellem værdier fastlagt ud fra en gennemsnitsregression og det sande flow og herved fastlægges en gennemsnitsværdi for usikkerheden af flowmålingerne. Denne usikkerhed giver en indikation på, hvor nøjagtige resultaterne fra flowmålerne er og dermed et mål for kvaliteten af de målte data. På Figur 4.3 er afvigelsen mellem det beregnede flow ift. det sande flow vist. Idet producenten ikke har angivet nogen usikkerhed på flowmålinger, kan der ikke sammenholdes med denne, hvorfor den fastlagte usikkerhed i stedet er indtegnet i både [%] og [L/min].

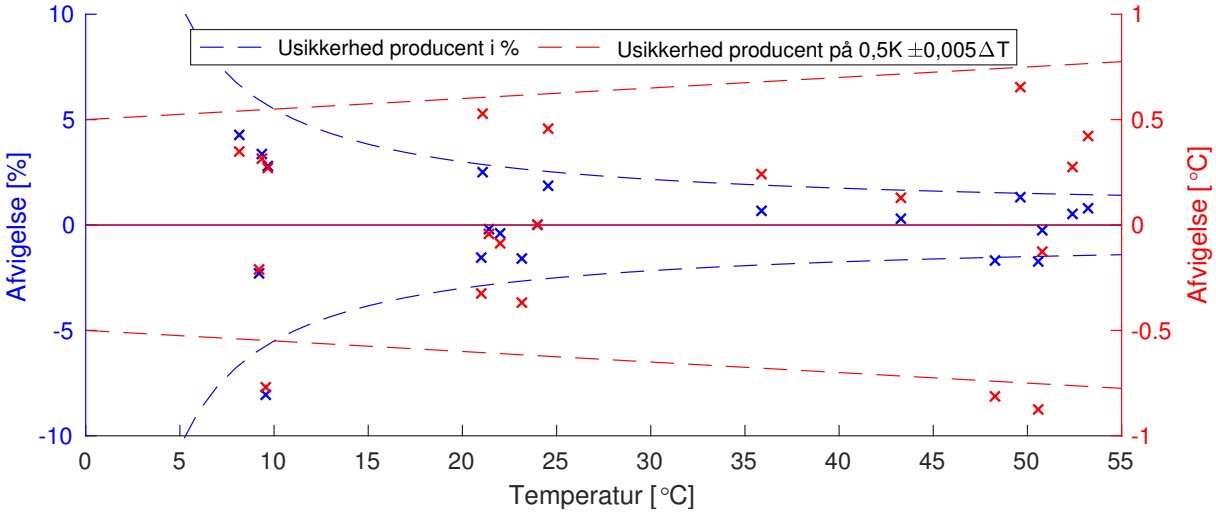


Figur 4.3: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle flowmålere og det sande flow.

Resultaterne på Figur 4.3 viser, at størstedelen af alle målingerne afviger med maksimalt ±0,2 L/min ift. det sande flow, og at regressionsværdierne både ligger for højt og for lavt ift. det sande flow. Undersøges resultaterne nærmere for forskellige størrelser af flows, er der ingen indikation på særlige tendenser for flowmålerne, idet der forekommer både store og små afvigelser over hele måleområdet. I gennemsnit afviger regressionsværdierne med ±3% ift. det sande flow, mens den største forskel er på 11% for et flow på 3,5 L/min. Idet producenten ikke selv har oplyst nogen usikkerhed på flowmålinger, er det ikke muligt at konkludere, om usikkerheden ligger inden for en acceptabel grænse eller ej. Konklusionen er derfor, at der er en usikkerhed på ±3% for resultaterne af flowmålinger indsamlet ved brug af Huba Flow Sensor Type 236 flowmålerne.

Temperaturmålinger

Usikkerheden på temperaturmålinger for Huba-flowmålerne undersøges på samme måde, som for flowmålinger, hvor værdier fastlagt ud fra gennemsnitsregressionen, der sammenholdes med de sande værdier for temperaturen. På Figur 4.4 er afvigelsen mellem den beregnede temperatur fra gennemsnitsregressionen og den sande temperatur indtegnet således en gennemsnitlig værdi for usikkerheden kan fastlægges. For temperaturmålinger har producenten selv oplyst en usikkerhed på ±0,5K ± 0,005 ΔT, hvorfor denne også er indtegnet i både [%] og [L/s]. Ud fra denne kan det dokumenteres, om usikkerheden på temperaturmålinger i dag er større end producentens angivne værdier.



Figur 4.4: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle fire KATflows og det sande flow.

Ud fra resultaterne vist på Figur 4.4 fremgår det, at næsten alle temperaturer fastlagt ved brug af den gennemsnitlige regression ligger indenfor producentens grænse på ±0,5K ± 0,005 ΔT. Kun tre målinger ligger udenfor usikkerhedsintervallet, idet den beregnede temperatur er lavere end den sande. I gennemsnit afviger målingerne med 0,36°C, svarende til ca. 2%, mens den største afvigelse er på 8% ved en sand temperatur på 9,5°C. Konklusionen for temperaturmålingerne er derfor, at Huba-flowmålerne, ved brug af de nye kalibreringsformler, måler temperaturen med en gennemsnitlig usikkerhed på 2%, hvilken stemmer overens med den oprindelige usikkerhed angivet af producenten.

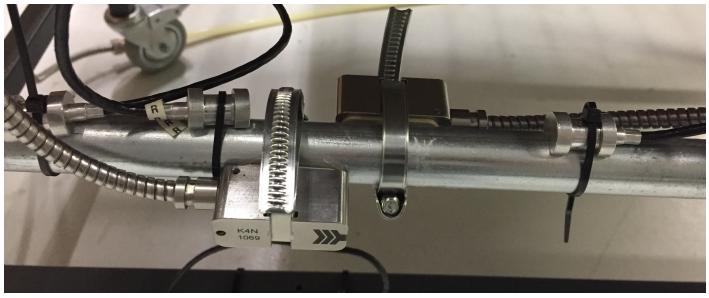
4.2 KATflows

Til måling af brugsvand og fjernvarme ved teknikrum er ultralydsflowmålere af typen *Utrasonic Flow Transmitter KATflow 100* anvendt. Denne type af flowmåler er gennem projektperioden benyttet til undersøgelse af vand- og energiforbrug ved Kærhavebakken og Petersborgvej, hvor hver KATflow-flowmåler måler kan måle et flow og to temperaturer.

4.2.1 Ultrasonic Flow Transmitter KATflow 100

KATflow-flowmålerne virker, i modsætning til Huba-flowmålerne, ved at måle flow og temperatur eksternt på vandrør, hvorfor disse ikke skal installeres som en del af brugsvandssystemet. Hver KATflow består af to transducere, der benyttes til måling af flowet i røret, og to PT 100-sensorer, der benyttes til måling af temperaturer to forskellige steder på røret. Flowsensorerne for KATflows'ne monteres direkte på vandrøret, hvor der sendes og modtages ultralyd impulser fra den ene sensor til den anden. Derved fastlægges flowet ift. tidsforskellen mellem impulserne. PT100 temperaturfølerne virker ved at registrere en modstand, som efterfølgende omregnes til en temperatur. På Figur 4.5 fremgår selve KATflow-enheden, mens der på Figur 4.6 fremgår et eksempel, hvor sensorer til flow- og temperaturmåling er monteret på et vandrør.

Figur 4.5: KATflow-enhed.



Figur 4.6: Flowtransducer og PT100 temperaturfølere.

Hver enkelt KATflow-enhed er tilkoblet et board, kaldet en Raspberry, hvor det målte data fra KATflows'ne sendes til den samme online server som Huba-flowmålerne. Opsætningen af KATflows'ne indebærer en række af specifikationer, der skal angives for at opnå et nøjagtigt output. I opsætningen angives bl.a. dimensioner og specifikationer for rørtypen, hvorpå målerne er monteret og hvilke output og enheder, der skal sendes til serveren. I projektet er flowet målt i [L/s] og temperaturen i [°C], begge med en opløsning på 1 Hz. Som for flowmålerne er målenøjagtigheden og usikkerheden fastlagt for KATflows'ne gennem en kalibrering, igen for at sikre en højere kvalitet på de målte data.

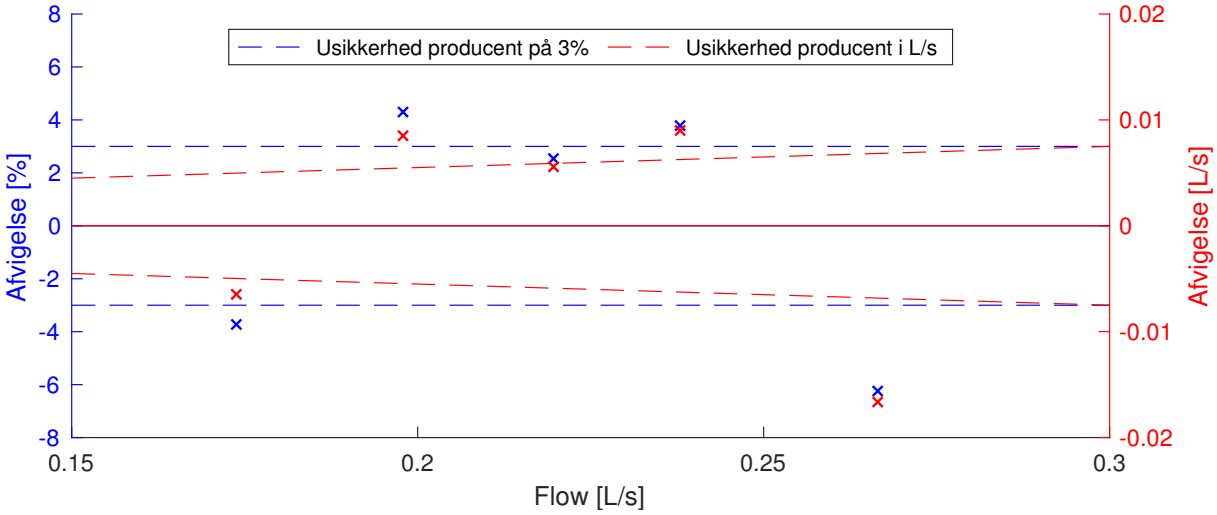
4.2.2 Kalibrering og usikkerhed af KATflows

I projektet er alle KATflows kalibreret på ny for at sikre, at målenøjagtigheden er bedst mulig. Derfor er nye kalibreringsformler fastlagt for hver KATflow, hvilke anvendes ved databehandlingen gennem projektet. Igen har det af praktiske årsager ikke været muligt at kalibrere KATflows'ne både før og efter målinger, hvorfor de kun er kalibreret en gang efter målinger af Kærhavebakken.

Under kalibreringen er alle KATflows monteret på det samme rør, hvor både flow og temperatur logges. Ved at sammenligne de målte værdier med et reference flow og en reference temperatur genereres regressioner, som anvendes til at fastlægge kalibreringsformler for hver KATflow. For en detaljeret beskrivelse af fremgangsmåden og databehandlingen for kalibreringen samt en oversigt over de fastlagte kalibreringsformler for både flow og temperaturer henvises til Appendiks B.

Flowmålinger

Efter kaliberingen fastlægges usikkerheden på flowmålinger for KATflows'ne ved at sammenholde afvigelsen mellem de fastlagte værdier fra gennemsnitsregressionen og det sande flow. Ved at plotte afvigelsen mellem det beregnede flow fra gennemsnitsregressionen og det sande flow, kan en ny usikkerhed fastlægges. Dertil indtegnes producentens usikkerhed på ±3%, hvormed det også undersøges, om den nye usikkerhed i gennemsnit afviger med mere eller mindre end ±3% af det sande flow. Figur 4.7 viser afvigelsen mellem det beregnede og det sande flow, mens producentens usikkerhed er indtegnes i både [%] og i [L/min].



Figur 4.7: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle fire KATflows og det sande flow.

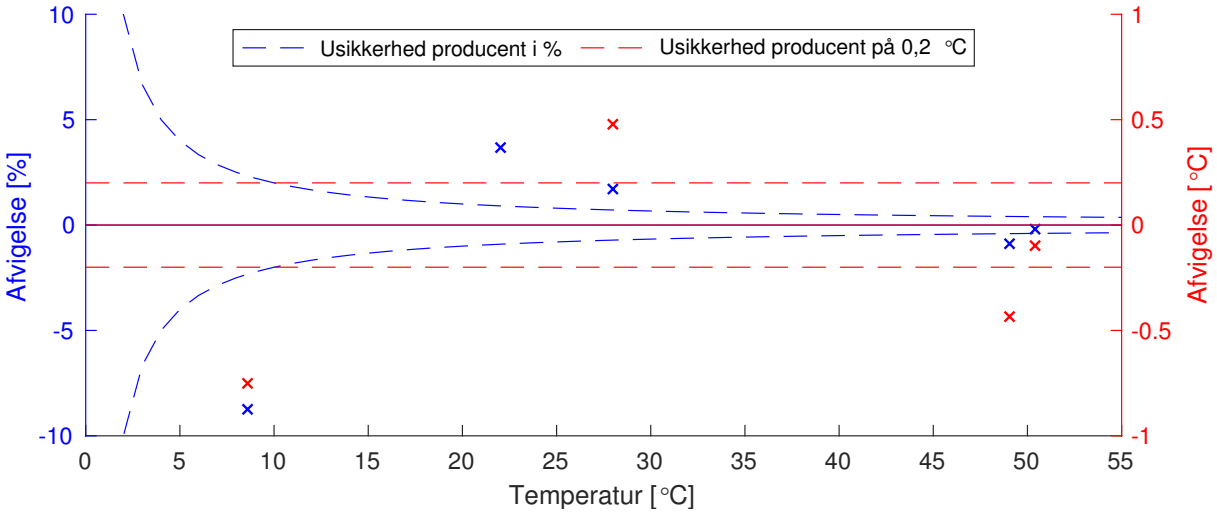
Resultaterne på Figur 4.7 viser, at det beregnede flow for fire af de fem analyserede flows afviger med mere end ±3% fra det sande flow. Kun ved et sandt flow på 0,22 L/s er afvigelsen lige netop mindre end 3%. Den gennemsnitlige afvigelse for regressionsværdierne er fastlagt til ±4%, mens den største forskel er på over 6% fra det sande flow på 0,26 L/s. Ud fra resultaterne kan det derfor konkluderes, at producentens angivne måleusikkerhed for KATflow-enhederne på ±3% er steget til en gennemsnitlig værdi på ±4%, og at de dermed ikke måler nær så nøjagtigt i dag som angivet i produktkataloget.

Det er dog vigtigt at notere, at ultralyd flowmålerne er særligt følsomme, hvilket også står angivet i produktkataloget. Flow-transducerne skal monteres meget nøjagtigt på røret for at sikre et optimalt lydsignal, og grundet forskellige rørudformninger og anvendelsesmuligheder findes der jf. produktkataloget ingen standardløsning for montering af flowmålerne. Faktorer som rørdiameter, materiale, foring, tykkelse, mediet i røret samt luftbobler og andre partikler i dette har alle indflydelse på signalet og påvirker derfor det målte flow. Ved montering af KATflows i husstandes teknikrum kan det derfor være svært at vide, om flowmålerne er monteret korrekt og vil måle rigtigt.

Følsomheden af udstyret samt usikkerheden omkring en korrekt montering har derfor stor betydning for, om kalibreringsformlerne for flowet for de enkelte KATflows, se Tabel B.1 i Appendiks B, kan anvendes ved den pågældende måling eller ej. Følsomheden afspejler sig tydeligt i forskellen på de fire KATflows flowregressioner, til trods for at alle fire KATflows ved kalibreringen havde nøjagtig samme setup og angav fuld signalstyrke for ultralyd flowmålerne. Idet setuppet ved kalibrering ikke er ens med setuppet i de enkelte husstandes teknikrum ved måling, vil der herske usikkerhed omkring flowregressionernes gyldighed og dermed målenøjagtigheden for de enkelte KATflows. Det anbefales derfor at lave en kontrol ved montering og kontrollere, om flowet registreret på de enkelte KATflows stemmer overens med eksempelvis målinger registreret af Huba-flowmålerne på tapstederne. På den måde kan det sikres, at KATflow-enhederne bliver monteret korrekt.

Temperaturmålinger

Usikkerheden på temperaturmålinger for KATflows'ne undersøges på samme måde, som for flowmålinger, hvor forskellen mellem den beregnede temperatur ud fra gennemsnitsregressionen og den sande temperatur plottes. Tilsvarende flowet sammenholdes den nye usikkerhed på temperaturmålinger også med producentens angivne usikkerhed på ±0,2 K og det undersøges, om usikkerheden for PT100 temperaturfølerne afviger med mere eller mindre end producentens anvisninger. På Figur 4.8 er afvigelsen mellem den beregnede og den sande temperatur vist, mens producentens usikkerhed er angivet i både [%] og [°C].



Figur 4.8: Afvigelse af temperatur beregnet ud fra en gennemsnitlig temperaturregression for alle fire KATflows og den sande temperatur.

Resultaterne på Figur 4.8 viser, at kun én temperaturmåling ligger inden for producentens usikkerhedsinterval på 0,2 K, mens de resterende temperaturer alle overskrider, både ved at måle for lave og for høje temperaturer. Den største afvigelse haves ved en sand temperatur på 8,5°C, hvor den målte værdi ligger 0,75°C lavere, svarende til ca. 9%. Den gennemsnitlige afvigelse mellem de beregnede og sande temperaturer er på ±0,5°C, svarende til 3%, hvilket indikerer, at måleusikkerheden for KATflow-enhederne er steget fra ±0,2°C til ±0,5°C. Konklusionen er derfor, at PT100 temperaturfølerne i dag ikke måler nær så nøjagtigt, som producenten har angivet i produktkataloget.

Kvalitetssikring af målinger 5

I forlængelse af kalibreringen og usikkerheden på det anvendte måleudstyr, beskrevet i Kapitel 4, redegøres der i dette kapitel for kvalitetssikringen af de målte data. Gennem projektperioden opstod der en række forskellige udfordringer ved brugen af det anvendte måleudstyr, hvilke alle har haft betydning for den videre databehandling og analyse. Derfor er kvalitetssikring af målinger en nødvendighed før selve databehandlingen, hvor analysen af målingerne påbegyndes. Kvalitetssikringen har til formål at klargøre målingerne til den videre databehandling og derved minimere usikkerheder, når analysen af målingerne foretages. I de følgende afsnit redegøres der for de udfordringer, der opstod med måleudstyret gennem projektperioden samt hvordan der efterfølgende blev foretaget kvalitetssikring af målingerne.

5.1 Målinger ved tapsteder

Ved målingerne af tapstederne for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej blev der i løbet af de to måleperioder observeret en række udfordringer ved brugen af flowmålerne. Disse udfordringer blev observeret løbende gennem projektperioden, men særligt i den indledende fase, hvor de første analyse af målingerne fandt sted, var præget af flere udfordringer med både måleudstyr og det målte data. Ved gennemgang af CSV-filerne fra tapstederne og enkelte plots af målingerne blev der observeret forskellige udfordringer, der alle skulle løses før den videre databehandling. I de følgende underafsnit beskrives de enkelte udfordringer samt hvordan disse blev behandlet gennem projektet. Herudover redegøres der for forslag til, hvordan disse udfordringer kan håndteres og behandles ved fremadrettet brug af flowmålerne.

5.1.1 Strømforsyning

Den første udfordring ved brugen af flowmålerne var, at flowmålerne monteret ved Kærhavebakken var tilsluttet batterier i stedet for strømforsyninger. For at flowmålerne kan registrere et spændingsoutput for flow og temperatur kræves det, at de tilsluttes 12 V, enten ved brug af batterier eller strømforsyninger. Ulempen ved brugen af batterier ved Kærhavebakken var, at batterierne altid skulle være opladet for at kunne levere 12 V til flowmålerne. Derfor måtte beboerne hver dag sørge for at oplade batterier og tjekke, om en udskiftning af batteriet var nødvendig på de otte tapsteder. Foruden besværet for beboerne havde dette også betydning for målingerne. Idet batterierne kunne nå at aflade inden beboerne opdagede det, opstår der derfor en usikkerhed i, om visse målinger er gået tabt henover måleperioden. Denne udfordring blev elimineret for målingerne ved Kildebjerg Søvej, hvor flowmålerne i stedet var forsynet med 12 V gennem strømforsyninger. Til at sikre, at målinger ikke går tabt af denne grund, anbefales det, at flowmålere ved fremtidig brug skal tilkobles strøm, så vidt det er muligt, vha. 12 V strømforsyninger.

5.1.2 Gentagelse af målinger

En anden udfordring med målingerne foretaget ved brug af Huba-flowmålerne var, at der i CSV-filerne indimellem var gentagelser af de samme målinger. Derfor gik det samme klokkeslæt ofte igen i de enkelte CSV-filer for hvert tapsted, hvorfor spændingen for flowet også blev registreret flere gange. Dette var en udfordring, da gentagelse af målinger førte til et højere flow og derved også større forbrug, der ikke afspejlede beboernes reelle forbrug. Derfor blev hver enkelt CSV-fil for alle tapsteder gennemgået manuelt for at spotte og slette eventuelle gentagelser af målingerne. Grundet antallet af målinger for både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej var denne proces tidskrævende, hvorfor det anbefales at optimere dette ved fremtidig brug af flowmålerne. Dette kan eksempelvis gøres ved at opsætte et program, eksempelvis i Matlab eller Excel, der kan kontrollere og slette eventuelle gentagelser af målinger. En forklaring på problemets opståen blev ikke dokumenteret gennem projektperioden, hvorfor det optimale ved fremadrettet brug af flowmålerne vil være at finde årsagen til fejlen og derved eliminere denne.

5.1.3 Målinger af konstant spænding

Udover gentagende målinger i CSV-filerne var en udfordring også, at flowmålerne indimellem registrerede en konstant spænding for flowet uden at temperaturen ændrede sig. Sådanne målinger medførte, ligesom de gentagende målinger, at forbruget blev højere end beboernes reelle forbrug. På samme vis som de gentagende målinger blev målingerne med konstant spænding for flowet observeret og slettet ved manuel gennemgang af CSV-filerne for de enkelte tapsteder. Særligt ved målinger for Kildebjerg Søvej blev disse konstante spændinger for flowet registreret, hvilket tyder på, at udstyret er følsomt, særligt ved på- og afmontering. Hver gang flowmålerne flyttes fra en lokation til en anden, risikerer det at målerne ikke registrerer de samme spændinger som ved den tidligere lokation. Dette understreger vigtigheden af, at kalibrering foretages både før og efter målinger i en bolig, således usikkerheden minimeres. Årsagen til målingerne med konstant spænding blev ikke dokumenteret gennem projektperioden, hvorfor det anbefales, at der foretages en kontrol af både flowmålere og board før installation i brugsvandssystemet. I boksen, hvor Arduino'en sidder, bør det ligeledes kontrolleres, at alle ledninger er korrekt tilsluttet og om modstanden, der sørger for at spændingsoutputtet er korrekt, ikke er beskadiget.

5.1.4 Opsætning af Arduino-boards

Som beskrevet tidligere er hvert par af flowmålere tilkoblet en Arduino, der sørger for, at det målte spændingsoutput for hhv. flow og temperatur logges og herefter sendes til serveren. En Arduino er et board, der programmeres til at fungere som en lille computer, hvorfor en del af kvalitetssikringen for flowmålere lå i at optimere opsætningen af disse boards. Gennem målingerne ved Kærhavebakken opstod en række tvivlsspørgsmål ift. om Arduinoerne var opsat korrekt, hvorfor en kontroltest af flowmålerne blev foretaget i laboratoriet. Formålet med kontroltesten var at teste, om Arduinoerne sammen med flowmålerne kunne registrere nedenstående tre scenarier. For en detaljeret gennemgang af forsøgsopstillingen samt metoden for kontroltesten af de tre scenarier henvises der til Appendiks C.

- Målinger af mixflow
- Målinger af lave spændinger
- Målinger af gentagende flow efter 30 sekunder

For målinger af mixflow og lave spændinger viste kontroltesten ingen indikation på, at flowmålerne skulle have problemer med at måle på begge flowmålere samtidigt og at spændinger ned til 0,7 V, svarende til et flow på ca. 2,2 L/min også bør kunne registreres. Derimod viste kontroltesten af målinger med gentagende flow efter 30 sek., at en mindre del af målingerne går tabt, hvis en ny måling startes samtidig med, at Arduinoen uploader data til serveren. Det betyder, at der ligger en usikkerhed i målingerne for Kærhavebakken, hvis tiden mellem tapningerne svarede til tiden der gik, før Arduinoerne begyndte at uploade data til serveren, i dette tilfælde 30 sek. Grundet denne observation blev Arduinoerne for målingerne ved Kildebjerg Søvej omprogrammeret således, at der i stedet for 30 sek. ville gå 5 min., før det målte data blev uploadet til serveren. Herudover blev Arduinoerne også programmeret til, at de hvert 15. minut kontrollerede, om der lå data på boardet, som endnu ikke var uploadet til serveren, eksempelvis i tilfælde af dårlig Wi-Fi-forbindelse. Den nye opsætning skulle mindske risikoen for, at en ny tapning fandt sted imens data fra forrige tapning blev uploadet til serveren for Kildebjerg Søvej. En løsning på denne type fejl kan ved fremtidige målinger elimineres ved at benytte et board med mindst to processorer, således en måling af flowet kan finde sted imens en anden tapning uploades til serveren.

5.1.5 Opdeling af mixflow og mixtemperatur

Den sidste udfordring for målinger med flowmålerne var, at der for bruserne ved Kærhavebakken blev målt efter blandingsbatteriet, hvorfor det var mixflowet og mixtemperaturen, der blev registreret. Til undersøgelse og dokumentation af forbruget af hhv. koldt og varmt vand var dette ikke optimalt, og derfor var det nødvendigt at opdele mixflowet og mixtemperaturen, således det afspejlede forholdene for koldt og varmt vand. For en detaljeret gennemgang af opdelingen til koldt og varmt vand for de to brusere henvises til Appendiks D.

Opdelingen til koldt og varmt vand var en udfordring grundet begrænsede målinger i teknikrummet. Her var et temperaturprofil for både koldt og varmt vand nødvendigt for at kunne beregne forholdet mellem det kolde og varme vand ved tapstedet. Grundet den begrænsede mængde af data logget fra teknikrummet var første step i processen derfor at estimere et nyt temperaturprofil for det kolde og varme vand i teknikrummet, hvorefter flowet og temperaturen ved tapstedet kunne beregnes. Havde målinger i teknikrummet været tilstrækkelige over hele måleperioden, kunne det målte temperaturprofil være benyttet i stedet for det estimerede profil, og dette havde minimeret usikkerheden ved beregningen. På baggrund af beregningerne anbefales det, at målinger ved tapsteder for så vidt muligt altid foretages for både koldt og varmt vand, hvis en analyse af forbruget opdelt i koldt og varmt vand ønskes.

5.2 Målinger i teknikrum

Udover udfordringer med Huba-flowmålerne blev der gennemprojektperioden også observeret en række udfordringer ved anvendelse af KATflows til målinger i teknikrummet ved Kærhavebakken og Petersborgvej. Disse udfordringer blev, ligesom for flowmålerne, observeret løbene gennem projektperioderne ved gennemgang af CSV-filer og analyser af målingerne. I det følgende redegøres der for kvalitetssikringen ved brugen af KATflows, mens der henvises til Appendiks E for en nærmere gennemgang af behandlingen af data forud for kvalitetssikringen.

5.2.1 Fejlmeddelelser i CSV-filer

For målingerne foretaget på Kærhavebakken var en af udfordringerne, at KATflows'ne gav fejlmeddelelser i CSV-filerne, hvilket resulterede i udfald i det målte data. Udfaldene mellem målepunkterne kunne i få tilfælde udfyldes med lineære funktioner, men i de fleste tilfælde var udfaldene for store til, at det var muligt at generere nyt, realistisk data for tappe- og temperaturprofilet. Dette gjorde, sammen med den allerede begrænsede mængde målinger fra teknikrummet, at usikkerheden på målingerne fra teknikrummet ville blive for stor i flere tilfælde og at målinger registreret ved tapstederne ikke ville afspejles ved målingerne i teknikrummet.

5.2.2 Tidsforskydelse

Udover de beskrevne fejlmeddelelser var der for KATflows'ne også udfordringer med tidsforskydelse på det målte data sammenlignet med målingerne ved tapstederne. Det betød, at målingerne foretaget med KATflows skulle synkroniseres ift. målingerne ved tapstederne, og dette viste sig ikke at være muligt, idet tiden under selve tapningerne også skred. En tapning målt med KATflows havde derfor en længere varighed end målingerne ved tapstederne, hvorfor tidsforskydelsen blev større ift. måleperioden. Selvom KATflow målingerne for den første tapning om morgenen blev synkroniseret med den første tapning registreret ved tapstedet, viste det sig allerede en halv time senere samme dag, at målingerne kunne være forskudt med flere minutter. Denne tidsforskydelse gjorde, sammen med den begrænsede mængde målinger fra teknikrummet, at der for hele måleperioden på Kærhavebakken kun var en dag d. 13/09-2018 med tilstrækkeligt data fra både teknikrummet og tapstederne til, at disse kunne sammenholdes.

5.2.3 Opsætning af Raspberries

For at imødekomme problematikken med tidsforskydelse ved målinger med KATflows blev opsætningen af Raspberries'ne omprogrammeret, før måleudstyret blev installeret på Petersborgvej. I stedet for at KATflows'ne skulle registrere målingerne ift. den indbyggede tid på selve KATflow-enheden, blev Raspberries'ne programmet til at synkronisere tiden ift. den online server. Denne programmering forbedrede problemet med tidsforskydelsen, som havde været en udfordring ved Kærhavebakken, men ved analyse af målinger fra Petersborgvej blev der fortsat registreret udfordringer med tidssynkroniseringen. For målingerne ved Petersborgvej forekom der i flere tilælde gentagelse af målinger for de samme sekund, hvorefter der manglede data i flere sekunder. I modsætning til Kærhavebakken, hvor fejlmeddelelserne gjorde, at der i flere tilfælde var for langt imellem målepunkterne til at udfylde hullerne, gjorde dette sig ikke gældende for målingerne på Petersborgvej. Idet udfaldene med manglende data kun drejede sig om nogle få sekunder, blev hullerne udfyldt med en lineær funktion mellem målepunkterne. Den nye opsætning af Raspberries'ne benyttet ved Petersborg vej resulterede i bedre målinger sammenlignet med Kærhavebakken, men fremadrettet bør der findes en løsning, hvormed der altid kun vil forekomme en unik måling for hvert sekund.

5.2.4 Server- og Wi-Fi-forbindelse

Et sidste parameter, der spillede en rolle for målingerne ved brugen af KATflows, var udfordringer med server- og Wi-Fi-forbindelse. For målingerne ved Kærhavebakken gjorde en serverfejl i perioden fra d. 09/10-2018 til d. 17/10-2018, at der ikke blev registreret nogle målinger, hverken for flowmålerne eller KATflows'ne. Herudover var der i store dele af tiden generelle problemer med at få forbindelse til serveren for KATflows'ne installeret på Kærhavebakken. Det betød, at

der for mange af dagene var store udfald i målingerne fra teknikrummet og at data ikke blev registret med den ønskede opløsning på 1 sek. Årsagen til den manglede forbindelse til serveren for Kærhavebakken blev ikke dokumenteret, men for måleperioden blev det observeret, at temperaturen i teknikrummet var høj, hvilket kan have ført til forstyrrelser med Raspberries'ne. For måleperioden på Petersborgvej blev der også oplevet problemer med Wi-Fi-forbindelsen til KATflows'ne. Dette resulterede i, at målingerne for de sidste fem dage ved Petersborgvej blev afbrudt flere gange, hvorfor der også her opstod udfald i målingerne. Her kunne det dog konstateres, at den manglende forbindelsen til serveren skyldes en dårlig internetforbindelse. For både flowmålere og KATflows er det derfor vigtigt at kontrollere forbindelsen til både server og internet før målingerne startes, med henblik på at minimere udfald i det målte data.

5.3 Opsummering

Som de ovenstående afsnit indikerer opstod der undervejs i projektperioderne en række udfordringer med det anvendte måleudstyr. Dette understreger vigtigheden i at kvalitetssikre de målte data for derved at minimere fejl og usikkerheder i den videre databehandling og analyse. Selvom forsøg og kontroltest i laboratoriet ikke afspejler de reelle forhold hos beboerne, har det gennem projektperioden været en god mulighed for at teste og optimere måleudstyret både før og efter montering i de tre boliger. Udover kvalitetssikringen af målinger, bør der også altid foretages en kalibrering både før og efter målinger, hvilket af praktiske årsager ikke var muligt i dette projekt. En kalibrering af måleudstyret før og efter havde, sammen med den beskrevne kvalitetssikring, minimeret usikkerhederne yderligere, hvilket havde været at foretrække. En grundig kvalitetskontrol af målinger gør samtidig, at den videre databehandling og analyse forløber lettere, idet eventuelle fejl og usikkerheder minimeres fra begyndelsen.

Del III

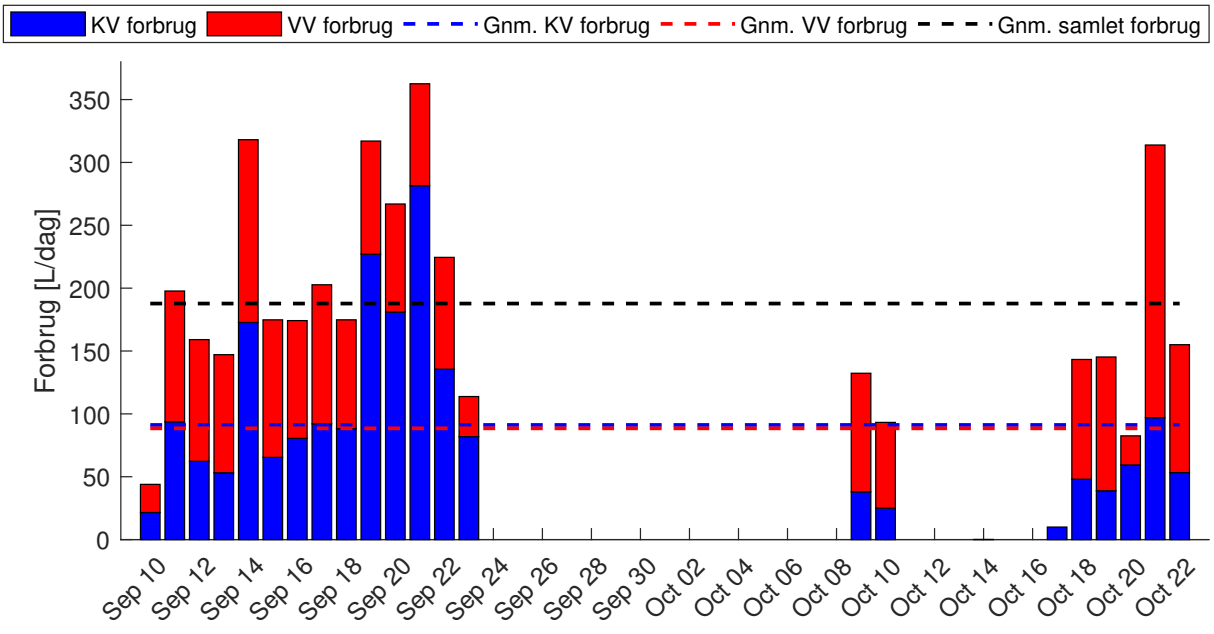
Analyse

Overordnet forbrug 6

Som det første led i analysen undersøges og dokumenteres det overordnede forbrug for de tre boliger præsenteret i Kapitel 3. For hver af de tre boliger analyseres forbruget på dagsbasis, mens der for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej også redegøres for forbruget pr. tapsted. Formålet med kapitlet er at dokumentere og sammenholde varmtvandsforbruget mellem de tre boliger og samtidig undersøge, hvilke tapsteder der udgør det største samlede forbrug samt af hhv. koldt og varmt vand. For boligerne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej undersøges nøgletal for hvert af tapstederne, der videre hen benyttes til statistiske analyser af udvalgte parametre. I de følgende afsnit behandles det overordnede forbrug separat for de tre boliger og afslutningsvist opsummeres og sammenholdes resultater.

6.1 Vandforbrug ved Kærhavebakken

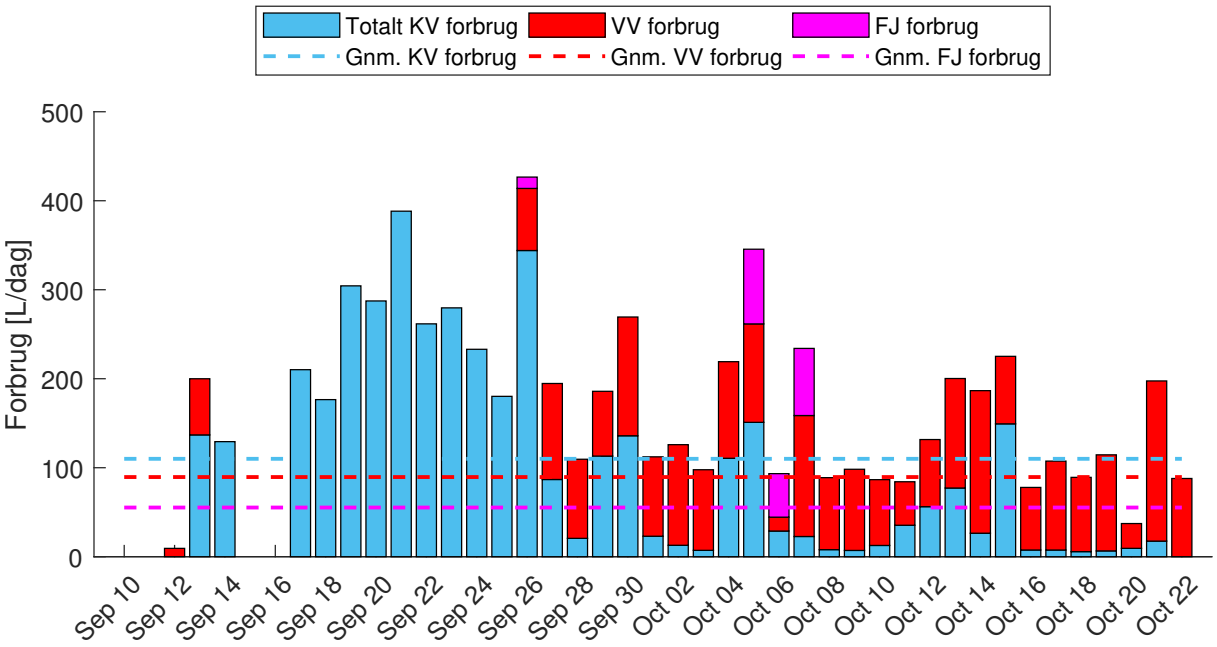
Til dokumentation af vandforbruget på Kærhavebakken benyttes målingerne foretaget ved tapstederne henover måleperioden på i alt 43 dage. Til at undersøge forholdet mellem koldt og varmt vand er disse forbrug summeret op ved alle tapsteder. På Figur 6.1 fremgår resultatet af forbruget af både koldt og varmt vand registreret med flowmålerne placeret ved tapstederne. Som beskrevet i Kapitel 5 blev forbrugene ved tapstederne, grundet problemer med Huba-flowmålerne og serveren, ikke målt henover hele måleperioden, hvorfor der ikke er noget forbrug registreret i perioderne 24/09-2018 - 08/10-2018 og 11/10 2018 - 16/10-2018.



Figur 6.1: Overordnet forbrug af koldt og varmt vand henover måleperioden for Kærhavebakken baseret på målinger ved tapsteder.

Af Figur 6.1 fremgår det, at dagsforbruget af koldt og varmt vand er næsten ligeligt fordelt, idet der er målt et gennemsnitsforbrug på hhv. 91 L/dag og 88 L/dag. Det betyder, at forbruget af varmt vand for Kærhavebakken ligger ca. 46% lavere end det maksimale varmtvandsforbrug på 164 L/bolig/dag angivet i SBi 213 [2018]. Fordeles varmtvandsforbruget ud på beboerne i boligen fås et forbrug på 22 L/pers./dag, hvilket også ligger næsten halvt så lavt som værdien angivet i studiet af Jensen et al. [2011] på 40 L/pers./dag. På baggrund af beboernes udtalelser kan en forklaring på det lavere varmtvandsforbrug sammenlignet med standardværdierne skyldes, at børnene har flere sportsaktiviteter i løbet af en uge, hvorfor de ofte ikke bader hjemme. Grundet børnenes alder kan det dog diskuteres, hvorvidt deres forbrug af varmt vand vil påvirke det samlede varmtvandsforbrug, idet de ofte ikke bader hjemme.

Udover målingerne ved tapstederne blev vandforbruget også registreret ved målinger i teknikskabet ved brug af KATflows. Ligesom for flowmålerne er forbruget bestemt ved at summere målingerne af vandforbruget pr. dag for hhv. det totale koldtvandsforbrug, varmtvandsforbrug og fjernvarmeforbrug, og resultater er præsenteret på Figur 6.2. Hertil er det vigtigt at nævne, at det koldtvandsforbrug, der er angivet på figuren nedenfor, er det totale vandforbrug i boligen, se Figur 3.4 på side 19. Dette koldtvandsforbrug inkluderer alle boligens tapninger af både koldt og varmt vand og kan derfor ikke sammenholdes direkte med koldtvandsforbruget på tapstederne præsenteret på Figur 6.1.

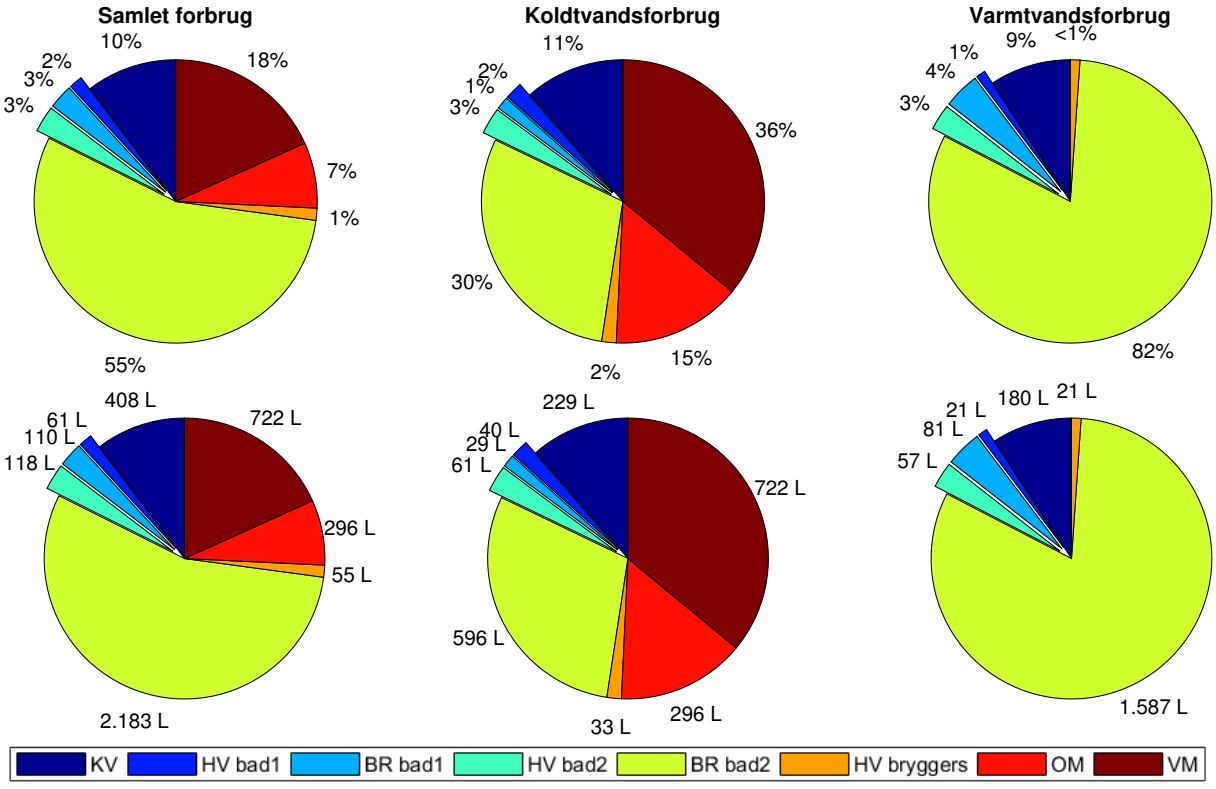


Figur 6.2: Totalt koldtvandsforbrug, varmtvandsforbrug og fjernvarmeforbrug henover måleperioden for Kærhavebakken, baseret på målinger i teknikrummet.

Som beskrevet i Kapitel 5 var målingerne af vandforbruget i teknikrummet ustabile over en stor del af måleperioden grundet udfordringer med KATflows, hvilket også fremgår af Figur 6.2. Indtil d. 26/09-2018 blev kun det totale koldtvandsforbrug målt, mens varmtvands- og fjernvarmeforbruget kun blev registreret i en begrænset mængde d. 13/09. Efter d. 26/09 blev målinger af varmtvandsforbruget forbedret, imens målinger af det totale koldtvandsforbrug blev forringet. Som beskrevet tidligere dækker koldtvandsforbruget over boligens totale vandforbrug til både koldt- og varmtvandstapninger, hvorfor det totale koldtvandsforbrug aldrig kan blive lavere end varmtvandsforbruget. At dette forekommer i perioden efter d. 26/09 skyldes store huller i

det målte data, hvorfor størstedelen af boligens tapninger ikke er registret. Af figuren fremgår et gennemsnitligt koldtvandsforbrug i teknikrummet på 110 L/dag, hvilket kun er 11 L/dag mere end koldtvandsforbruget baseret på målingerne ved tapstederne. Den minimale forskel mellem de to understreger udfordringerne med KATflows'ne, idet forskellen reelt set skulle afspejle boligens totale vandforbrug. I modsætning til koldtvandsforbruget, afviger det gennemsnitlige varmtvandsforbrug på 90 L/dag i teknikrummet kun med 2 L/dag ift. tapstederne. På trods af at varmtvandsforbruget ikke er registreret de samme dage henover måleperioden, kan den lille afvigelse alligevel betragtes som en kvalitetssikring af målingerne ved tapstederne. Dog forekommer der dage i måleperioden med større afvigelser i varmtvandsforbrugene, eksempelvis d. 13/09 hvor varmtvandsforbruget i teknikrummet og ved tapstederne er målt til hhv. 63 L/dag og 94 L/dag. Denne afvigelse understreger igen udfordringer med KATflows'ne, der ikke registrerede alle målinger d. 13/09, hvorfor afvigelsen den dag bliver 33%. Afslutningsvist fremgår det af Figur 6.2, at målinger af fjernvarmeforbruget kun blev målt i 4 ud af de 43 dage og med et gennemsnitsforbrug på 55 L/dag. Idet fjernvarmeforbruget ikke blev målt på anden vis, findes ikke et sammenligningsgrundlag til dokumentation af forbruget benyttet til opvarmning af vand.

I forlængelse af målingerne ved tapstederne er det af interesse at undersøge, hvilke tapsteder der udgør den største andel af det samlede vandforbrug samt fordelingen af koldt og varmt vand. Baseret på målingerne henover hele måleperioden for de enkelte tapsteder undersøges fordelingen, præsenteret på Figur 6.3.



Figur 6.3: Fordeling af samlet, koldt- og varmtvandsforbrug ved tapsteder angivet i hhv. [%] og [L], baseret på målinger.

Af resultaterne vist på Figur 6.3 er det i øjnefaldende, at bruseren på bad2, badeværelset i forbindelse med soveværelset, udgør den største procentdel af både det samlede forbrug og varmtvandsforbruget. Herudover er det særligt køkkenvasken, vaskemaskinen og opvaskemaskinen, der udgør

de største procentdele af det samlede forbrug og koldtvandsforbruget. De resterende tapsteder, dvs. håndvasken på de to badeværelser og i bryggerset samt bruseren på bad1, badeværelset ved børneværelserne, udgør kun 1% - 4% af samlet, koldt- og varmtvandsforbruget. De 110 L vand der er tappet på bruseren ved bad1, stemmer altså overens med beboernes udtalelser om, at dette bad sjældent benyttes sammenlignet med bad2. Beregningerne af det loggede data dokumenterer, at varmtvandsforbruget for de to brusere i begge tilfælde udgør ca. 73% af den samlede mængde vand tappet ved bade, mens fordelingen af koldt og varmt vand ved håndvaskene i alle tilfælde har et større forbrug af koldt vand end varmt vand. Figur 6.3 indikerer derved, at varmtvandsforbruget for Kærhavebakken i højeste grad er påvirket af forbruget til badene på badeværelset i forbindelse med soveværelset, mens koldtvandsforbruget er særligt påvirket af opvaskemaskinen og vaskemaskinen, der samlet set udgør 51% af koldtvandsforbruget.

I forlængelse af ovenstående analyse af de enkelte tapsteder, undersøges udvalgte nøgletal for tapstederne med henblik på den videre statistiske analyse. Udover det overordnede forbrug, samt fordelingen mellem tapstederne, er det af interesse af undersøge antallet og varigheden af tapningerne, samt at dokumentere forbruget og temperaturen i de enkelte tapninger. Derfor er nøgletallene baseret på alle tapninger henover hele måleperioden, hvor gennemsnitsværdier for hvert tapsted er angivet i Tabel 6.1. For antallet af tapninger pr. dag skal det nævnes, at selvom måleperioden forløb over 43 dage, blev der kun registreret data i 21 dage, hvorfor denne anvendes til udregning af gennemsnitsværdierne, se Figur 6.1.

Tabel 6.1: Nøgletal for tapsteder baseret på målinger ved Kærhavebakken. Alle nøgletal er angivet som gennemsnitsværdier pr. tapning. *Resultater angives pr. vask.

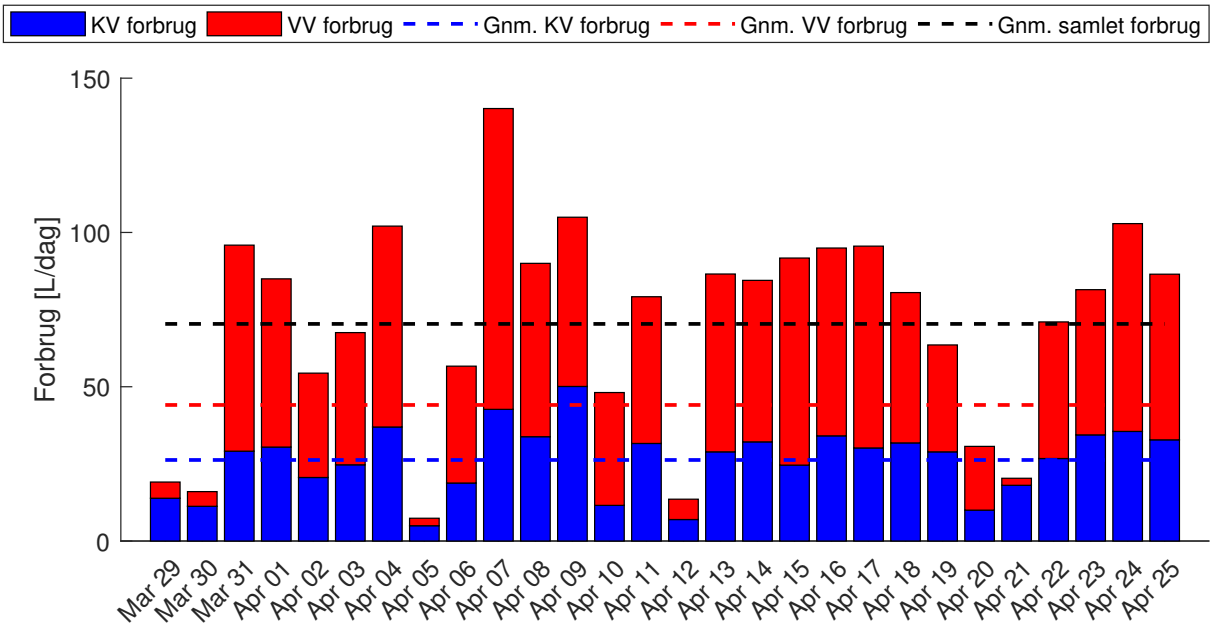
	Antal tapninger	Tapninger pr. dag	Flow [L/min]	Forbrug [L]	Temperatur [°C]	Varighed [mm:ss]
KV	687	32,7	4,0	0,5	24,5	00:07
HV bad1	114	5,4	3,0	0,5	26,3	00:08
BR bad1	2	0,1	12,2	48,5	38,5	03:56
HV bad2	108	5,1	4,0	1,0	24,5	00:15
BR bad2	34	1,6	8,8	60,8	40,3	06:52
HV bryg.	42	2,0	2,9	1,2	26,9	00:24
OM*	11	0,9	2,4	10,0	17,8	180:00
VM*	8	0,6	9,2	48,0	18,0	60:00

Af Tabel 6.1 fremgår det, at køkkenvasken for Kærhavebakken er det tapsted, der har flest tapninger pr. dag samtidig med, at det er det tapsted med den kortest gennemsnitlige varighed pr. tapning. Herefter følger antallet af tapninger på håndvaskene i de to badeværelser, hvor den gennemsnitlige varighed for håndvasken på bad2 er godt dobbelt så lang som for håndvasken på bad1. Antallet af tapninger pr. dag for de enkelte tapsteder kan være med til at indikere, hvor beboerne opholder sig mest. For en familie med mindre børn, som det er tilfældet med beboerne på Kærhavebakkenl tyder de mange tapninger på køkkenvasken på, at familien benytter køkkenet hver dag ved madlavning. Antallet af tapninger på håndvaskene på badeværelserne indikerer samtidig, at begge badeværelser benyttes til daglig, mens antallet af tapninger på bruseren ved bad1 også stemmer overens med beboernes udtalelser om, at børnene ofte ikke bader hjemme. Af tabellen fremgår det også, at de to brusere i boligen har de højeste tappetemperaturer og det største forbrug, hvilket stemmer overens med de længere varigheder. For opvaskemaskinen og vaskemaskinen fremgår det, at vaskemaskinen har et højere flow og forbrug pr. vask, selvom

den gennemsnitlige varighed af de enkelte tapningerne, hvor maskinen tager vand ind, er næsten identisk for de to maskiner.

6.2 Vandforbrug ved Kildebjerg Søvej

I tråd med analysen for Kærhavebakken dokumenteres vandforbruget på Kildebjerg Søvej også på baggrund af målinger foretaget ved tapstederne henover måleperioden på i alt 28 dage. Ligeledes undersøges forholdet mellem koldt og varmt vand ved at summere forbruget for alle tapstederne pr. dag. På Figur 6.4 fremgår resultatet af forbruget af både koldt og varmt vand registreret med flowmålerne placeret ved tapstederne i boligen.

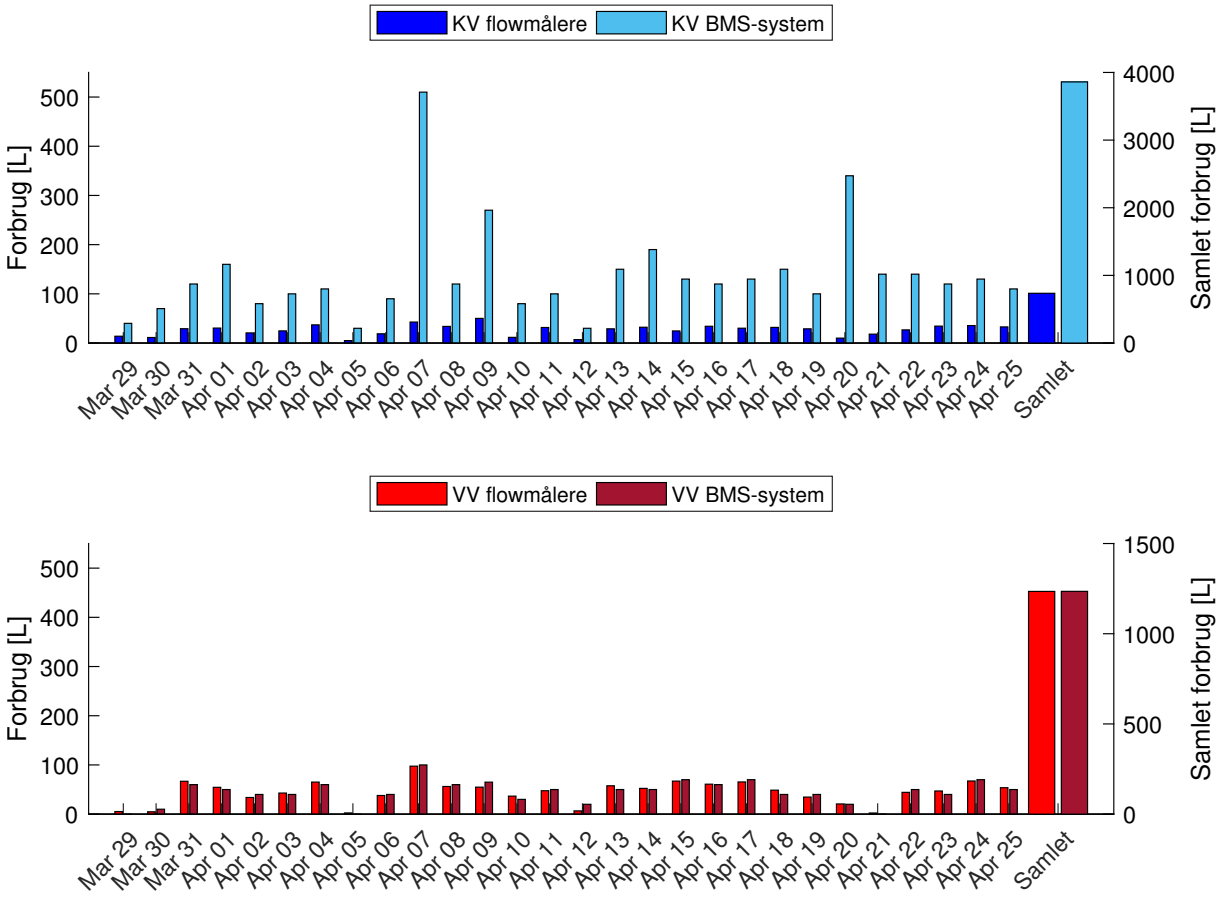


Figur 6.4: Overordnet forbrug af koldt og varmt vand henover måleperioden for Kildebjerg Søvej, baseret på målinger ved tapsteder.

I modsætning til Kærhavebakken fremgår det af Figur 6.4, at forholdet mellem koldt og varmt vand for Kildebjerg Søvej ikke er ligeligt fordelt. Her fås et gennemsnitligt koldtvandsforbrug på 26 L/dag, mens det gennemsnitlige varmtvandsforbrug ligger på 44 L/dag. For denne bolig betyder det, at varmtvandsforbruget ligger ca. 73% lavere end det maksimale varmtvandsforbrug på 164 L/bolig/dag iht. SBi 213 [2018]. Undersøges varmtvandsforbruget pr. person for Kildebjerg Søvej fås et varmtvandsforbrug på 22 L/pers./dag, hvilket stemmer overens med forbruget dokumenteret pr. person for Kærhavebakken. Der betyder, at forbruget pr. person for denne bolig er ca. det halve af værdien angivet af Jensen et al. [2011] på 40 L/pers./dag. En forklaring på det lavere vandforbrug kan skyldes, at beboerne er meget ude af huset samt at særligt den ene beboer dyrker jævnligt sport og dermed sjældent bader hjemme.

I modsætning til Kærhavebakken, hvor forbruget ved tapstederne blev sammenholdt med målinger i teknikrummet ved brug af KATflows, sammenholdes forbruget ved tapstederne for Kildebjerg Søvej med målinger logget i teknikrummet med BMS-systemet. Foruden at anvende data fra BMS-systemet til analyse af teknikrummet fungerer dataene også som en kvalitetssikring af målingerne foretaget ved de enkelte tapsteder, hvor det kan kontrolleres, at de samlede

mængder af koldt og varmt vand stemmer overens. På Figur 6.5 er resultaterne af koldt og varmt vand vist for både tapstederne og værdier logget i teknikrummet med BMS-systemet.

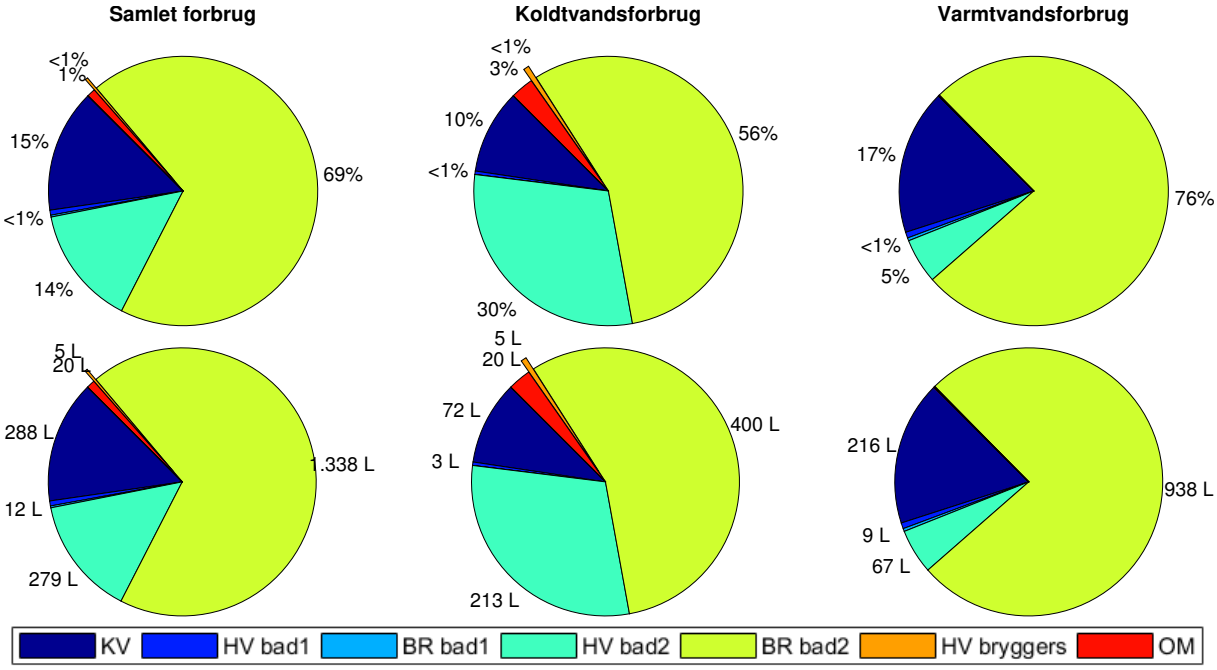


Figur 6.5: Sammenligning af målinger logget med flowmålere og BMS-system for hhv. koldt- og varmtvandsforbrug.

Ved sammenligning af forbrugene målt ved hhv. tapstederne og i teknikrummet fremgår det af Figur 6.5, at koldtvandsforbruget samlet set afviger med ca. 3.000 L, mens varmtvandsforbruget samlet set ikke afviger. Den store afvigelse i koldtvandsforbruget skyldes, at koldtvandsforbruget logget med BMS-systemet dækker over boligens totale vandforbrug og derfor inkludere alle boligens koldt- og varmtvandstapninger. Det betyder, at det samlede forbrug på ca. 3.800 L logget med BMS henover måleperioden inkluderer det samlede koldtvandsforbrug på ca. 800 L og det samlede varmtvandsforbrug på ca. 1.200 L. Når det målte koldt- og varmtvandsforbrug fratrækkes det totale koldtvandsforbrug, fås en forskel på 1.800 L vand henover hele måleperioden, hvilket svarer til en gennemsnitlig forskel på 64 L/dag. Som det fremgår af figuren er denne forskel ikke konstant over måleperioden, men værdien indikere at der i gennemsnit går 64 L/dag til at dække forbruget til toiletskyl, tøjvask og Quookeren, som var de tapsteder der ikke blev målt på, samt opvaskemaskinen, som kun blev målt i den første uge af måleperioden. Som nævnt tidligere afviger det totale varmtvandsforbrug henover hele måleperioden ikke, selvom der forekommer mindre afvigelser på dagsbasis. Afvigelserne på dagsbasis skyldes en minimum grænse på 10 L for BMS-systemet før forbruget registreres og derfor ligger værdierne for BMS-systemet både lavere og højere end varmtvandsforbruget registreret ved tapstederne.

Ligesom for Kærhavebakken er det også af interesse for Kildebjerg Søvej at undersøge forbruget

pr. tapsted samt fordelingen af samlet, koldt og varmt vand. Baseret på målingerne henover hele måleperioden undersøges forbruget og fordelingen for de enkelte tapsteder på baggrund af Figur 6.6.



Figur 6.6: Fordeling af samlet, koldt- og varmtvandsforbrug ved tapsteder, angivet i hhv.[%] og [L], baseret på målinger.

Af Figur 6.6 bemærkes det, at brusen på bad2, badeværelset ved soveværelset, udgør den største procentdel af forbruget både samlet set og for koldt og varmt vand. Herudover udgør køkkenvasken og håndvasken på bad2 de største procentdele, mens opvaskemaskinen samt håndvasken på bad1 og i bryggerset kun udgør få procentdele af forbruget. I modsætning til Kærhavebakken udgør opvaskemaskinen for denne bolig kun 3% af koldtvandsforbruget, hvor den for Kærhavebakken udgjorde 15%. Af figuren, hvor forbruget angives i liter, fremgår det, at der i alt kun blev tappet 20 L på opvaskemaskinen, svarende til at opvaskemaskinen kun har kørt to gange i måleperioden. En del af forklaring på dette skal findes i, at der for opvaskemaskinen, som allerede nævnt, var problemer med flowmåleren, hvorfor den blev frakoblet efter den første uge af måleperioden. Derfor vil manglende målinger for den resterende del af måleperioden betyde, at andelen falder sammenlignet med de andre tapsteder. Af figuren fremgår det også, at håndvasken bad1, badeværelset i gangen, sjældent benyttes mens badet på samme badeværelse slet ikke blev benyttet gennem måleperioden. Undersøges fordelingen af koldt og varmt vand pr. tapsted, viser beregninger, at varmtvandsforbruget for køkkenvasken og bruseren udgør hhv. 75% og 70% af den samlede mængde tappet vand for de to tapsteder, mens fordelingen ved håndvasken på bad2 viser et større forbrug af koldt vand end varmt vand. For Kildebjerg Søvej indikerer Figur 6.6, ligesom for Kærhavebakken, at varmtvandsforbruget i højere grad er påvirket af forbruget til bade, mens koldtvandsforbruget, foruden badene, også er påvirket af tapningerne på håndvasken ved bad2.

I forlængelse af analysen af forbruget og fordelingen af forbruget for de enkelte tapsteder, undersøges de samme udvalgte nøgletal for boligen, som der blev undersøgt for Kærhavebakken. Nøgletallene er igen baseret på alle de enkelte tapninger henover hele måleperioden, hvor

gennemsnitsværdier for hvert tapsted er angivet i Tabel 6.2.

Tabel 6.2: Nøgletal for tapsteder baseret på målinger ved Kildebjerg Søvej. Alle nøgletal er angivet som gennemsnitsværdier pr. tapning. *Resultater angives pr. vask.

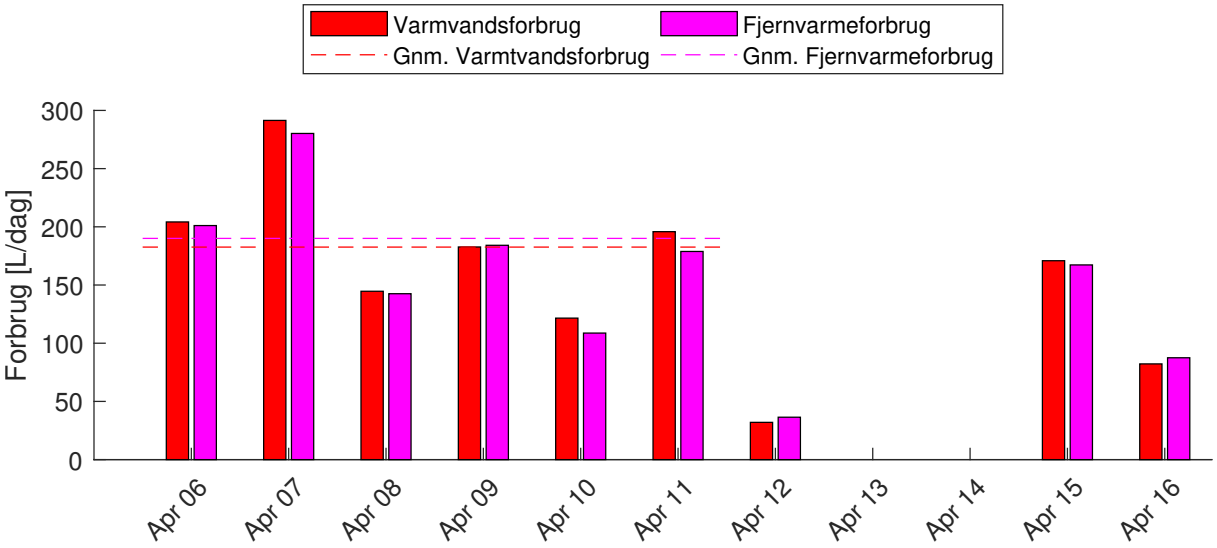
	Antal tapninger	Tapninger pr. dag	Flow [L/min]	Forbrug [L]	Temperatur [°C]	Varighed [mm:ss]
KV	306	10,9	5,1	0,9	29,3	00:10
HV bad1	27	0,9	3,7	0,4	25,6	00:07
BR bad1	-	-	-	-	-	-
HV bad2	348	12,4	4,3	0,7	23,7	00:10
BR bad2	21	0,8	8,1	63,6	40,4	08:01
HV bryg.	14	0,5	4,6	0,5	23,3	00:06
OM*	8	0,1	2,7	3,0	16,8	180:00

I modsætning til Kærhavebakken fremgår det af Tabel 6.2, at det for Kildebjerg Søvej ikke er køkkenvasken, der har det største antal af tapninger, men derimod håndvasken på bad2, badeværelset ved soveværelset. Det høje antal af tapninger på håndvasken på bad2 indikerer sammen med de lavere antal af tapninger på håndvasken på bad1, at begge beboere benytter badeværelset i forbindelse med soveværelset. I overensstemmelse med den ene beboers sportsaktiviter indikere antallet af tapninger pr. dag for bruseren på bad2 også, at det kun er den ene beboer, der bader hjemme, ca. 1 gang pr. dag. Ligesom for Kærhavebakken er det bruseren på bad2, der har den længst gennemsnitlige varighed pr. tapning og derved også det største forbrug. Sammenlignet med Kærhavebakken tyder antallet af tapninger på køkkenvasken pr. dag på, at beboerne ved Kildebjerg Søvej ikke benytter køkkenet i ligeså høj grad idet antallet af tapninger pr. dag kun er en tredjedel sammenlignet med Kærhavebakken. En årsag til dette kan være at beboerne har en madordning, der gør at de flere gange om ugen ikke laver mad hjemme og derfor primært kun tapper vand i køkkenet om morgenen.

6.3 Vandforbrug ved Petersborgvej

Den sidste bolig, der analyseres i dette kapitel, er boligen beliggende på Petersborgvej, hvor målinger af vandforbruget kun blev foretaget i teknikrummet henover en måleperiode på 11 dage, og disse kun for varmtvands- og fjernvarmeforbruget. Derfor er det ikke muligt i dette tilfælde at sammenholde målinger foretaget i teknikrummet med målinger foretaget ved tapsteder. På Figur 6.7 ses resultatet af forbruget af både varmt vand og fjernvarme registreret ved målinger med KATflows placeret i teknikrummet, se Figur 3.9 på side 22.

Af Figur 6.7 fremgår det, at forbruget af varmt vand og fjernvarme er næsten identisk med et gennemsnitligt forbrug på hhv. 183 L/dag og 190 L/dag. Som angivet på figuren er gennemsnittet kun udregnet for de første seks dage i måleperioden, grundet udfordringer med Wi-Fi'et i boligen, hvorfor målingerne i den sidste perioden ikke afspejler forbruget på dagsbasis. For boligen på Petersborgvej ligger varmtvandsforbruget en anelse højere end den maksimale værdi jf. SBi 213 [2018] på 164 L/bolig/dag. Med boligens fire personer fås et varmtvandsforbrug på 46 L/pers./dag, hvilket også ligger en smule højere end værdien angivet af Jensen et al. [2011] på 40 L/pers.dag. Så selvom varmtvandsforbruget på Petersborgvej er markant højere sammenlignet med de to forrige boliger, er det alligevel den bolig, hvor forbruget kommer tættest på værdierne fra litteraturgennemgangen.



Figur 6.7: Overordnet forbrug baseret på målinger i teknikrummet.

Årsagen til det høje varmtvandsforbruget for Petersborgvej sammenlignet med de to forrige boliger, kan skyldes beboernes forbrugsmønster. På baggrund af udtagelser fra beboerne, går alle fire beboere i bad derhjemme og børnene ofte i badekarret placeret på boligens 1. sal. På baggrund af analyserne ved tapstederne for de to tideligere boliger fremgik det, at varmtvandsforbruget i høj grad er styret af, hvor meget badene bliver brugt. For både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej fremgår af nøgletallene, at der tappes ca. 60 L vand totalt for et gennemsnitsbad med et varmtvandsforbrug der udgør ca. 70%. En anden årsag til, at varmtvandsforbruget for Petersborgvej er højere, er alderen på brugsvandssystemet. Ved installation af KATflows'ne blev det observeret, at flowet ved tapstederne var væsentligt lavere sammenlignet med de to forrige boliger og at boligen ikke lever op til kravet om en ventetid på maksimalt 10 sek. En lang ventetid vil minimere komforten og samtidig udgøre et stort vandspild, hver gang der ventes på det varme vand.

6.4 Opsummering

I de ovenstående afsnit er koldt og varmtvandsforbrugene samt fordelingen af disse undersøgt for de tre boliger. For hver af de tre boliger er varmtvandsforbruget sat i relation til forbruget dokumenteret ved forskellige studier i litteraturgennemgangen, præsenteret i Kapitel 1. Til at sammenligne varmtvandsforbrugene for de tre boliger er disse præsenteret i Tabel 6.3 og sammenholdt med værdierne fra litteraturstudiet.

Tabel 6.3: Opsummering af varmtvandforbruget for de tre boliger sammenholdt med udvalgte værdier fra litteraturstudiet.

	Varmtvandsforbrug		
	[L/bolig/dag]	[L/pers./dag]	[L/m^2 år]
Kærhavebakken	88	22	166
Kildebjerg Søvej	44	22	101
Petersborgvej	183	46	525
	[SBi 213, 2018]	[Jensen et al., 2011]	[Bygningsreglementet, 2018]
Litteraturstudie	164	40	250

Som det fremgår af Tabel 6.3 er varmtvandsforbruget i både [L/bolig/dag] og [L/pers./dag] for Petersborgvej det, der ligger tættest på varmtvandsforbrugene angivet i litteraturstudiet, mens de to andre boliger har et væsentligt lavere forbrug. Selvom der på Kærhavebakken bor to personer mere end ved Kildebjerg Søvej, er varmtvandsforbruget kun dobbelt så højt angivet i [L/bolig/dag], mens forbruget angivet i [L/pers./dag] er ens for de to boliger. Undersøges varmtvandsforbruget ift. Bygningsreglementets standardværdi på 250 L/m^2 år fremgår det af tabellen, at ingen af de tre boliger har et varmtvandsforbrug, der stemmer overens med denne værdi. Boligen på Petersborgvej er den mindste af de tre boliger, med et boligareal på 127 m^2, og er samtidig boligen med det højeste varmtvandsforbrug, hvorfor forbruget angivet i [L/m^2 år] er over dobbelt så højt som værdien angivet i Bygningsreglementet. På baggrund af resultaterne i Tabel 6.3 kan det diskuteres, hvorvidt standardværdien fra Bygningsreglementet er den mest optimale enhed at angive varmtvandsforbruget i. For alle tre boliger er 6 - 7 tapsteder tilsluttet varmt vand, hvorfor forbruget måske nærmere er styret af antallet af personer i boligen samt beboernes vaner og ikke hvor stor boligen er. Samtidig indikerer resultaterne for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, at forbruget er væsentligt lavere sammenlignet med litteraturstudiet, hvorfor det kan argumenteres for at standardværdien er for høj ift. nybyggeri.

Varmtvandsforbruget i en bolig er styret af mange forskellige faktorer, hvorfor målinger hos den enkelte husstand er en nødvendighed, hvis en nøjagtig værdi ønskes angivet. Flere studier har undersøgt varmtvandsforbruget i relation til socialkulturelle aspekter, som eksempelvis økonomi, vaner og religion, hvilket alle er aspekter, der varierer fra husstand til hustand, og dette gør det derfor endnu sværere at forudsætte varmtvandsforbruget. Herudover spiller udformningen og alderen af brugsvandssystemet også en stor rolle for forbruget, idet ældre brugsvandsinstallationer eksempelvis kan være dårligt isolerede, tilkalkede eller tærede, hvormed der fås et uønsket vandspild grundet lange ventetider og reduceret flow. Dette er formodentligt også noget af forklaringen på det væsentlig højere varmtvandsforbrug for Petersborgvej, idet boligen er fra 1921 og brugsvandssystemet bærer præg af reduceret flow og lange ventetider.

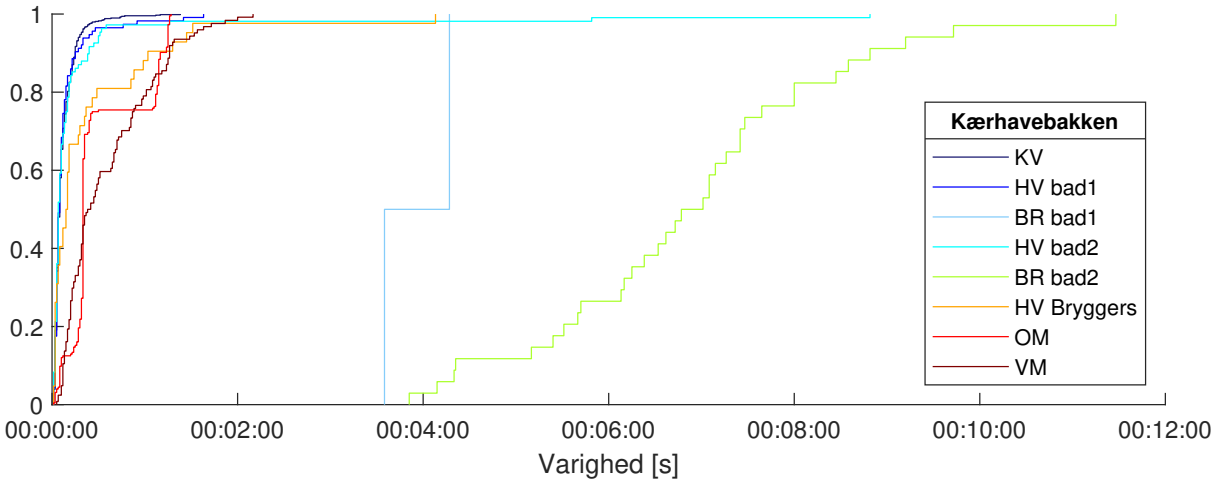
Baseret på målingerne foretaget i løbet af projektperioden konkluderes det, at standardværdien på 250 L/m^2 år benyttet til energiberegningen ikke stemmer overens med varmtvandsforbruget i de tre boliger. For Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej indikerer resultater, at der er potentiale for at reducere standardværdien for nybyggeri, mens forbruget for Petersborgvej indikerer, at varmtvandsforbruget for ældre boliger ikke lever op til standardværdien for Bygningsreglementet. Endeligt konkluderes det, at flere målinger er nødvendige, hvis standardværdien til energiberegningen på sigt skal kunne reduceres for nybyggeri.

Statistisk analyse 7

I forlængelse af det overordnede forbrug samt nøgletallene præsenteret i Kaptitel 6 redegøres der i dette kapitel for en statistisk analyse af udvalgte parametre. Den statistiske analyse har til formål at belyse forskelle mellem de enkelte tapsteder ift. varigheder, temperaturer og energiforbruget til opvarmning af vand. Til analysen benyttes nøgletal beregnet for alle tapninger henover hele måleperioden til at opstille kumulative frekvenskurver for de udvalgte parametre. Idet varigheden og temperaturen i de enkelte tapninger har betydning for energiforbruget til opvarmning af vandet, er disse tre parametre udvalgt til den statistiske analyse. I de følgende afsnit redegøres der separat for de tre parametre for både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, og afslutningsvist opsummeres og sammenholdes resultater mellem de to boliger.

7.1 Varighed pr. tapning

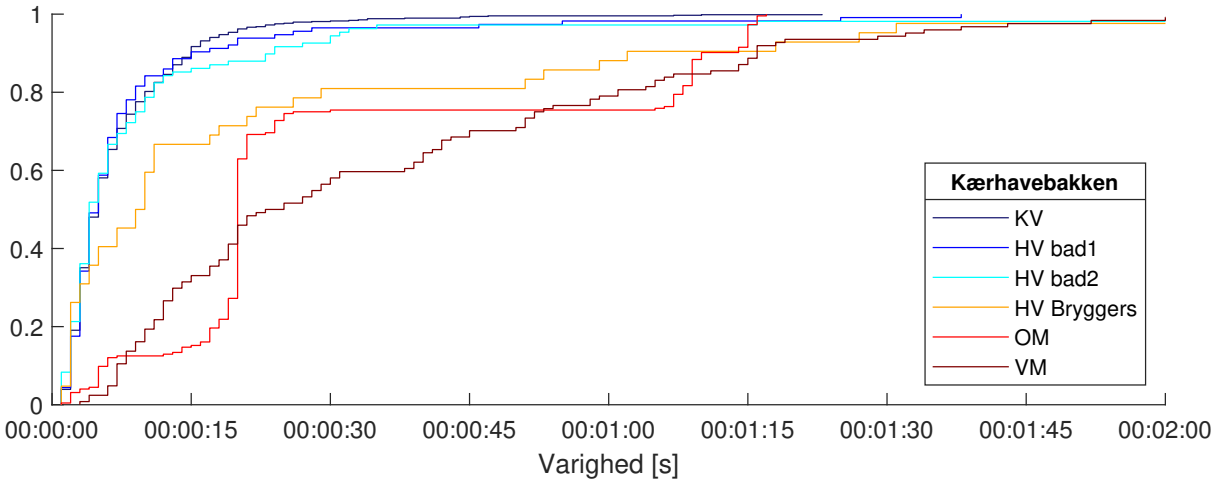
Det første parametre, der undersøges i den statistiske analyse, er varigheden af de enkelte tapninger fordelt over hele måleperioden. Selvom nøgletallene i Kapitel 6 belyste de gennemsnitlige varigheder pr. tapsted, fremgik fordelingen af varighederne over alle de målte tapninger ikke. På baggrund af målingerne ved Kærhavebakken er varigheden af hvert enkelt tapning for alle tapsteder beregnet og præsenteret på Figur 7.1.



Figur 7.1: Kumuleret frekvens af tappevarigheden for alle tapsteder, Kærhavebakken.

Ligesom nøgletallene i Kapitel 6 understregede, fremgår det også tydeligt af Figur 7.1, at de to bade, BR bad1 og BR bad2, er de to tapsteder med de længste varigheder pr. tapning. Forskellen mellem frekvenskurverne for de to brusere skyldes antallet af tapninger registreret henover måleperioden, hvor det af figuren fremgår, at der i alt kun blev registreret to bade for bruseren på bad1. Idet der kun blev registreret to målinger for bruseren på bad1, fortæller den

statistiske analyse ikke meget om fordelingen af varigheder sammenlignet med bruseren på bad2. For bruseren på bad2 fremgår det af frekvenskurven, at alle badene havde en varighed på 4 - 12 min. og at 50% af badene havde en varighed over 7 min., svarende til gennemsnitsværdien. Det s-formede forløb af frekvenskurverne indikere samtidig at der er tale om en normalfordeling af varigheden. Af Figur 7.1 fremgår også, at resterende tapsteder havde tappevarigheder på under 2 min., med undtagelse af et par enkelte tapninger på håndvasken i bryggerset og håndvasken på bad2. En forklaring på de længere tapninger på de to håndvaske kunne være, at tapstederne benyttes ved rengøring, hvor varigheden er længere end ved en almindelig håndvask. På bad2 er et akvarie placeret, hvilket også kunne være en forklaring på de længere tapninger på håndvasken, eksempelvis i forbindelse med rengøringen af dette. Til analysen af de resterende tapsteder benyttes Figur 7.2, hvor frekvenskurverne er vist for alle tapninger af under 2 min.

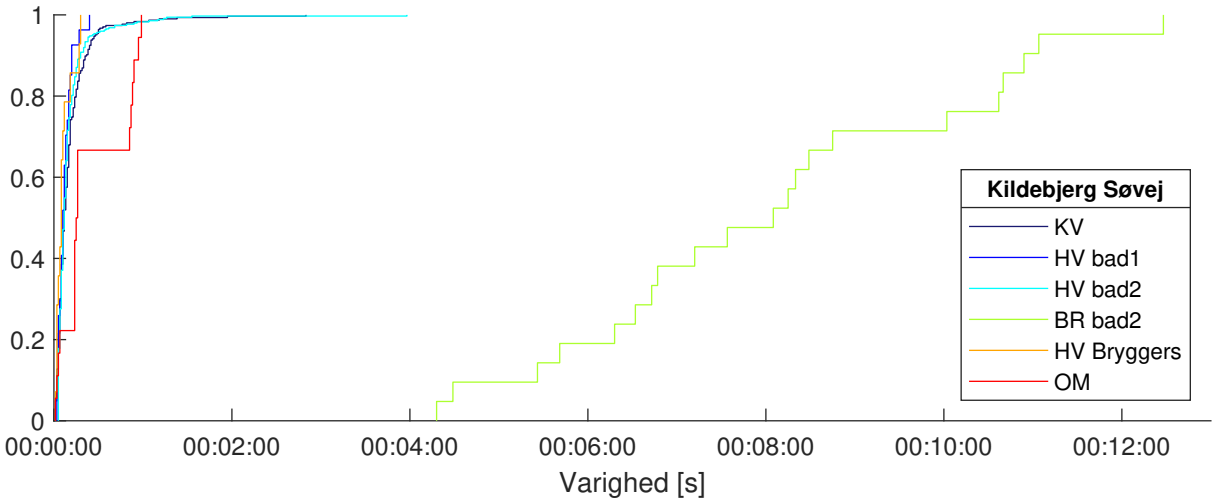


Figur 7.2: Kumuleret frekvens af tappevarigheden for tapsteder med tapninger under 2 min., Kærhavebakken.

I modsætning til frekvenskurven for bruseren på bad2 fremgår det af Figur 7.2, at håndvaskene i boligen ikke har den samme s-formede fordeling, svarende til en normalfordeling, men i stedet har en mere stejl frekvenskurve. Den stejlere frekvenskurve betyder, at størstedelen af tapningerne er af kortere varighed, hvor det af figuren kan konkluderes, at 90% af alle tapningerne på køkkenvasken og håndvaskene på de to badeværelser har en varighed under ca. 15 sek. Varigheden for tapninger på håndvasken i bryggerset er generelt længere end for de resterende håndvaske, hvor 90% af tapningerne har en varighed kortere end 1 min. For opvaskemaskinen varierer tappevarigheden af de enkelte tapninger mere, og det vandrette stykke af kurven indikerer, at ca. 75% af tapningerne er under 30 sek., mens de resterende 25% har en varighed over 1 min. og 10 sek. En forklaring på dette kan være, at det samme program ofte benyttes, hvor opvaskemaskinen eksempelvis har flest korte tapninger og enkelte lange når servicet skylles af. For vaskemaskinen forekommer også enkelte vandrette kurver, men ikke i samme grad som for opvaskemaskinen. Dette kan skyldes en større variation af programmer anvendt for vaskemaskinen eller at varigheden på en vaskemaskine generelt har større variation sammenlignet med en opvaskemaskine.

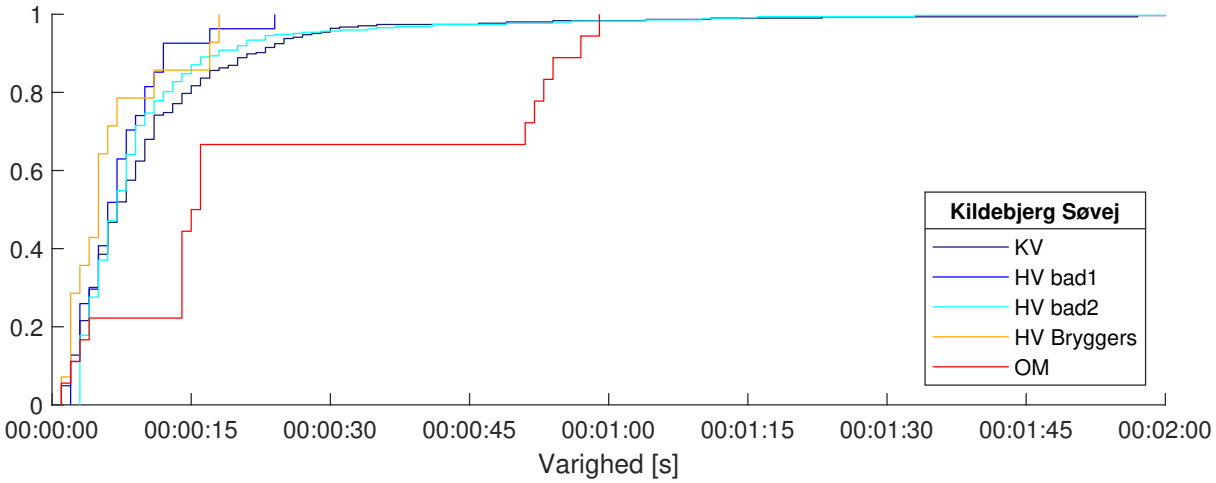
I forlængelse af den statistiske analyse for varighederne ved tapsteder for Kærhavebakken, undersøges varighederne på samme vis for tapstederne ved Kildebjerg Søvej. Baseret på målinger henover hele måleperioden er varigheden pr. tapning for de enkelte tapsteder beregnet, hvor resultater fremgår af Figur 7.3. Idet der ikke blev registreret tapninger på bruseren for bad1,

badeværelset i gangen, er dette tapsted undladt i analysen for Kildebjerg Søvej.



Figur 7.3: Kumuleret frekvens af tappevarigheden for alle tapsteder, Kildebjerg Søvej.

I tråd med analysen for Kærhavebakken fremgår det af Figur 7.3, at de længste varigheder for boligen på Kildebjerg Søvej også finder sted på bruseren for bad2. Her viser figuren, at badene samlet set havde en varighed mellem 4 min. og 13 min., hvor 50% af badene havde en varighed længere end 8 min. Til analysen af de resterende tapsteder benyttes Figur 7.4, hvor tapstederne med kortere tappevarighed er vist.

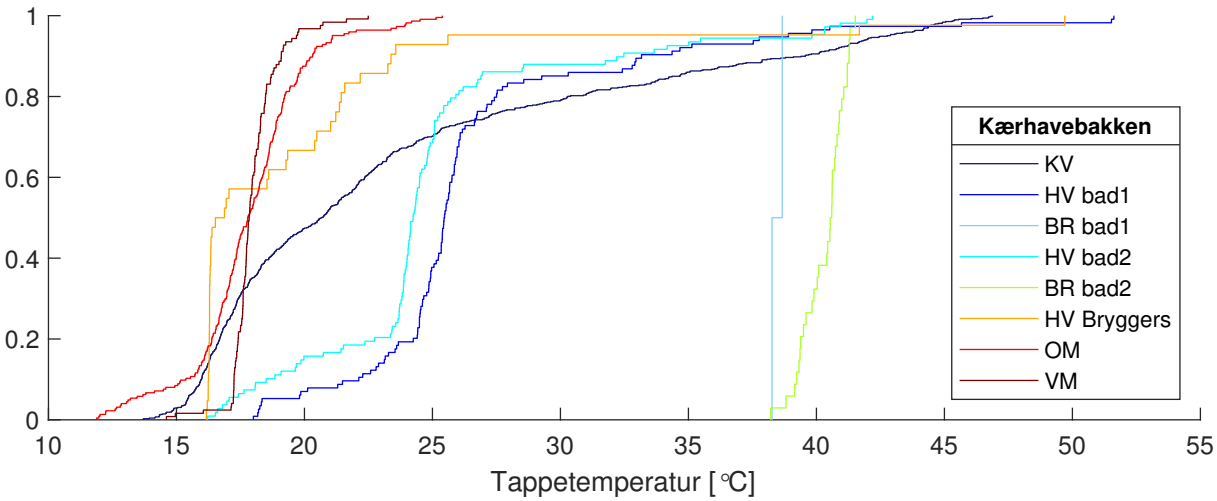


Figur 7.4: Kumuleret frekvens af tappevarigheden for tapsteder med varigheder under 2 min., Kildebjerg Søvej.

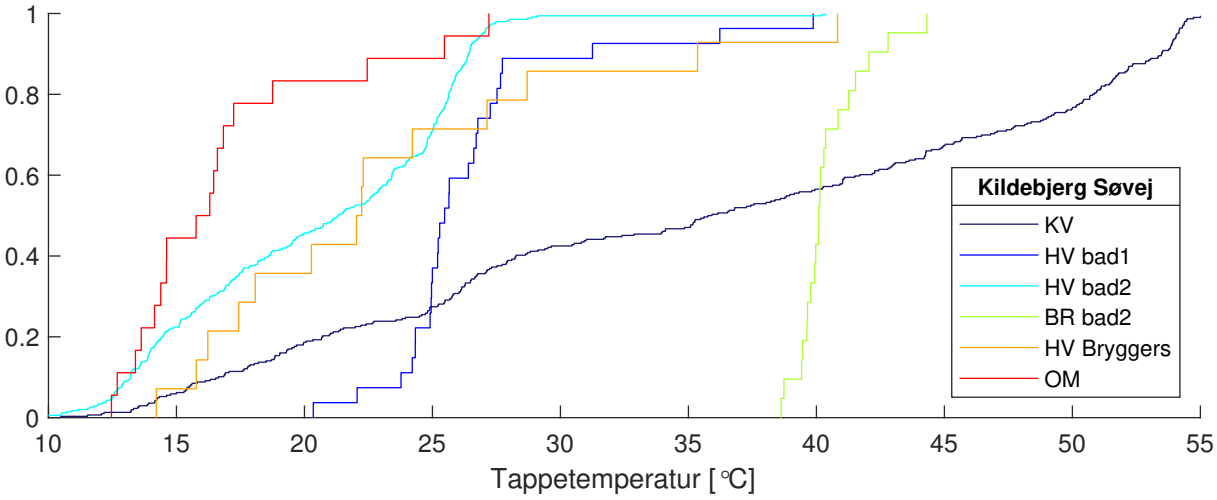
Sammenlignet med varigheden for tapsteder ved Kærhavebakken, fremgår nogle af de samme tenderser på Figur 7.4 for Kildebjerg Søvej. For alle håndvaskene, inklusiv køkkenvasken, ligger varigheden af alle tapningerne under ca. 20 sek. i 90% eller mere af tiden, mens kun ca. 5% af tapningerne på køkkenvasken og håndvasken på bad2 har en varighed længere end 30 sek. Ligesom for Kærhavebakken viser den kumulerede frekvens for opvaskemaskinen ved Kildebjerg Søvej også en større spredning af varigheden. Her er varigheden for tapningerne i ca. 65% af tilfældene under 17 sek., mens de resterende ca. 35% af tapningerne har en varighed over 50 sek.

7.2 Temperatur pr. tapning

Udover varigheden af de enkelte tapninger er det af interesse at undersøge, hvad den gennemsnitlige tappetemperatur var for alle tapninger ved alle tapsteder. Den statistiske analyse af tappetemperaturen benyttes til at undersøge, hvilke tapsteder i boligerne der benytter hhv. de laveste og højeste temperaturer. Sammen med varigheden benyttes tappetemperaturen fremadrettet til at undersøge energiforbruget til opvarmning af vand. Baseret på målinger i de to boliger er tappetemperaturen beregnet og resultater præsenteret på Figur 7.5 og Figur 7.6 for hhv. Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej.



Figur 7.5: Kumuleret frekvens af tappetemperaturen for tapsteder, Kærhavebakken.



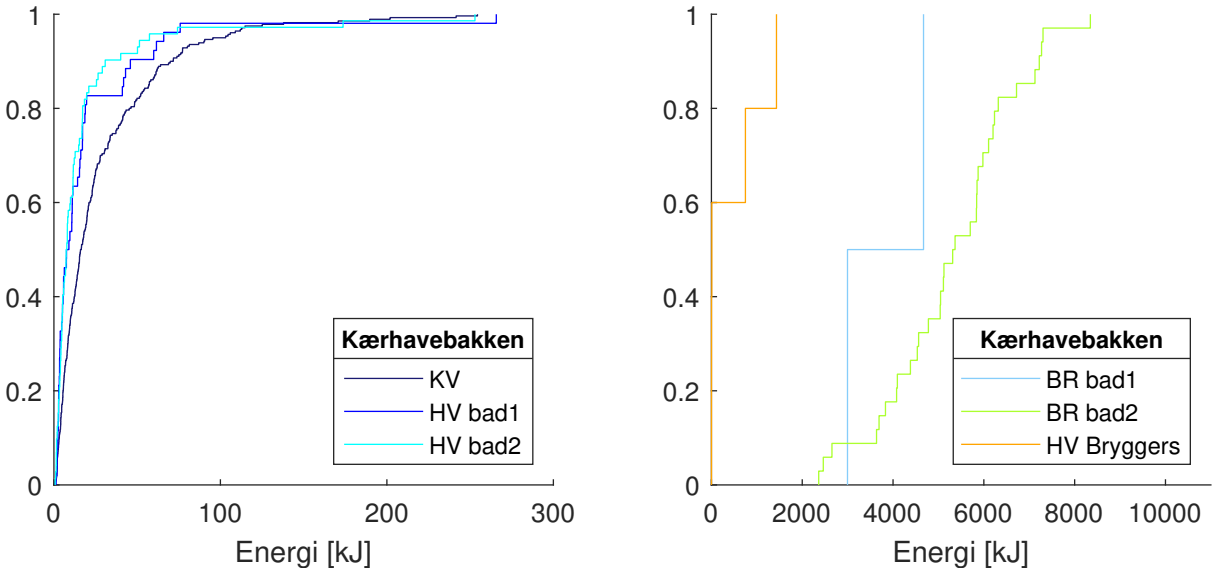
Figur 7.6: Kumuleret frekvens af tappetemperaturen for tapsteder, Kildebjerg Søvej.

Af Figur 7.5 og Figur 7.6 fremgår det, at størstedelen af alle tapningerne på håndvaskene har en tappetemperatur under 30°C, med undtagelse af køkkenvasken. For begge boliger er køkkenvasken det tapsted med størst variation af tappetemperatur og i begge tilfælde også det tapsted, hvor der er blevet tappet det varmeste vand. For Kildebjerg Søvej, se Figur 7.6, har ca. 40% af tapningerne på køkkenvasken en temperatur højere end 42°C, mens temperaturen for Kærhavebakken omvendt kun ligger over 42°C i ca. 10% af tilfældene, se Figur 7.5. Ens for de to boliger er temperaturen ved bade, hvor størstedelen af tapningerne i begge boliger ligger inden

for et interval på 38 - 42°C, kun ved Kildebjerg Søvej er registret få bade med en temperatur højere 42°C. Med undtagelse af køkkenvasken og brusere ligger tappetemperaturen for resterende tapsteder for Kildebjerg Søvej inden for et interval på 10 - 40°C. For Kærhavebakken ligger størstedelen af tapningerne for resterende tapsteder også inden for intervallet på 10 - 40°C, med undtagelse af et par enkelte tapninger ved håndvasken på bryggerset og håndvasken på bad1. For tapstederne der kun er tilsluttet koldt vand, opvaskemaskine og vaskemaskine, fremgår, at temperaturen for begge boliger ligger inden for et interval på 10 - 25°C, idet vandet opvarmes i selve maskinerne.

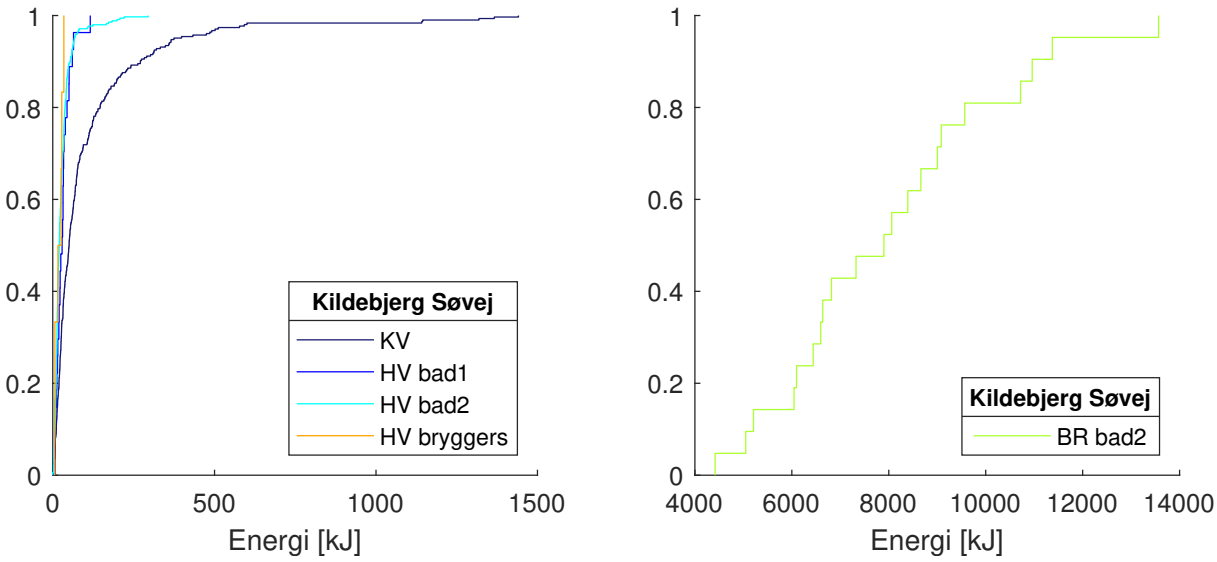
7.3 Energiforbrug pr. tapning

Det sidste parameter, der undersøges i den statistiske analyse for tapstederne, er energiforbruget til opvarmning af vand. Analysen tager, ligesom varigheden og temperaturen, udgangspunkt i målinger af tapningerne fordelt over hele måleperiden, men i dette tilfælde kun for tapsteder tilsluttet varmt vand. Formålet med analysen af energiforbruget er at undersøge, hvor der er størst potentiale for at reducere energiforbruget i de to boliger. Energiforbruget beregnes ud fra den samlede mængde vand i tapningen samt antagelsen om, at vandet opvarmes fra 20°C til middeltemperaturen i tapningen. Fordi energiforbruget ikke beregnes på sekundbasis over hele tappeprofilet for hver tapning, giver denne fremgangsmåde derfor kun et estimat på energiforbruget ved de enkelte tapninger. På Figur 7.7 og Figur 7.8 er det estimerede energiforbrug ved simpel beregning for tapstederne ved hhv. Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej præsenteret.



Figur 7.7: Kumuleret frekvens af det estimerede energiforbrug til opvarmning af vand, baseret på målinger ved tapsteder tilsluttet varmt vand for Kærhavebakken.

Af Figur 7.7 og Figur 7.8 fremgår det, at badene i begge boliger er de tapsteder, der har det største energiforbrug til opvarmning af vandet. Dette skyldes primært den længere varighed pr. tapning, hvorfor der tappes mest varmt vand her sammenlignet med andre tapsteder. For håndvasken ved bryggerset for Kærhavebakken fandt to enkelte varmtvandstapninger af længere varighed og med tappetempertur over 40°C sted henover måleperioden, hvorfor et energiforbrug større end 1.000 kJ fremgår til højre af Figur 7.7. Med undtagelse af køkkenvasken for Kildebjerg



Figur 7.8: Kumuleret frekvens af det estimerede energiforbrug til opvarmning af vand, baseret på målinger ved tapsteder tilsluttet varmt vand for Kildebjerg Søvej.

Søvej har resterende tapsteder tilsluttet varmt vand i begge boliger alle et energiforbrug under 300 kJ i 100% af tilfældende. Det lavere energiforbrug skyldes særligt den kortere varighed af tapningerne, men også at tappetemperaturen kun i få tilfælde ligger højere end 40°C. Til venstre på Figur 7.8 fremgår, at energiforbruget til opvarmning af vand ved køkkenvasken i ca. 10% af tilfældende ligger højere end 300 kJ, hvilket skyldes den højere tappetemperatur som angivet på Figur 7.6.

7.4 Opsummering

I de ovenstående afsnit er en statistisk analyse udarbejdet for boligerne beliggende på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, hvor varighed, temperatur og energiforbrug pr. tapning er undersøgt. I begge boliger forekommer den længste varighed ved bruseren, mens varigheden for resterende tapsteder kun i få tilfælde er længere end 30 sek. For tappetemperaturen er det for Kærhavebakken håndvaskene, der benytter de højeste vandtemperaturer, mens det for Kildebjerg Søvej kun er køkkenvasken, hvor der tappes vand varmere end 45°C, hvilket sker i ca. 35% af tilfældene. Derfor er energiforbruget til opvarmning af vand højere for køkkenvasken ved Kildebjerg Søvej end for Kærhavebakken, mens bruserne i begge boliger er det tapsted, der har det højeste energiforbrug som følge af de lange varigheder. På baggrund af analysen konkluderes det, at der bør være særligt fokus på bruserne i de to boliger, hvis energiforbruget til opvarmning af vand skal reduceres. Herudover kan der være potentiale i at undersøge muligheden for at reducere energiforbruget for køkkenvasken ved Kildebjerg Søvej, idet tappetemperaturen er væsentligt højere sammenlignet med resterende tapsteder. Ligesom for det overordnede forbrug, præsenteret i Kapitel 6, skal det nævnes, at flere målinger vil validere den statistiske analyse, idet en stor population altid er ønsket ved statistiske analyser.

Forbrugsprofiler 8

For boligerne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej er vandforbruget dokumenteret pr. tapsted, og de målte data bl.a. anvendt til en række statistiske analyser præsenteret i Kapitel 7, analyser der er med til at give et større indblik i forbrugstendenserne ved de enkelte tapsteder. I forlængelse af disse analyser kan dataene også benyttes til at få et bedre kendskab til det samlede forbrugsmønster for hver bolig. Derfor foretages der i dette kapitel en undersøgelse af forbrugsprofilerne for hhv. Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej. Her fastlægges tendenser for hverdage og weekender, mens forbrugsprofilerne også sammenlignes mellem de to boliger. Endeligt sammenholdes de fastlagte forbrugsprofiler også med forbrugsprofilerne præsenteret i litteraturgennemgangen.

Før analysen af forbrugsprofilerne for de to husstande, foretages en undersøgelse af opløsningen på det målte data. Her er formålet at fastlægge, hvor stor en betydning opløsningen på det målte data har ift. analyse af tappeprofilet for den enkelte tapning og ved fastlæggelsen af et forbrugsprofil for en hel dag.

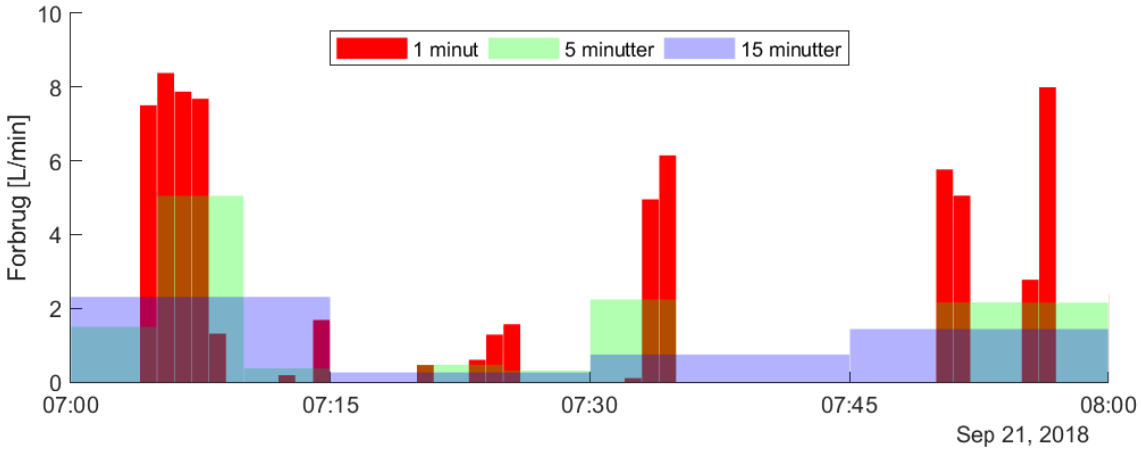
8.1 Opløsning

Kvaliteten på målt data vurderes ikke kun ud fra nøjagtigheden og usikkerheden på dette men også ud fra opløsningen. Alt efter formålet med den enkelte analyse er opløsningen af afgørende betydning for, om dataene er tilstrækkelige og kan bruges til at give den viden, man søger. Med udgangspunkt i det målte data for Kærhavebakken undersøges for det følgende afsnit betydningen af opløsningen på de målte data fra Huba-flowmålerne ift. dokumentation af tappe- og forbrugsprofiler. Dernæst følger en undersøgelse af opløsningen på BMS-systemet for Kildebjerg Søvej. Her er formålet at undersøge, om den anvendte opløsning på 5 min. er tilstrækkelig til, at der også ud fra dette data kan foretages dybdegående analyser af vandforbruget og de enkelte tapninger i husstanden.

8.1.1 Opløsning på flowmålere

Indledningsvist blev det på Figur 1.7 på side 12 præsenteret, at der ikke tidligere er foretaget målinger af vandforbrug med en opløsning på 8 Hz. Det betyder, at alle forbrugsprofiler hidtil er fastlagt ud fra data med en lavere opløsning, ofte minutværdier der efterfølgende opskaleres til timeværdier. Derfor er det interessant at undersøge, hvor stor en betydning opløsningen har på nøjagtigheden af et forbrugsprofil og om tappeprofiler og tendenser vil se anderledes ud, hvis der anvendes en højere opløsning end time- eller minutværdier. Analysen kan samtidig anvendes til at fastlægge, om der for fremtiden skal stilles strengere krav til opløsningen på data anvendt til fastlæggelsen af forbrugsprofiler, således disse bliver mere nøjagtige og afspejler de reelle forbrugsmønstre.

Med udgangspunkt i de målte data fra Kærhavebakken er der på Figur 8.1 vist et eksempel på et forbrugsprofil fra kl. 07:00 - 08:00 for tre forskellige opløsninger; 1 min., 5 min. og 15 min.



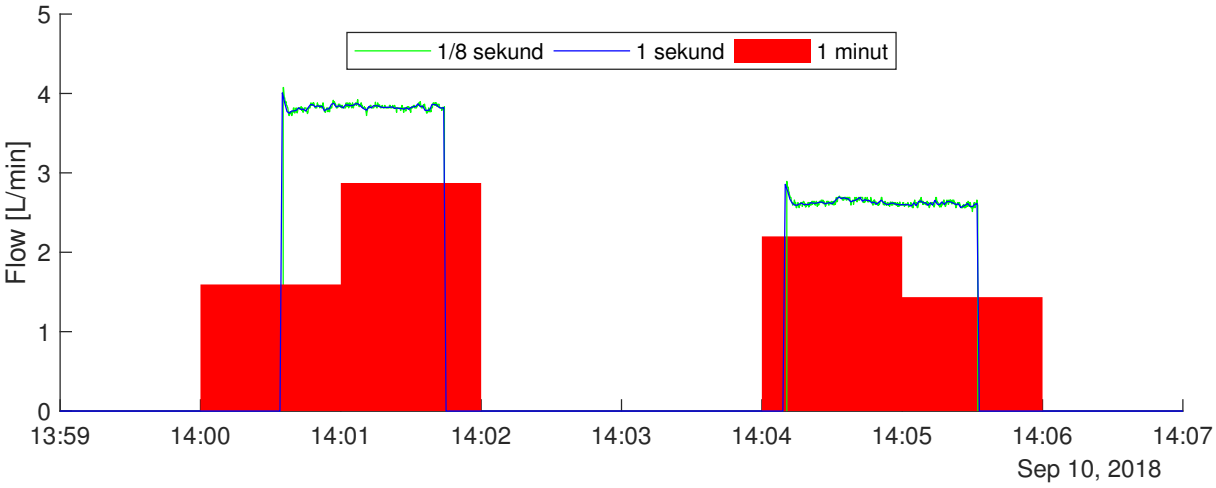
Figur 8.1: Forbrugsprofil vist for opløsninger på hhv. 1 min., 5 min. og 15 min.

På Figur 8.1 fremgår det, hvordan forbrugsprofilet i perioden 07:00 - 08:00 varierer for de tre forskellige opløsninger. Her ses det tydeligt, at opløsningen har betydning for, hvordan tapningerne afbildes på forbrugsprofilet. I perioden 07:00 - 07:15 er der for en opløsning på 15 min. registreret et gennemsnitligt flow på 2,3 L/min. over hele perioden. Ved en opløsning på 1 min. fremgår det, at der ikke kun har fundet én men flere tapninger sted, alle med forskellige flows og varighed. Den første tapning starter 07:04 og varer 5 min., mens der efterfølgende forekommer to tapninger kl. 07:12 og 07:14. Dette fremgår ligeledes ikke ved en opløsning på 5 min. Her fremgår det, at der igen finder tapninger sted over alle 15 min., dog med et forskelligt flow for hvert 5. min. Selvom opløsningen på 5 min. indikerer, at flowet er større i perioden 07:05 - 07:10 end for de to andre intervaller, indikerer denne ikke noget om, hvor lange tapningerne har været. Derfor forekommer der unøjagtigheder i forbrugsprofilet, når en opløsning på 5 min. anvendes, også selvom denne er mere nøjagtig end en opløsning på 15 min.

Den samme konklusion gør sig gældende for de resterende 45 min. vist på Figur 8.1. Her indikerer opløsningen på 15 min. igen, at der er et forbrug over alle 45 min., mens det ud fra opløsningen på 1 min. i stedet kan ses, at der har fundet flere forskellige tapninger sted, og at der også har fundet en længere pause sted fra 07:34 - 07:50. Selvom opløsningen på 5 min. opfanger nogle af disse pauser, er der alligevel væsentlige forskelle mellem forbrugsprofilerne, bedst illustreret i perioden 07:20 - 07:30, hvor 5 min. opløsningen indikerer et forbrug i alle 10 min., mens det ud fra opløsningen på 1 min. kan ses, at der kun har været flow i maksimalt 4 min. Alle disse informationer går tabt, når ikke opløsningen er høj nok, og i sidste ende fører det til forkerte og upræcise forbrugsprofiler.

Konklusionen på de tre opløsninger vist på Figur 8.1 er derfor, at hverken en opløsning på 5- eller 15 min. er høj nok, når detaljerede tappe- og forbrugsprofiler skal fastlægges for en husstand. Selvom det samlede forbrug i sidste ende bliver ens for alle tre opløsninger, er der for store unøjagtigheder i dataene til, at forbrugsprofilet vil afspejle det reelle forbrug for boligen. Med en opløsning på 15 min. har der for den viste time fundet fire forskellige tapninger sted, mens en opløsning på 1 min. angiver dobbelte sted. Dette understreger dermed, at opløsningen som minimum skal være 1 min., hvis en dybdegående analyse af de enkelte tappeprofiler skal foretages.

Selvom det er konstateret, at opløsningen på 1 min. er mere nøjagtig end opløsninger på hhv. 5 og 15 min., er det ikke ensbetydende med, at denne er optimal. Der hersker fortsat flere usikkerheder i forbrugsprofilet for 1 min., bl.a. at denne opløsning indikerer, at tapningerne altid varer 1 min., hvilket ikke er korrekt. Som det blev præsenteret i Kapitel 6 omhandlende det overordnede forbrug, er der for mange tapsteder en gennemsnitlig varighed på under 10 sek. og dermed ikke et helt min., som opløsningen ellers angiver. Dertil er det med en opløsning på 1 min. ej heller muligt at fastlægge, om der har fundet én eller flere tapninger sted i det pågældende minut. Hertil kræves en endnu højere opløsning, hvis det skal kunne dokumenteres, hvor mange tapninger der har fundet sted indenfor 1 min. Derfor sammenlignes opløsningen på 1 min. med opløsninger på hhv. 1/8 sek. og 1 sek. Et eksempel på dette er vist på Figur 8.2.



Figur 8.2: Forbrugsprofil vist for opløsninger på hhv. 1/8 sek., 1 sek. og 1 min.

Af Figur 8.2 fremgår det, at der på trods af bedre overensstemmelser mellem de tre opløsninger forsat er afvigelser mellem opløsningen på 1 min. og de to opløsninger på sekundbasis. For tapningen vist i perioden 14:00 - 14:02 angiver en opløsning på 1 min., at denne har en varighed på 2 min. Ud fra opløsningerne på sekundbasis fremgår det dog, at den faktiske varighed kun er ca. 1 min. og at der for hele tapningen har været et konstant flow. Det samme gør sig gældende for tapningen fra 14:04 - 14:06. Selvom der for de viste eksempler kun finder to længere tapninger sted, kunne der lige så vel have fundet flere korte tapninger sted indenfor det samme minut, hvilket ikke vil være muligt at fastlægge ved en opløsning på 1 min.

Derfor er konklusionen, at selvom forskellene mellem en opløsning på 1 min. og opløsningerne på sekundbasis er betragteligt mindre end forskellene mellem 1 min., 5 min. og 15 min., er der fortsat væsentlige detaljer omkring antallet af tapninger, varigheden og flowet, der vil gå tabt ved en opløsning på 1 min. Derfor er en opløsning på 1 min. ligeledes ikke er tilstrækkelig til undersøgelser af tappeprofiler og generering af forbrugsprofiler.

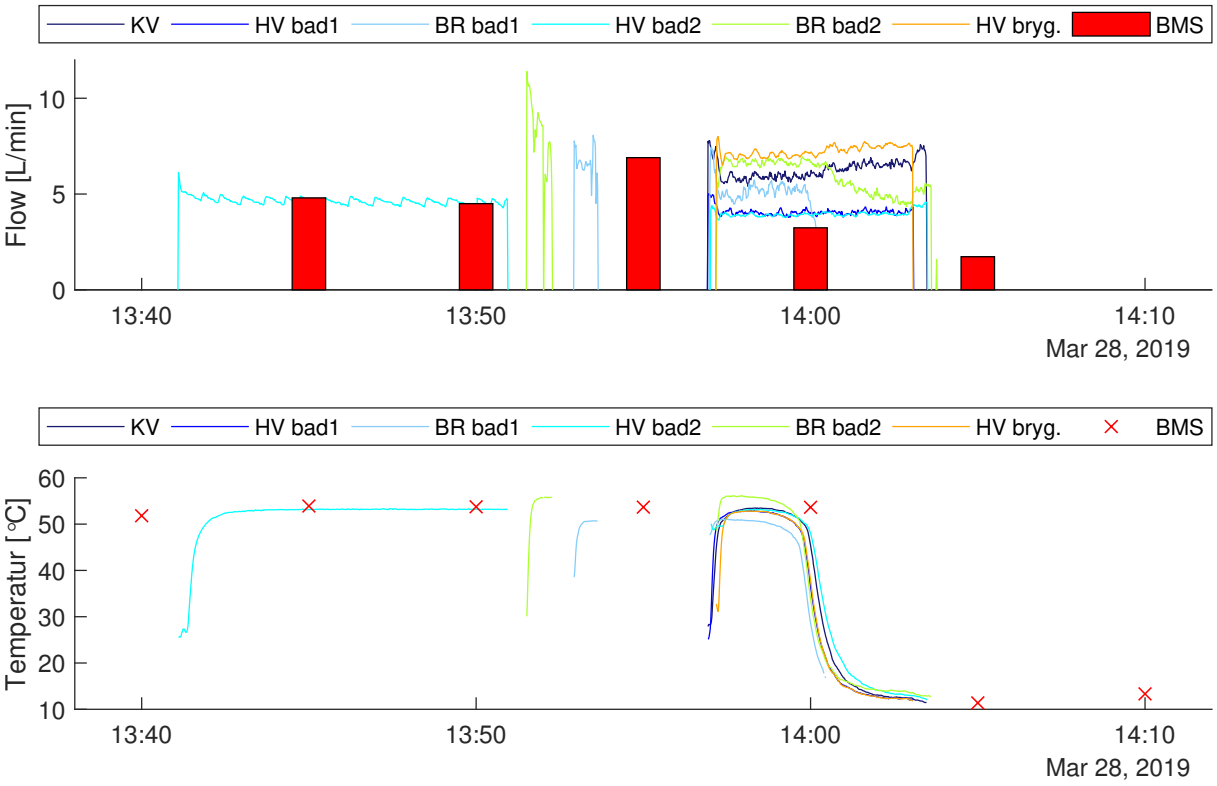
Sammenlignes resultaterne mellem en opløsning på 1/8 sek. og 1 sek., er der ingen væsentlig forskelle at spore. Her er tappeprofilet identisk, både hvad angår varighed og flow. Derfor vurderes det, at en opløsning på 1 sek. er tilstrækkelig til at generere realistiske tappe- og forbrugsprofiler for en bolig, som afspejler det nøjagtige forbrug. Derfor er alt indsamlet data fra Huba-flowmålerne af praktiske årsager omregnet fra værdier på 1/8 sek. til middelværdier for 1 sek.

8.1.2 Opløsning på BMS-system for Kildebjerg Søvej

Boligen på Kildebjerg Søvej har et BMS-system installeret, der registrerer data for en række indeklimaparametre og for energisystemerne installeret i boligen. Her logges bl.a. flow, temperatur og mængde for det samlede vandforbrug, koldt- og varmt brugsvand samt fjernvarmeforbruget. Dataene er blandt andet brugt i Kapitel 6 til at sammenlige boligens vandforbrug registreret i teknikrummet med det målte vandforbrug ved tapstederne.

Opløsningen på det loggede data fra BMS-systemet er 5 min., hvorfor der for hvert 5. min. logges øjebliksværdier for flow og temperatur, mens mængder summeres op hvert 5. min. med den tidligere opløsning på 10 L. Mens det i Kapitel 6 blev konkluderet, at opløsningen fint egner sig til registrering af mængder, f.eks. forbrug af brugsvand, er der større usikkerhed om, hvorvidt opløsningen egner sig til mere detaljerede analyser af de enkelte tappe- og temperaturprofiler samt til fastlæggelse af effektiviteten for brugsvandssystemet.

Derfor blev der i forbindelse med monteringen af Huba-flowmålerne ved de enkelte tapsteder foretaget en kontroltest, hvor der for hvert tapsted åbnes for det varme vand over flere perioder. Ud fra dataene registreret af flowmålerne haves dermed et detaljeret forløb af tapningerne, hvor værdier er logget hver 1/8 sek. Herefter sammenlignes målingerne ved tapstederne med data logget for BMS-systemet med en opløsning på 5 min. På den måde kan det sammenlignes, om de loggede værdier for flow og temperaturer stemmer overens med data fra flowmålerne, og om BMS-systemets opløsning på 5 min. er tilstrækkelig til at beskrive forløbet korrekt. Figur 8.3 viser kontroltestene foretaget den 28. marts i perioden 13:40 - 14:10, hvor data for alle seks flowmålere og BMS-systemet er vist.



Figur 8.3: Sammenligning af målinger for flow og temperatur foretaget ved tapstederne og data logget via boligens BMS-system.

Af figuren fremgår det, at BMS-systemet logger værdier, der stemmer nogenlunde overens med målingerne registreret af flowmålerne, både hvad angår flow og temperatur. De to første målinger er begge registreret, mens der er foretaget en tapning på håndvasken for bad2, hvorfor flowet er identisk for begge. Ved den tredje måling afviger BMS-værdien, da denne registrerer et flow uden at dette forekommer ved et af tapstederne. Det kan skyldes, at tidssynkroniseringen ikke er nøjagtig for BMS-systemet. Idet den loggede øjebliksværdi for BMS-systemet stemmer fint overens med flowet registreret for bruseren på bad1 umiddelbart før, formodes det, at BMS-systemets tid er skubbet med ca. 1 min. For de to sidste registreringer forekommer der større afvigelser mellem dataene, hvor værdierne logget i BMS-systemet ligger betragteligt lavere end flowet registreret ved tapstederne. Idet BMS-systemet kun logger en øjebliksværdi, er det svært at skønne, om der har været et udfald på den fjerde logning, idet flowet er konstant i minutterne inden logningen. Forskelle på den femte logning formodes at skyldes, at der bliver lukket for vandet ved de enkelte tapsteder umiddelbart omkring tidspunktet for logningen. Derfor kan den loggede værdi på ca. 2 L/min. afspejle en øjebliksværdi mens flowet er ved at gå i 0 L/min.

For temperaturen er der ligeledes fin overensstemmelse mellem de loggede data. Her ligger temperaturværdierne, grundet varmetabet mellem teknikrummet og tapstederne, lidt højere for BMS-systemet sammenlignet med værdierne registreret ved de enkelte tapsteder.

Idet der er tale om kontroltests udført, mens flowmålerne blev monteret, er varigheden af tapningerne bevidst gjort tilstrækkeligt lange til, at korrekte værdier vil blive logget i teknikrummet. Der er som følge af tidsforskydelse kun tale om meget få afvigelser mellem det målte data fra BMS-systemet og flowmålerne. Dog afspejler dataene fra BMS-systemet, at der er tale om øjebliksværdier og indeholder ingen informationer omkring varigheden af de enkelte tapninger. Derfor er der en stor risiko for, at korte tapninger vil kunne finde sted indenfor et interval af 5 min. og derved ikke blive opfanget af BMS-systemet, udover at den tappede mængde vil blive medregnet i den samlede mængde. Ligeledes er der en usikkerhed, idet der er tale om øjebliksværdier og ikke gennemsnitsværdier for de 5 min. Som tilfældet er det med den fjerde logning af flowet, kan der opstå situationer, hvor BMS-systemets værdier bliver registreret umiddelbart ved en tapnings ophør, hvorfor det viste flow vil ligge lavere end flowet nogle få sekunder inden. Ligeledes kan der forekomme tilfælde, hvor der registreres en stor temperaturstigning efter 5 min., men hvor værdien angivet for flowet viser 0 L/min, idet varmtvandstapningen er ophørt igen før BMS-logningen. Endeligt vil det, som konklusion af de mulige scenarier, ikke være muligt at benytte dataene fra BMS systemet til at fastlægge en effektivitet for brugsvandssystemet. Her vil usikkerhederne og den ringe sammenhæng mellem de loggede øjebliksværdier give anledning til urealistiske og ikke-sammenhængende værdier for denne samt temperaturvirkningsgrad.

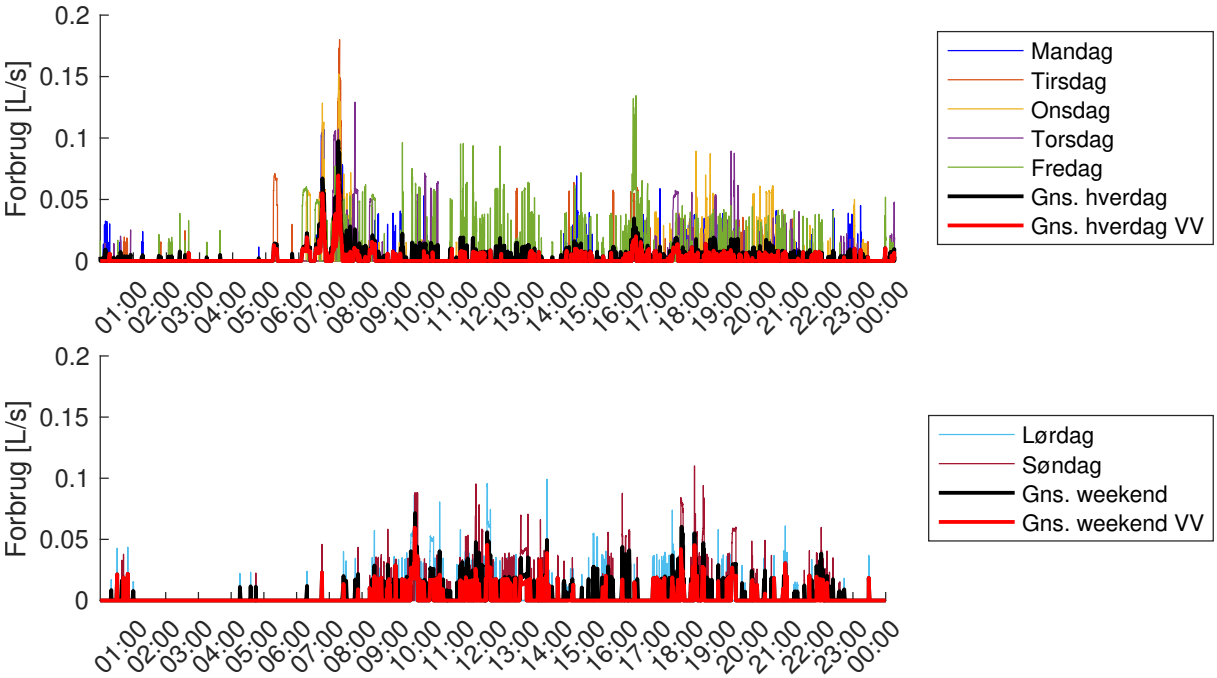
Det skal noteres, at formålet med BMS-systemet og de loggede værdier er at kunne kontrollere systemerne installeret i boligen og registrere de samlede forbrug af vand og varme. Til dette formål er konklusionen, at en opløsning på 5 min. og et spring ift. vandforbrug på 10 L er tilstrækkeligt og giver et nøjagtigt billede af det reelle forbrug. BMS-systemets opløsning på 5 min. egner sig ikke til hverken generering af tappe- og temperaturprofiler eller til analyse af effektiviteten af brugsvandssystemet. Her kræves en markant højere opløsning, således der vil være større sammenhæng mellem de loggede værdier. Derfor foretages genereringen af forbrugsprofilerne for Kildebjerg Søvej i nedenstående udelukkende på baggrund af data logget ved de enkelte tapsteder.

8.2 Forbrugsprofiler

I de følgende afsnit analyseres forbrugsprofilerne for boligenhederne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, og tendenser for boligerne sammenlignes på tværs af hinanden samt med de præsenterede forbrugsprofiler fra litteraturgennemgangen.

8.2.1 Kærhavebakken

I Afsnit 8.1 blev det konkluderet, at en opløsning på 1 min. ikke var tilstrækkelig til analyse af tappeprofiler. I stedet skal der anvendes en opløsning på sekundbasis, da denne afspejler det reelle forbrug med højere præcision. Ud fra dataene indsamlet over hele måleperioden ved Kærhavebakken er der derfor genereret forbrugsprofiler for alle hverdage og weekender samt et gennemsnitsprofil for hver af de to ved brug af en opløsning på 1 sek. Dette er vist på Figur 8.4, hvor det gennemsnitlige varmtvandsforbrug ligeledes er indtegnet.

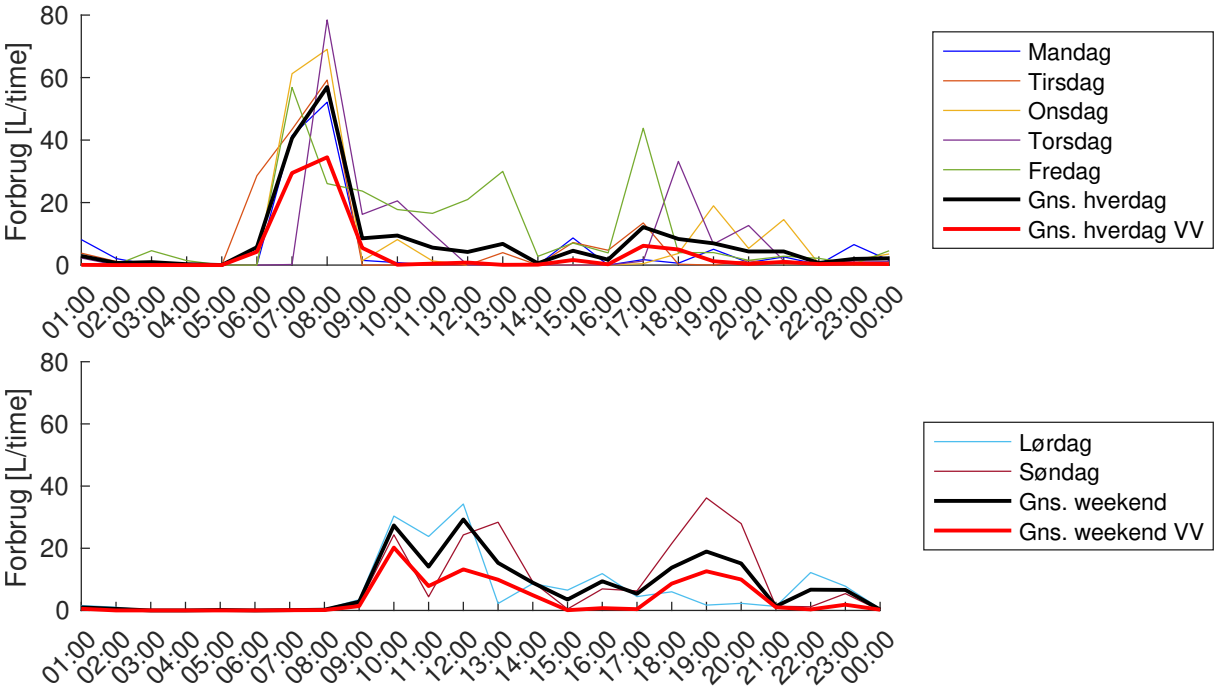


Figur 8.4: Forbrugsprofiler for hverdage og weekender ved en opløsning på 1 sek.

Forbrugsprofilerne viser, hvordan der forekommer tapninger henover hele døgnet for både hverdage og weeekender. For hverdagene fremgår det, at der forekommer et større peak om morgenen fra ca. 06:30 - 07:00, hvilket skyldes familiens rutine med to faste bade om morgenen. Herefter er forbruget væsentligt lavere, ikke bare for perioden 08:00 - 16:00, hvor familien hovedsageligt er på arbejde og i skole, men også for aftentimerne. Selvom der forekommer et peak omkring kl. 16:00, primært grundet et højt forbrug en fredag, så indikerer forbrugsprofilet, at det samlede vandforbrug er meget jævnt fordelt over alle eftermiddag- og aftentimerne og at der ikke forekommer et peak på et bestemt tidspunkt. Koncentrationen af tapninger er højere i perioden fra 18:00 - 19:00, men idet opløsningen er på 1 sek. giver dette ikke noget større peak på figuren, idet tapningerne ikke altid finder sted på nøjagtigt samme tidspunkt. Det noteres også, at særligt forbruget alle fredage skiller sig ud fra det resterende forbrugsprofil. Dette skyldes, at det ene familiemedlem ofte arbejder hjemmefra om fredagen, hvorfor primært opvaskemaskinen og vaskemaskinen men også andre tapsteder benyttes her. Weekendprofilet vist nederst på Figur 8.4

afviger en anelse fra hverdagsprofilet. Særligt peaket om morgenen er forskudt med 2 - 3-timer, mens forbruget generelt ligger højere for alle dagstimerne sammenlignet med hverdagen. Dertil er det lettere at identificere et aftenpeak omkring kl. 18:00 for weekenden.

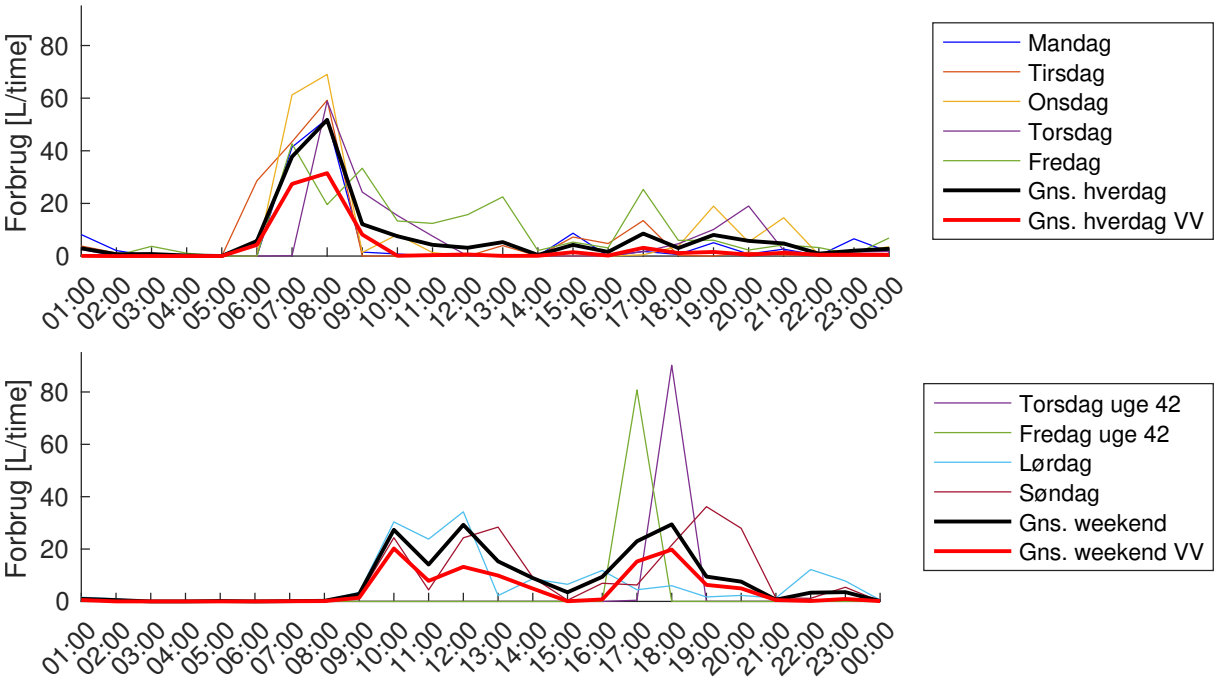
Forbrugsprofiler indeholder mange brugbare og nyttige informationer, særligt med tanke på, hvordan fremtidens varme- og brugsvandssystemer skal udformes. For de viste forbrugsprofiler er vurderingen dog, at opløsningen på 1 sek. gør, at profilerne fremstår mere utydelige end ved lavere opløsninger. Selvom tendenser kommer til udtryk, er peaks ikke så fremtrædende som ved lavere opløsninger, hvor forbruget samles i intervaller af eksempelvis en time. Det vurderes derfor, at et opløsningen på 1 sek. er essentiel for at opnå korrekte data og ved analyse af de enkelte tapsteder, men at opløsningen ikke bør anvendes til analyse af forbrugsprofiler. Her skal dataene i stedet samles i større tidsmæssige intervaller, således peaks og tendenser er lettere fremkommelige. Derfor er det indsamlede data for Kærhavebakken i stedet summeret op på timeværdier, og nye forbrugsprofiler for både hverdage og weekender er genereret som vist på Figur 8.5.



Figur 8.5: Forbrugsprofiler for hverdage og weekender ved en opløsning på 1 time.

Selvom forbrugsprofilet vist på Figur 8.5 er baseret på det samme data som for det forrige profil, giver dette et mere overordnet overblik over, hvordan tapningerne er fordelt ud på døgnet. Igen fremgår det, at der generelt forekommer et stort peak om morgenen for alle dage grundet familiens morgenrutine med to bade. Herefter falder forbruget i løbet af dagstimerne, mens familien er af sted på job og i skole, inden det stiger igen efter kl. 16:00, hvor familien er hjemme. På trods af inddelingen i timeintervaller viser profilet ikke tegn på et specifikt aftenpeak, hvor familien laver mad og vasker op. I stedet er forbruget mere jævnt fordelt i tidsrummet 17:00 - 21:00. Weekendprofilet viser de samme tendenser, som allerede beskrevet, hvor forbruget om morgenen er rykket med ca. 3 timer ift. hverdagen. Dertil er forbruget i weekenden generelt fordelt mere jævnt over døgnets timer, hvorfor gennemsnitsforbruget i dagstimerne ligger højere for weekenden. Forbruget om aftenen ligger ligeledes højere end for hverdagene, men peaket falder i ca. samme tidsrum som for hverdagene, fra 18:00 til 20:00.

Som det blev nævnt ved forbrugsprofilet med sekundværdier, fremgår det af Figur 8.5, at der om fredagen forekommer et større forbrug midt på dagen end for de resterende hverdage, idet et medlem af familien ofte arbejder hjemmefra. Dertil fremgår det også, at der ved gennemsnitsprofilerne for torsdag og fredag forekommer et større peak hhv. kl. 17:00 og 18:00, som skiller sig væsentligt ud fra de resterende hverdage og gennemsnitsprofilet for disse. De to peaks skyldes målinger foretaget i efterårsferien, hvor familien har været hjemme torsdag og fredag. Her kan det konkluderes, at tendenserne ikke er de samme for hverdage og feriedage, hvorfor profilet ser anderledes ud. Det vælges derfor at flytte de to feriedage over i profilet for weekenden, hvor resultatet af de to nye forbrugsprofiler er vist på Figur 8.6.



Figur 8.6: Opdaterede forbrugsprofiler for hverdage og weekender, hvor torsdag og fredag i efterårsferien er inkluderet i weekendprofilet.

Af Figur 8.6 fremgår det, at der, ved at flytte de to pågældende dage over på weekendprofilet, fås et mere jævnt profil for hverdagene, mens det ses at peakene for torsdag og fredag i efterårsferien passer fint ind i tendenserne for weekenden. At værdierne for torsdag og fredag i efterårsferien begge ligger langt over de resterende profiler skyldes, at forbrugsprofilerne for alle ugedage er regnet som gennemsnitsværdier for tre målte dage henover hele måleperioden, mens værdierne for torsdag og fredag i efterårsferien kun er baseret på én dags måling.

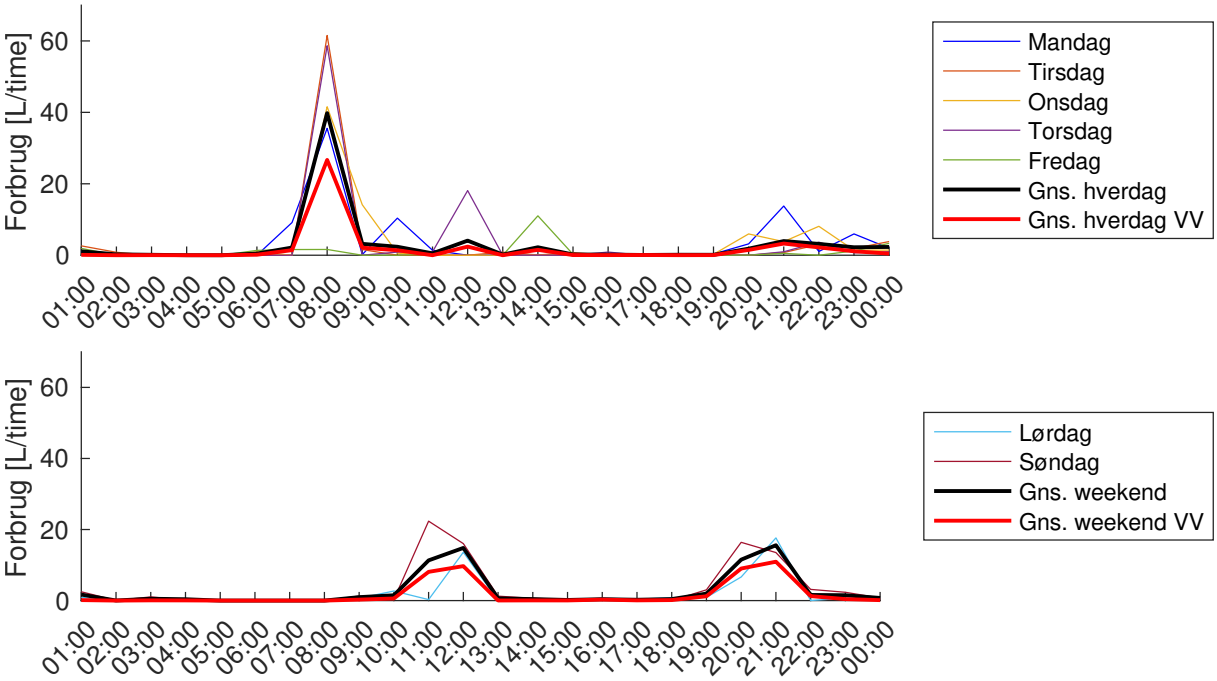
Sammenlignes forbrugsprofilerne og varmtvandsforbruget for Kærhavebakken med forbrugsprofilerne for studiet af Ahmed et al. [2016], se Figur 1.5 - 1.6 på side 9, fremgår det, at tendenserne er meget lig hinanden. For hverdagene forekommer der et større peak om morgenen, mens peaket er forskudt med 2 - 3 timer i weekenden. Den samme konklusion kommer Ahmed et al. [2016] frem til i studiet. Ligeledes er aftenpeaket for hverdagene lavere end om morgenen, mens de er mere ens for weekenderne. At foretage en direkte sammenligning mellem forbruget af varmt vand pr. person er mere usikker, da Ahmed et al. [2016] analyserer forbrug for hhv. 1 og 3 personer, mens familien på Kærhavebakken er på 4 personer. Det er oplyst, at familiens to børn sjældent går i bad derhjemme grundet fritidsaktiviteter, hvorfor det primært er de to voksne, der udgør varmtvandsforbruget om morgenen i forbindelse med bad. Her ligger forbruget på ca. 30 L/time,

svarende to 15 L/pers./time. Sammenlignet med studiet er varmtvandsforbruget om morgenen for en husstand på 1 person knap 18 L/pers./time, mens det for en familie på 3 personer ligger mellem 6 og 9 L/pers./time. Det kunne derfor godt bære præg af, at familiens to voksne på Kærhavebakken har en tendens til bruge mere varmt vand om morgenen i forbindelse med bad, noget der analyseres nærmere i Kapitel 9.

Selvom det vurderes, at forbrugsprofilerne vist på timebasis er mere overskuelige og giver et bedre overordnet overblik over forbrugstendenser, er der fortsat afvigelser mellem dette profil og profilet vist for sekundværdier. Af timeprofilet fremgår det, at morgenpeaket forekommer i intervallet 06:00 - 08:00 og at det største forbrug sker for den sidste time. Ud fra sekundprofilet fremgår det dog, at peakene finder sted i tidsrummet fra ca. 06:30 - 07:00, hvorfor der ikke er tale om to timer men snarere 30 min. Derfor kan det diskuteres, om et forbrugsprofil i stedet skal præsenteres for et interval på minutbasis og ikke timebasis.

8.2.2 Kildebjerg Søvej

Det indsamlede data for Kildebjerg Søvej anvendes på samme måde som for Kærhavebakken til at generere forbrugsprofiler for alle hverdage og weekender ved brug af en opløsning på 1 time. Resultaterne for det gennemsnitlige varmtvandsforbrug er vist på Figur 8.7.

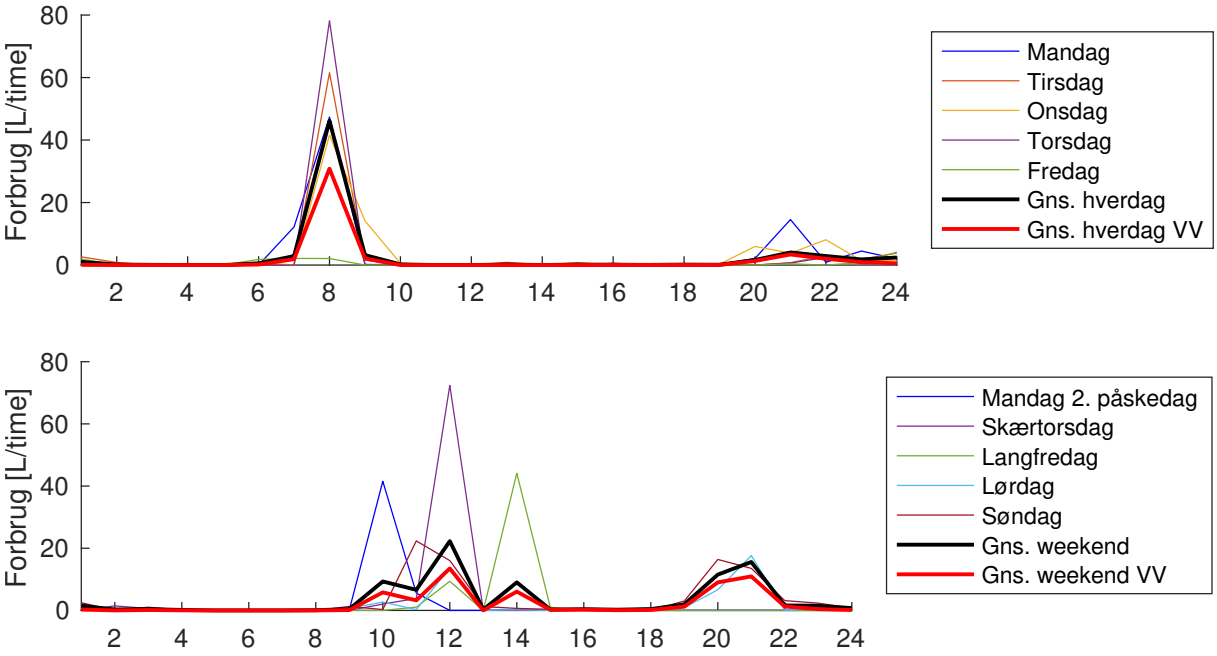


Figur 8.7: Forbrugsprofiler for hverdage og weekender ved en opløsning på 1 time.

Forbrugsprofilerne på Figur 8.7 viser, hvordan forbruget er fordelt ud over døgnet, og at der ikke forekommer større afvigelser for hverken hverdage eller weekender. Profilerne er regnet som gennemsnitsværdier baseret på fire dages måling af hver ugedag, hvorfor dette giver en indikation på, at familien har et meget specifikt forbrugsmønster med meget få afvigelser. For alle hverdage forekommer der et morgenpeak kl. 08:00 som følge af et bad, hvilket falder i tidsrummet 07:00 og 08:00. Herefter falder forbruget i alle dagstimerne, indtil beboerene kommer hjem fra arbejde og har et forbrug om aftenen. Det er oplyst, at det ene familiemedlem dyrker regelmæssig sport hver dag, hvorfor personen ikke går i bad hjemme. Weekendprofilet er ligeledes meget konstant,

hvor morgenpeaket er forskudt med ca. 3 - 4 timer, mens aftenspeaket forekommer på ca. samme tid, som for hverdagene, dog med et større forbrug.

På forbrugsprofilet vist for hverdage ses det, at tre dage, mandag, torsdag og fredag, afviger fra det gennemsnitlige profil i perioden 10:00 - 14:00. Dette skyldes, at der er foretaget målinger henover påskeferien, hvorfor familien har været hjemme skærtorsdag, langfredag og 2. påskedag. På samme måde som for Kærhavebakken vælges det derfor at flytte disse tre dage over på weekendprofilet, da de tre dage ikke repræsenterer det typiske hverdagsprofil og resultater er vist på Figur 8.8.



Figur 8.8: Opdaterede forbrugsprofiler for hverdage og weekender, hvor skærtorsdag, langfredag og 2. påskedag er inkluderet i weekendprofilet.

Ud fra de nye forbrugsprofiler vist på Figur 8.8 ses det, at forbruget for hverdagene er mere konstante med et morgenpeak kl. 08:00 og først et forbrug igen om aftenen. For weekenden fremgår det ligeledes, at de tre feriedage passer fint ind med målingerne foretaget lørdage og søndage. Igen skyldes de højere peaks for feriedagene, at der kun er data for en dag, mens profilerne for lørdage og søndage er regnet som gennemsnitsværdier for fire dages måling.

Ud fra de opdaterede forbrugsprofiler konkluderes, at både familiens samlede vandforbrug og varmtvandsforbrug ligger højere i weekenden, hvor de er hjemme. For hverdagene udgøres morgenpeaket primært af et bad, mens forbruget om aftenen er meget lavt. Her er det ligeledes gjort opmærksom på, at familien har en madordning i hverdagene, og dette kan være en forklaring på, hvorfor der ikke bliver anvendt meget vand i forbindelse med madlavning, mens forbruget er højere om aftenen for weekenderne.

Sammenlignes forbrugsprofilerne for Kildebjerg Søvej med forbrugsprofilerne for Kærhavebakken, se Figur 8.6, er der både forskelle og ligheder at spore. Generelt ligger både det samlede vandforbrug og varmtvandsforbruget lavere for familien på Kildebjerg Søvej sammenlignet med Kærhavebakken. Morgenpeaket for Kærhavebakken var på ca. 50 L/time, mens det for Kildebjerg Søvej ligger på knap 40 L/time. Den forholdsvis lave forskel på kun ca. 10 L/time skal findes i, at det gennem målingerne for Kildebjerg Søvej er konstateret, at varigheden for morgenbadet

er længere en gennemsnitsvarigheden for Kærhavebakken, mens flow og badetemperatur er næsten identiske. Derfor svarer forskellen på de to morgenpeaks ikke til det halve forbrug af Kærhavebakken, men er i stedet på kun 10 L/time. Morgenpeakene for begge familier falder i ca. samme tidsrum for hverdagene, mens det i begge tilfælde er forskud med flere timer i weekenden, noget der også stemmer godt overens med konklusionen fra studiet af Ahmed et al. [2016].

For den resterende del af dagen ligger det samlede vandforbrug for Kildebjerg Søvej på 0 L/time indtil om aftenen, hvor det stiger til ca. 5 L/time. Dette adskiller sig fra vandforbruget ved Kærhavebakken, som i gennemsnit ligger over 5 L/time for hele dagen, dog med et lidt lavere varmtvandsforbrug. Mens aftenspeaket er nærmest ikkeeksisterende i hverdagene for Kildebjerg Søvej, primært som følge af madordningen, er forbruget omkring 10 L/time for Kærhavebakken i aftentimerne. Selvom der ikke forekommer et decideret aftenpeak for Kærhavebakken, fremgår det alligevel, at det primære forbrug om aftenen falder tidligere end for Kildebjerg Søvej. Her skal forklaringen findes i, at familien på Kærhavebakken har to børn, mens familien på Kildebjerg Søvej kun består af to voksne.

Ven en sammenligning med studiet af Ahmed et al. [2016] er konklusionen, at det generelle varmtvandsforbrug for Kildebjerg Søvej ligeledes ligger under varmtvandsforbruget angivet i studiet. Dog er der en enkelt lighed, når det kommer til morgenpeaket, hvor familiens ene medlem, der går i bad hver morgen, bruger ca. samme mængde varmt vand, som studiet har fastlagt af forbrug for husstande med kun 1 person. Dette kunne derfor godt bære præg af, at der for Kildebjerg Søvej ikke på samme måde skal tages hensyn til en anden person om morgenen, og derfor at varigheden af badet og dermed forbruget af varmt brugsvand stemmer bedre overens med forbruget en for en husstand med kun 1 person.

8.3 Opsummering

I de ovenstående afsnit er opløsningen på data fra de anvendte Huba-flowmålere og BMS-systemet behandlet og sat i relation til tappe- og temperaturprofiler. Flowmålerne er med en opløsning på 8 Hz yderst præcise i deres målinger, hvor de opfanger alle tapninger uanset varigheden. Denne opløsning er derfor nødvendig, når et detaljeret kendskab til de enkelte tappeprofiler ønskes. Anvendes en opløsning på minutbasis er det dokumenteret, at der opstår flere uklarheder omkring det målte data, mens der også vil herske usikkerheder omkring antallet af tapninger. Kun med en opløsning på sekundbasis er det muligt at registrere alle tapninger, der finder sted ved de enkelte tapsteder. Fordi den gennemsnitlige varighed, som dokumenteret i Kapitel 6, ved mange tapsteder er lavere end 10 sek., er det ikke muligt at anvende en lavere opløsning end minimum 1 Hz. Dette afspejler sig også af BMS-systemet, der har en opløsning på 5 min. Her egner de loggede værdier sig kun til analyser af det samlede forbrug, eksempelvis pr. dag, idet opløsningen ikke er høj nok til at bidrage med information om de enkelte tapninger. Af samme årsag egner BMS-systemet sig heller ikke til analyser af temperaturprofiler, idet det reelle temperaturforløb ikke afspejles ved en opløsning på 5 min.

Opløsningens betydning blev også undersøgt ift. forbrugsprofiler, hvor to profiler med en opløsning på hhv. 1 sek. og 1 min. blev genereret for Kærhavebakken. Her kunne det konkluderes, at opløsningen på 1 sek. blev for høj og dataene dermed for detaljeret til et forbrugsprofil, hvis formål er at dokumentere forbruget og ikke mindst tendenser henover et døgn. Selvom det var muligt at spotte tenderser ved en opløsning på 1 sek., særligt om morgenen, var opløsningen for høj til, at peaks'ne skilte sig ud og var lette at identificere. Selvom forbrugsprofilet

afbildede det reelle forbrug meget nøjagtigt, var forbrugsprofilet ikke generelt og gennemskueligt nok til, at det egnede sig til en overordnet analyse. Derfor blev der i stedet genereret et forbrugsprofil på timebasis for begge boliger. Her var tendenserne mere fremkommelige, hvorfor profilet gav et bedre overblik over tendenserne for de to husstande. Det kan dog diskuteres, hvorvidt forbrugsprofilet for en time også virkeligt gengiver de reelle tendenser for en bolig. For Kærhavebakken blev det ud fra profilet på sekundbasis observeret, at morgenpeaket ofte falder i intervallet 06:30 - 07:00, men idet det andet bad om morgenen i flere tilfælde netop falder efter kl. 07:00, bliver morgenpeaket på profilet på timebasis i stedet strukket ud over to timer, fra 06:00 - 08:00, hvilket ikke er korrekt. En opløsning på 1 Hz er nødvendig, hvis alle tapninger skal registreres i sin fulde længde, og derfor kan der ikke stilles spørgsmålstegn ved denne ift. indsamling af data. Der er dog indikationer på, at opløsningen ikke egner sig til generering af forbrugsprofiler. Derfor anbefales det, at der ved fremtidige studier foretages undersøgelser, hvor disse i stedet afbildes med en opløsning på eksempelvis 5-, 10- eller 15-min. På den måde vil et mere nøjagtigt profil fås for, hvornår tendenserne falder sammenlignet med en opløsning på timebasis.

Ud fra forbrugsprofilerne på timebasis for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej er tendenser også analyseret og holdt oppe imod både hinanden og studiet af Ahmed et al. [2016]. Her viser profilerne, at der for begge boliger finder et morgenpeak sted i hverdagene, mens dette er skubbet med 2 - 3 timer i weekenden, noget der stemmer godt overens med studiet. Efterfølgende forekommer et lavt eller slet ingen forbrug, indtil familierne kommer hjem fra arbejde sidst på eftermiddagen, hvorefter forbruget stiger igen.

For begge boliger forekom der i løbet af måleperioden feriedage i hverdagene, hvorfor forbrugsprofilerne for enkelte hverdage skilte sig ud fra det gennemsnitlige profil. Her blev de i begge tilfælde flyttet over på weekendprofilerne, hvorefter der forekom et mere normalt profil for hverdagene. Samtidig passede profilerne for feriedagene fint ind i de gennemsnitlige profiler for weekenderne. Derfor kan det for boligerne konkluderes, at feriedage, der falder på hverdage, ikke skal medregnes som almindelige hverdage, idet ens vaner ændrer sig og i stedet bør disse regnes som weekender.

For de to målte boliger er der dokumenteret enkelte ligheder i forbruget. Dog er der også væsentlige forskelle på forbruget i de to familier, hvorfor det ikke er muligt at generere et generelt profil for de to. Gennem flere målinger af privatboliger med forskellige husstandsstørrelser vil det i fremtiden være muligt, på baggrund af alle målingerne, at generere forskellige forbrugsprofiler for disse. Selvom det ikke er observeret for de to undersøgte boliger, er det, ud fra flere målinger af forskellige husstande, også af interesse at undersøge, om eftermiddag- og aftentendenserne for fredage og søndage stemmer overens med de generelle tendenser for hhv. hverdage og weekender, eller om der i stedet vil være tendenser på, at fredage minder mere om lørdage og søndage mere om mandage - torsdage.

Analyse af tapsteder 9

Ud fra analysen foretaget i Kapitel 6 blev det fastlagt, at vandforbrugene ved de enkelte tapsteder var forskellige for både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej. De mest benyttede tapsteder var for begge boliger bruseren og håndvasken på det samme badeværelse samt køkkenvasken. Derfor undersøges de tapsteder nærmere i dette kapitel, og parametre som rørlængde, ventetid og vandspild fastlægges. Samtidig blev det konkluderet, at opvaskemaskinen og vaskemaskinen udgjorde en stor andel af det samlede koldtvandsforbrug for begge boliger, hvorfor disse tapsteder også analyseres nærmere. For de to installationer er der ligeledes foretaget en sekundær analyse, hvor det undersøges, hvorvidt det er rentabelt at anvende varmtvandstilslutninger fremfor koldtvandstilslutninger, når vandet skal opvarmes.

9.1 Brusere

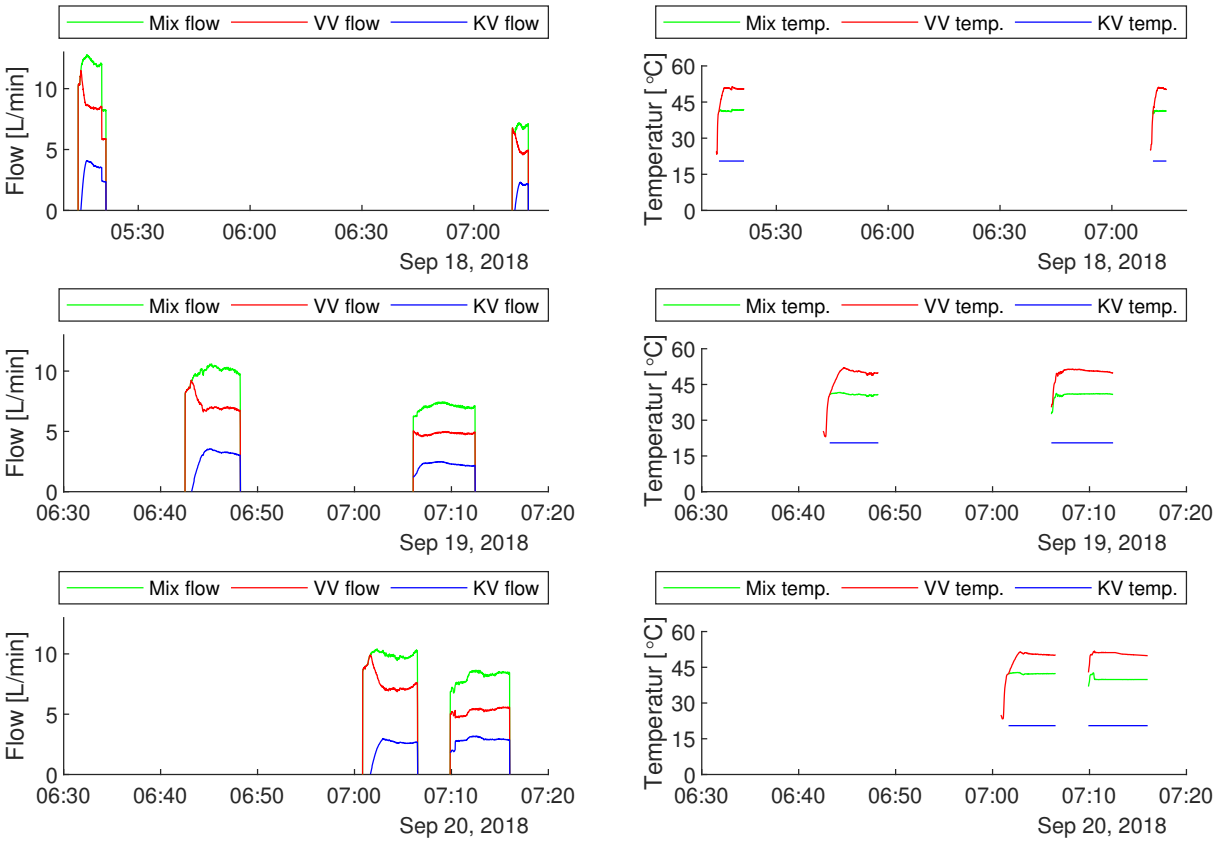
I Kapitel 6 blev det fastlagt, at brusebade for begge boliger udgør over 75% af det samlede varmtvandsforbrug samt over 50% af det samlede vandforbrug. Derfor er det af interesse at undersøge netop dette tapsted nærmere for at opnå en større indsigt i, hvad tendenserne er for begge husstande ift. brusebade.

9.1.1 Kærhavebakken

For Kærhavebakken er der gennem måleperioden konsekvent registreret to bade hver morgen i alle hverdage. Det er oplyst, at det er familiens to voksne, der begge benytter bruseren på nærliggende badeværelse, bad2, hver morgen. På Figur 9.1 er vist eksempler på tre hverdage, hver med forbrug- og temperaturprofiler for de to morgenbade.

Af Figur 9.1 fremgår det, at badene, som beskrevet i Kapitel 8, ofte falder i tidsrummet 06:30 - 07:00, dog med forskelligt mellemrum mellem hinanden, hvilket også er tilfældet for de viste eksempler. Ligeledes blev det i Kapitel 7 omkring statistisk analyse konkluderet, at varigheden af badene varierer fra alt mellem 4 og 11 min., men med en gennemsnitlig badetid på 6 min. og 52 sek., mens mixtemperaturen derimod er meget konstant på ca. 40°C for alle bade. Det er også tilfældet for de viste eksempler på figuren. Her er varigheden for alle seks bade mellem 6 og 8 min., mens det på temperaturprofilet ses, at mixtemperaturen ligger meget konstant omkring 40°C. Af forbrugsprofilerne fremgår det også, at flowet for alle tre hverdage er størst for det første bad, ofte omkring 10 - 11 L/min, mens det ofte ligger omkring 7 - 8 L/min for det andet bad. Denne tendens gør sig gældende for det meste af måleperioden og skyldes, at den ene beboer åbner for brusetermostaten indtil vandsparen, mens den anden åbner for fuldt flow.

Det fremgår ligelede af figuren, at der er visse forskelle i både flow- og temperaturprofilet for de to bade om morgenen. Det ses, at der generelt er en større ventetid for det første bad sammenlignet med det andet. Det skyldes, at det første bad om morgenen hovedsageligt er



Figur 9.1: Eksempler på forbrug- og temperaturprofiler for brusebade ved Kærhavebakken.

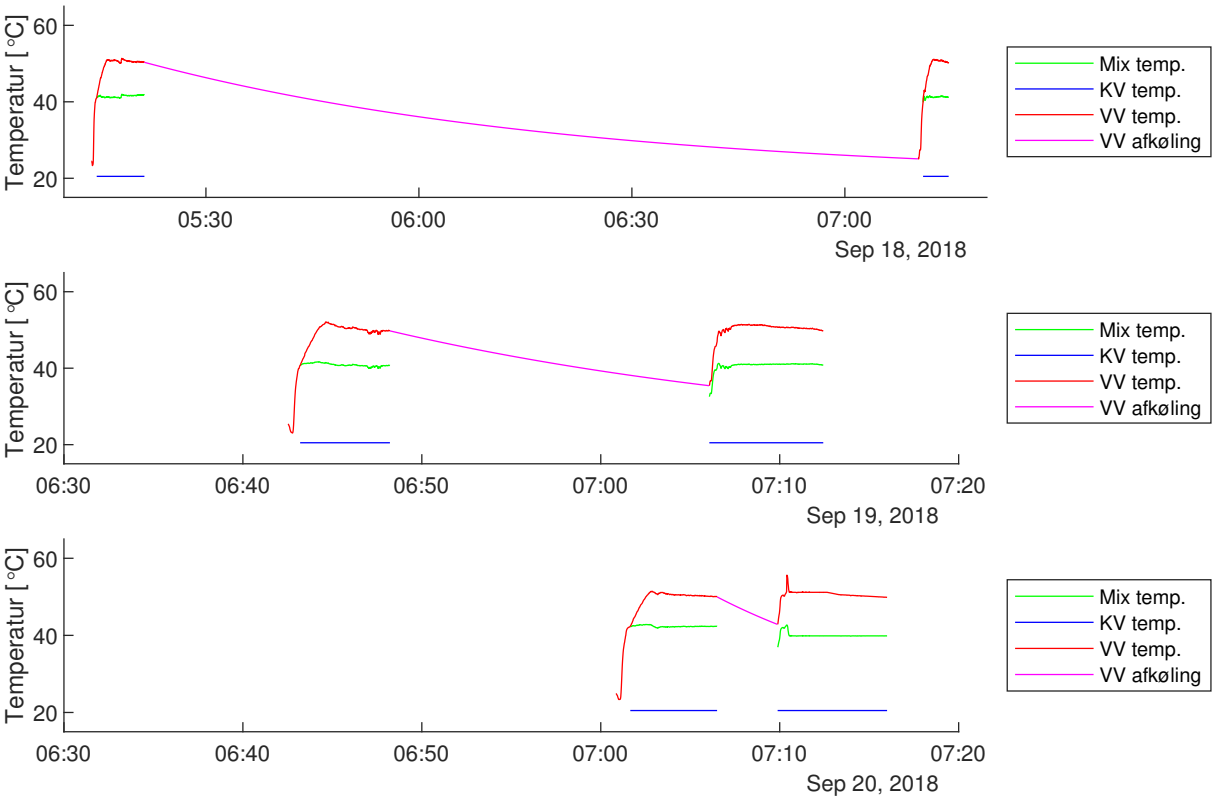
den første varmtvandstapning på dagen, og da vandet i røret ud til bruseren, røret selv og veksleren i teknikrummet er blevet kølet ned i løbet af natten, skal de alle igen varmes op. Dette afspejler sig af alle tre morgenbade, hvor der for de første ca. 20 sek. af tapningen kun tappes varmt vand, mens der først blandes koldt vand i, når varmtvandstemperaturen nærmer sig setpunktet for mixtemperaturen. Omvendt forholder det sig for det andet bad, idet røret, vandet og varmeveksleren alle er varme og ikke er nået at køle ned igen. Derfor er varmtvandstemperaturen fra starten af badet højere end for det første bad, og allerede ved badets begyndelse blandes der koldt vand sammen med det varme vand for at ramme setpunktet for mixtemperaturen.

For morgenbadene er afkølingen af det varme vand mellem de to bade også analyseret nærmere. Herved er det muligt at fastlægge, hvor meget vandet vil afkøle med som funktion af tiden mellem badene. Ved at undersøge afkølingen opnås et større kendskab til varmetabet i rørene, mens det også er muligt at fastlægge, hvor lang tid der går, før rørene er helt afkølet og det efterfølgende bad dermed vil have samme forløb som det første bad. Afkølingen mellem to bade fastlægges ud fra Newtons lov om afkøling, præsenteret ved Formel (9.1).

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) - e^{-k \cdot t} \tag{9.1}$$

$T(t)$	Temperatur til tiden t	[°C]
T_a	Omgivende temperatur	[°C]
T_0	Temperatur til tiden t=0	[°C]
k	Afkølingskonstant	$[\frac{1}{s}]$
t	Tid indtil næste tapning	[s]

Afkølingen mellem to tapninger forløber eksponentielt, hvor afkølingen er størst i starten og langsommere hen mod slutningen. Ud fra sluttemperaturen på det varme vand for det første bad og starttemperaturen for det efterfølgende bad samt varigheden mellem de to, kan afkølingenshastigheden og dermed afkølingsprofilet for de tre morgener fastlægges. Dette er vist på Figur 9.2.

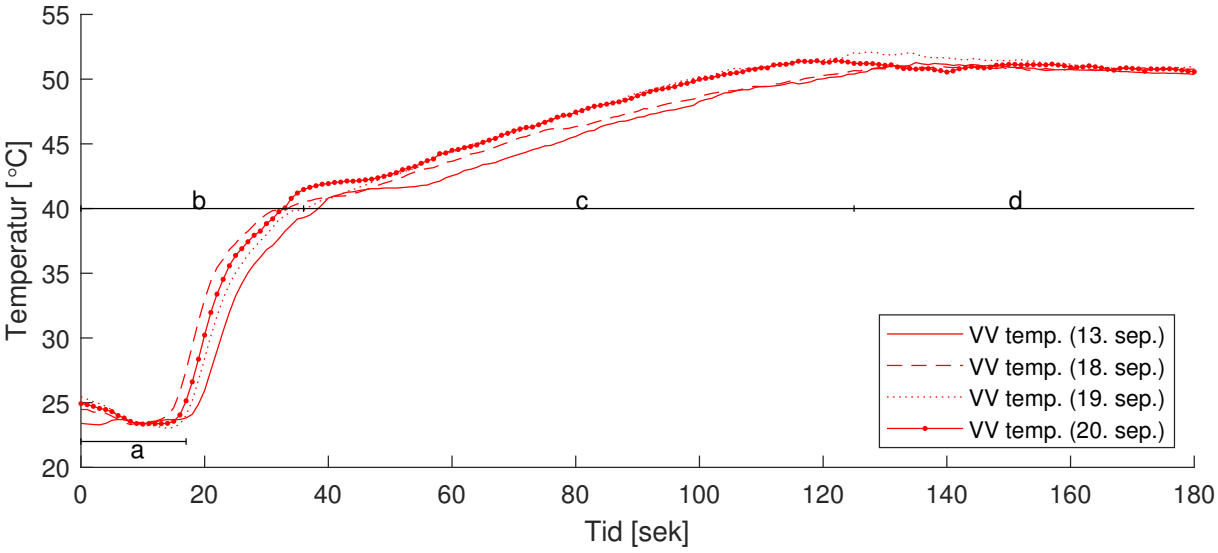


Figur 9.2: Afkølingsprofilet indtegnet mellem de tre morgenbade for Kærhavebakken.

Afkølingsprofilerne på Figur 9.2 viser, hvordan afkølingen forløber for de tre bade. Den 18. september haves den største varighed mellem de to bade, og på ca. 2 timer når varmtvandstemperaturen at afkøle fra ca. 50°C til 25°C. For det andet bad ligger starttemperaturen på det varme vand kun nogle få grader over varmtvandstemperaturen for det første bad, og derved haves omtrent det samme flow- og temperaturforløb for begge bade, hvor de første ca. 20 sek. kun udgøres af varmt vand. For den 19. september er varigheden mellem de to bade ca. 15 min., hvorfor det varme vand kun afkøler fra ca. 50°C til 37°C. Derved ligger varmtvandstempetaturen for det andet bads begyndelse tæt på setpunktet for mixtemperaturen, hvorfor der blandes koldt vand i fra starten af tapningen. Herved fremgår det også, at varmtvandsrøret fortsat er varmt, hvormed der opnås et næsten stationært forhold tidligt inde i badet. Varigheden mellem de to bade den 20. september er kortest, hvorfor varmtvandstemperaturen kun afkøler fra ca. 50°C til 43°C. Igen er varmtvandsrøret derved varmt fra starten, og der opnås stationære forhold indenfor det første minut af badet.

Som en del af analysen ønskes rørlængden, ventetiden og vandspildet fastlagt for bruseren på bad2 for Kærhavebakken. Her anvendes data for det første bad til først at fastlægge rørlængden fra teknikrummet til bruseren ud fra tiden det tager, før varmtvandstemperaturen ændrer sig. Efterfølgende fastlægges ventetiden for badet, hvor det vurderes, at varmtvandstemperaturen er tilstrækkelig, når den rammer 40°C. Endeligt anvendes den fastlagte ventetid til at regne det

gennemsnitlige vandspild ud for starten af hver tapning. Figur 9.3 viser de første 180 sek. for det første bad for fire forskellige dage. Ud fra de fire dage fastlægges middelværdier for tiden det tager, inden varmtvandstemperaturen ændrer sig, og ventetiden indtil varmtvandstemperaturen for badet når 40°C.

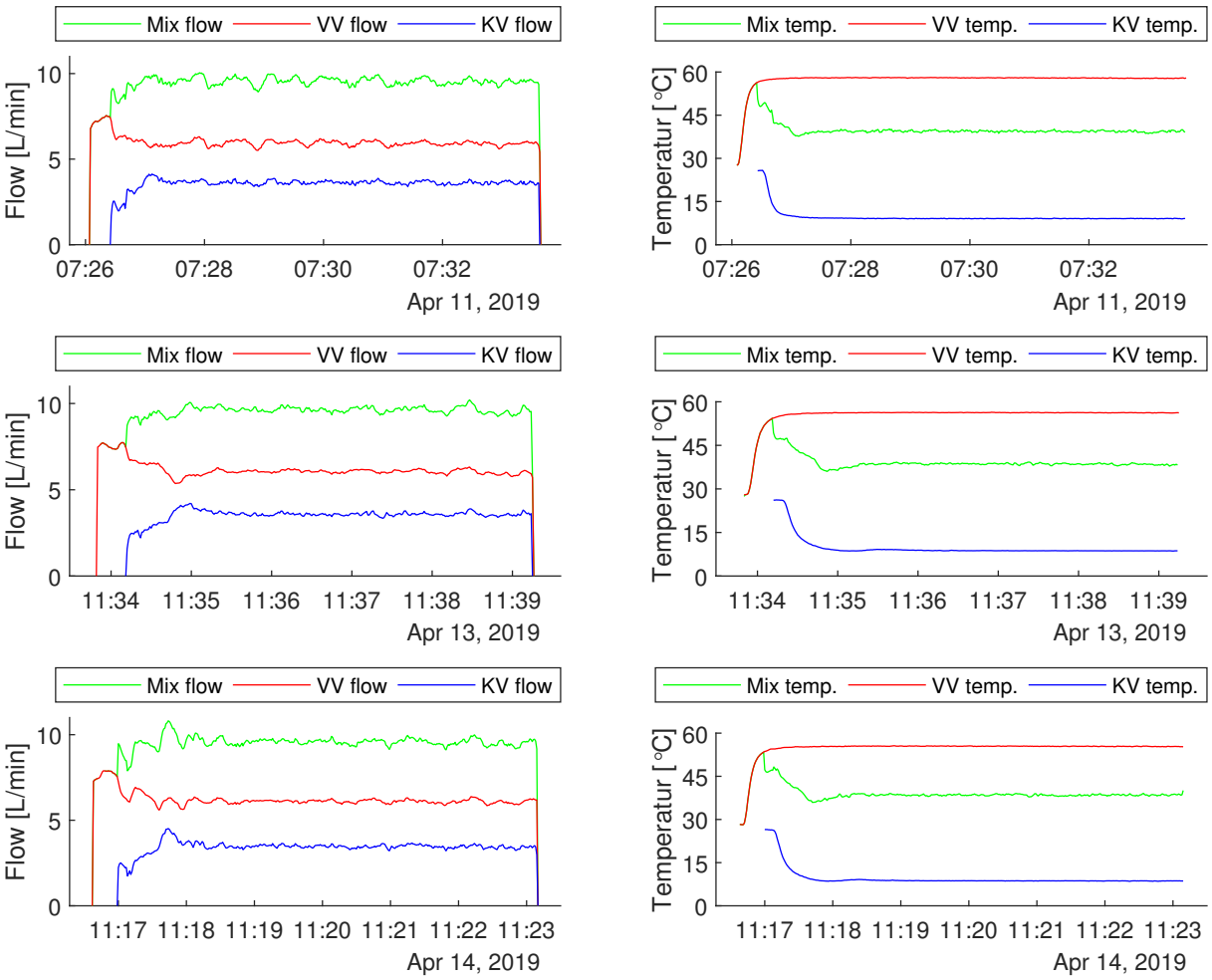


Figur 9.3: Startforløb for det første bad ved Kærhavebakken for fire dage. Indtegnet er gennemsnitstiden (a) på 17 sek., før varmtvandstemperaturen ændrer sig, den gennemsnitlige ventetid (b) på 36 sek., forløbet hvor varmtvandsrøret opvarmes (c) og forløbet med stationære forhold (d).

Figuren viser startforløbet for varmtvandstemperaturen i fire forskellige morgenbade, og at denne starter på ca. 25°C ved badets start, inden den falder til ca. 20°C grundet forskellige omgivelsestemperaturer. Efter 17 sek. begynder varmtvandstemperaturen at ændre sig, hvilket indikerer at vandet fra teknikrummet er nået frem til bruseren. Alle koldt- og varmtvandsrør i boligen er af typen PEX 15x2,5, og ved brug af den fastlagte varighed samt vandmængden for de første 17 sek. på 2,5 L er rørlængden for varmtvandsledningen fastlagt til 21,9 m. Den gennemsnitlige ventetid er efterfølgende fastlagt til 36 sek., mens vandspildet, ved brug af det gennemsnitlige flow for de første 36 sek. på 9 L/min, er fastlagt til 5,4 L. Tapstedet overholder derfor ikke krav til ventetiden på maksimalt 10 sek., og som konsekvens af dette haves et gennemsnitligt vandspild på 5,4 L for det første bad hver morgen, svarende til 8,8% af det samlede gennemsnitsforbrug pr. bad for boligen. I den fremadrettede analyse benyttes tiden for forløbet, hvor varmtvandsrørene varmes op, (c), og (d), hvor der opnås stationære forhold for badet.

9.1.2 Kildebjerg Søvej

Nedenfor foretages den samme analyse for bruseren på bad2 for Kildebjerg Søvej, mens afsnittet rundes af med at sammenholde værdierne for bruserne i de to boliger med hinanden. Gennem måleperioden for Kildebjerg Søvej er det konstateret, at der altid kun finder et bad sted om morgenen på det nærliggende badeværelse, bad2. At der kun finder et bad sted skyldes, at det ene familiemedlem dyrker regelmæssig sport og dermed går i bad i forbindelse med træning. Figur 9.4 viser tre eksempler på forbrug- og temperaturprofiler for morgenbadet for en hverdag og to weekender.



Figur 9.4: Eksempler på forbrug- og temperaturprofiler for brusebade ved Kildebjerg Søvej.

Som nævnt i Kapitel 8 forekommer morgenpeaket i hverdagene mellem kl. 07:00 og 08:00, hvilket stemmer overens med badet vist på Figur 9.4 for den 11. april, mens peaket i weekenderne i stedet finder sted nogle timer senere, hvilket badene den 13. og 14. april understreger. Varigheden af badene blev i Kapitel 7 fastlagt til mellem 4 og 13 min., men med en gennemsnitlig varighed på 8 min. og 1 sek. Dermed er badene i gennemsnit over 1 min. længere end for Kærhavebakken. Ligedes er mixtemperaturen, som det også var tilfældet på Kærhavebakken, meget konstant omkring 40°C for alle badene. For de viste bade er varigheden alle lavere end gennemsnittet, mens temperaturprofilet er identisk med en mixtemperatur på ca. 40°C. Endeligt er flowet konstant for de tre bade og ligger omkring 8 - 9 L/min, hvilket svarer til fuldt åbent på brusetermostaten.

Af Figur 9.4 fremgår det også, at temperaturprofilet i starten af alle badene har et anderledes forløb end for Kærhavebakken. Det skyldes, at flowmålerne ikke er monteret på badeværelset men i stedet er placeret i teknikrummet. Derfor ligger både varmt- og koldtvandstemperaturen, grundet varmen i teknikrummet, omkring 30°C i starten af hvert bad, mens koldtvandstemperaturen i løbet af det første minut falder til omkring 10°C. Derfor fremgår det også af forløbet for mixtemperaturen, at denne ligger højere end setpunktet i starten af badet, mens den efter ca. 1 min. falder til 40°C. Temperaturforløbet afspejler derfor ikke det reelle temperaturforløb ved bruseren, da det varme vand først skal nå frem til badeværelset. Dertil afgiver det varme vand i starten af badet både varme til det kolde vand, der står i røret, og til selve røret, hvorfor varmtvandstemperaturen er lavere ved tapstedet. Var flowmålerne i

stedet placeret ved bruseren, ville temperaturprofilet have omtrent det samme forløb som for Kærhavebakken.

Idet der ikke er konstateret to gentagende bade for nogle dage i måleperioden, er det ikke muligt at fastlægge et afkølingsprofil for det varme vand. Her kan det blot konstateres, at både røret og vandet i dette når at køle helt ned mellem hvert bad, hvormed alle bade starter med det samme udgangspunkt. Derfor vil der for hvert bad også gå et stykke tid, før der haves stationære forhold, idet vandet i røret samt røret selv først skal varmes op i starten af hvert bad. Ligeledes er det, grundet placeringen af flowmålerne, hvormed temperaturprofilet ikke afspejler de reelle forhold, heller ikke muligt at fastlægge rørlængden, ventetiden og vandspildet ud fra de målte data for bruseren, som det blev gjort for Kærhavebakken. I stedet er der gjort brug af dataene for håndvasken på samme badeværelse til at estimere rørlængden. Rørlængden ud til håndvasken er fastlagt til 15,6 m, og her er det vurderet, at der er yderligere 1 meter hen til bruseren, hvormed bruserens rørlænge bliver 16,6 m. Alle koldt- og varmtvandsrør for boligen er af typen PEX 15x2,5, og ud fra dette er ventetiden estimeret til 30 sek. for bruseren. Baseret på ventetiden og et gennemsnitligt flow for de første 30 sek. på 8 L/min er et gennemsnitligt vandspild på 4,0 L fastlagt for bruseren, svarende til 6,3% af det samlede gennemsnitsforbrugs pr. bad for boligen. I Tabel 9.1 er rørlængde, ventetid og vandspild opsummeret for bruseren på hhv. Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, mens afkølingskonstant også er angivet for førstnævnte.

Tabel 9.1: Oversigt over parametre fastlagt for bruseren på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej.

	Rørlængde [m]	Ventetid [s]	Vandspild [L]	Afkølingskonstant [$\frac{1}{s}$]
Kærhavebakken	21,9	36	5,4	$7{,}43 \cdot 10^{-4}$
Kildebjerg Søvej	16,6	30	4,0	-

Ud fra tabellen ses det, at afstanden til teknikrummet er kortere for Kildebjerg Søvej sammenlignet med Kærhavebakken. Dog er ventetiden kun ca. 6 sek. kortere, selvom der haves 1/4 mindre rørstrækning. Her ligger forklaringen i, at flowet er lavere for Kildebjerg Søvej, hvorfor det tager længere tid for vandet at nå ud til tapstedet. Ligeledes opfylder ingen af de to brusere i boligerne kravet til en ventetid på maksimalt 10 sek., og derfor haves et vandspild på hhv. 5,4 L og 4,0 L for de to boliger. I Tabel 9.1 er den gennemsnitlige afkølingskonstant også vist for Kærhavebakken. Oprindeligt skulle værdien have været sammenlignet med værdien for Kildebjerg Søvej, men idet det ikke har været muligt at fastlægge afkølingen for boligen, er denne analyse ikke udført.

9.2 Håndvaske

Foruden bruserne beskrevet ovenfor er der også målt på en række håndvaske i begge boliger, hvorfor der i dette afsnit foretages samme analyse som for bruseren med det formål at fastlægge rørlængde, ventetid, vandspild og afkølingskonstant. Gennem måleperioden er det dokumenteret, at ikke alle håndvaske i de to boliger bliver anvendt til daglig, og derfor er antallet af længerevarende varmtvandstapninger, hvilke er nødvendige for at fastlægge parametrene, begrænset. Som konsekvens af dette er der ikke tilstrækkeligt med data for alle håndvaske i boligerne til at gennemføre analysen og fastlægge parametrene. For Kærhavebakken haves tilstrækkeligt med data for følgende håndvaske til at foretage analysen:

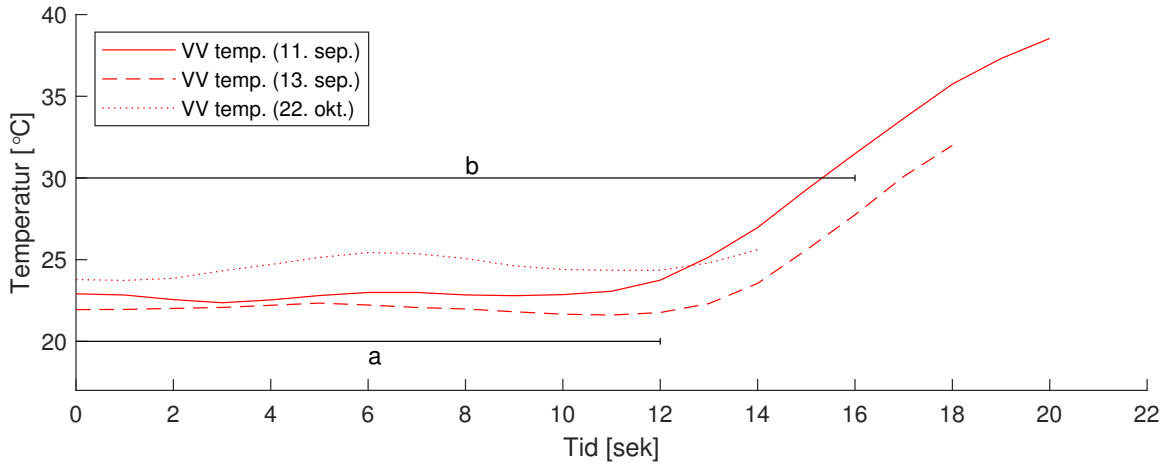
- Bryggers
- Håndvask, bad1
- Køkkenvask

Ud fra Figur 3.2 på side 18 fremgår det, at håndvasken i bryggerset og på bad1 er placeret tæt på teknikrummet, mens køkkenet har en placering centralt i boligen. Endeligt er den allerede analyserede bruser placeret på bad2 længst væk fra teknikrummet, og dermed analyseres tapsteder der både er placeret tæt på varmeveksleren, midt i boligen og længst væk fra varmeveksleren. Den følgende analyse kan derfor bruges til at skabe et generelt overblik over, hvordan ventetiden varierer for de enkelte tapsteder i boligen, og dermed et mål på, hvor stor betydning rørstrækningen har for komforten ved de enkelte tapsteder. Den samme analyse foretages for følgende håndvaske ved Kildebjerg Søvej:

- Håndvask, bad2
- Køkkenvask

Af Figur 3.5 på side 20 fremgår det, at køkkenvasken er placeret midt i boligen, mens håndvasken på bad2 er placeret længst væk fra teknikrummet. Der er ikke registreret tilstrækkeligt med data for håndvasken i bryggers eller på bad1 til, at disse tapsteder kan undersøges. Derfor vil den følgende analyse kun give et overblik over, hvordan ventetiden varierer mellem tapsteder placeret midt i boligen og længst væk fra teknikrummet. Idet tapningerne på håndvaskene for begge boliger varierer væsentlig mere fra hinanden sammenlignet med bruserne, samt at den gennemsnitlige varighed for disse alle ligger omkring 10 sek., foretages der ikke en generel analyse af tappe- og temperaturprofilerne for håndvaskene, mens afkølingsprofiler heller ikke præsenteres for alle håndvaskene, da forløbet er det samme som for bruserne. Afkølingskonstanterne er dog fastlagt for de tapsteder, hvor det har været muligt, og er vist i Tabel 9.2.

Til fastlæggelsen af rørlængde, ventetid, vandspild og afkøling for alle håndvaskene anvendes samme fremgangsmåde, som for bruserne beskrevet ovenfor. Her er fundet de længste varmtvandstapninger for alle håndvaskene, hvor der ikke har fundet en tapning sted umiddelbart før tapningen, således rørlængden og ventetiden kan fastlægges ud fra flow- og temperaturforløbet. For alle håndvaske fastlægges ventetiden indtil temperaturen når 30°C. På Figur 9.5 er vist et eksempel på startforløbet for tre varmtvandstapninger på køkkenvasken for Kærhavebakken er vist på Figur 9.5.



Figur 9.5: Startforløb for tapning på køkkenvasken ved Kærhavebakken. Indtegnet er gennemsnitstiden (a), før varmtvandstemperaturen ændrer sig, og den gennemsnitlige ventetid (b).

De viste tapninger for køkkenvasken ved Kærhavebakken er mellem 14 og 20 sek. lange. De tre varmtvandstapninger er de længste, der har fundet sted for køkkenvasken, hvor der ikke tidligere er tappet varmt vand. I gennemsnit går der for de tre tapninger 12 sek., før varmtvandstemperaturen ændrer sig, mens der går 16 sek., før varmtvandstemperaturen når 30°C. Med en gennemsnitlig varighed på 7 sek. for alle tapninger foretaget på køkkenvasken for Kærhavebakken har der med stor sandsynlighed fundet varmtvandstapninger sted, hvor vandet end ikke når at blive varmt, før tapningen ophører igen. Dertil har der ikke fundet tapninger sted med en tilstrækkelig varighed til, at der er registreret et forløb, hvor varmtvandsrøret opvarmes eller stationære forhold opnås.

Samme analyse er foretaget for de restende tapsteder for både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej, hvor ventetiden er fastlagt ud fra udvalgte varmtvandstapninger på alle håndvaskene. Efterfølgende er rørlængden og vandspildet fastlagt ved brug af rørdimensionen og gennemsnitsflowet indenfor ventetiden. De fastlagte parametre for alle analyserede håndvaske i de to boliger er præsenteret i Tabel 9.2.

Tabel 9.2: Oversigt over parametre fastlagt for de analyserede håndvaske på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej.

	Rørlængde [m]	Ventetid [s]	Vandspild [L]	Afkølingskonstant [$\frac{1}{s}$]
Kærhavebakken				
Bryggers	4,8	9	1,2	-
Håndvask, bad1	2,8	8	0,4	$2{,}50 \cdot 10^{-4}$
Køkkenvask	11,4	16	1,9	$2{,}97 \cdot 10^{-4}$
Kildebjerg Søvej				
Håndvask, bad2	15,6	32	2,0	-
Køkkenvask	11,3	15	1,7	$4{,}06 \cdot 10^{-4}$

Resultaterne for Kærhavebakken viser, at rørlængden er kortest hen til håndvasken på bad1, der ligger placeret på den anden side af teknikrummet. Men grundet et lavt flow er ventetiden alligevel 8 sek., svarende til at der i gennemsnit er et vandspild på 0,4 L. Bryggersvasken er placeret 4,8 meter fra varmeveksleren, men et højere flow på denne gør, at ventetiden er 9 sek. og med et vandspild på 1,2 L. Køkkenvasken, der ligger længst væk af de tre håndvaske, har en ventetid på 16 sek. og dermed et vandspild på 1,9 L. For Kærhavebakken er ventetiden dermed størst for bruseren, hvor denne var på 36 sek. Håndvasken på bad1 samt bryggerset opfylder begge lige netop krav til ventetid på 10 sek. Det skal dog haves in mente, at ventetiden er defineret for et flow på 0,2 L/s, hvilket ligger højere en flowet registreret på alle tapstederne for Kærhavebakken.

For køkkenvasken og håndvasken på bad1 har det ligeledes været muligt at fastlægge afkølingskonstanten. Her er denne næsten ens for begge tapsteder, hvilket indikerer, at rørene er isoleret på samme måde og derved afkøler omtrent lige hurtigt. Værdierne ligger begge lavere end for bruseren, hvilket betyder, at vandet for bruseren afkøler hurtigere end for de to håndvaske. En forklaring på dette er, at varmtvandstemperaturen, grundet varigheden af badene, bliver højere end for håndvaskene. Derved opnås en større temperaturforskel mellem vandet og omgivelserne, og det vil afkøle hurtigere.

For Kildebjerg Søvej er håndvasken på bad2 og køkkenvasken analyseret. Her haves en kortere

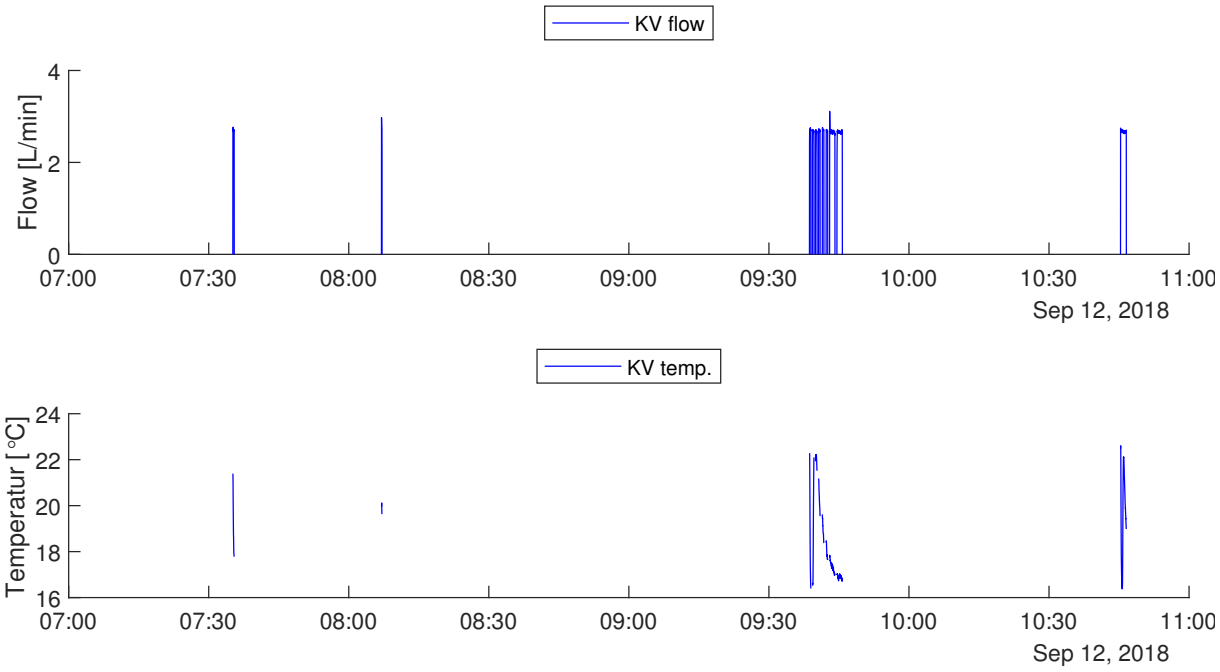
rørlængde for køkkenvasken og dermed også en kortere ventetid og lavere vandspild sammenlignet med håndvasken på badeværelset. Her haves en ventetid på 32 sek., men et lavt flow gør, at vandspildet kun er på 2,0 L. For køkkenvasken har det, som det eneste tapsted for bolig, været muligt også at fastlægge afkølingskonstanten. Der er ingen andre tapsteder at sammenligne med for boligen, men værdien er en anelse højere end for køkkenvasken på Kærhavebakken. Selvom der er anvendt samme rørtype i begge boliger, er placeringen og isoleringen omkring rørene ukendt. Dermed er omgivelsestemperaturen ukendt, og en sammenligning mellem de to afkølingskonstanter vil indebære større usikkerheder, hvorfor dette ikke analysere nærmere.

9.3 Opvaskemaskine

Ovenstående analyser har omhandlet de tapsteder, hvor der kan tappes både koldt og varmt vand. Ud fra analysen af det overordnede forbrug foretaget i Kapitel 6 blev det også dokumentet, at netop de tapsteder benyttes mest af de to familier. Begge husstande har dog også installeret en opvaskemaskine og en vaskemaskine, som begge bidrager til koldtvandsforbruget og det samlede forbrug. Her er der gennem hele måleperioden ved Kærhavebakken målt på begge installationer, mens der for Kildebjerg Søvej kun er målt på opvaskemaskinen i den første uge af måleperioden. Opvaskemaskinen i boligerne analyseres nærmere i de følgende afsnit, hvor det hyppigst anvendte tappeprogram præsenteres.

9.3.1 Kærhavebakken

Det er dokumenteret, at opvaskemaskinen for Kærhavebakken udgør 15% af det samlede koldtvandsforbrug samt 7 % af det totale vandforbrug i måleperioden. Alle opvaske, der er foretaget gennem måleperioden, er undersøgt nærmere for at identificere det program, der primært anvendes. Her indikerede tappeprofilerne for alle opvaske, at et økoprogram med en varighed på ca. 3,5 time var det hyppigst anvendt. Tappe- og temperaturprofilet for programmet er vist på Figur 9.6.



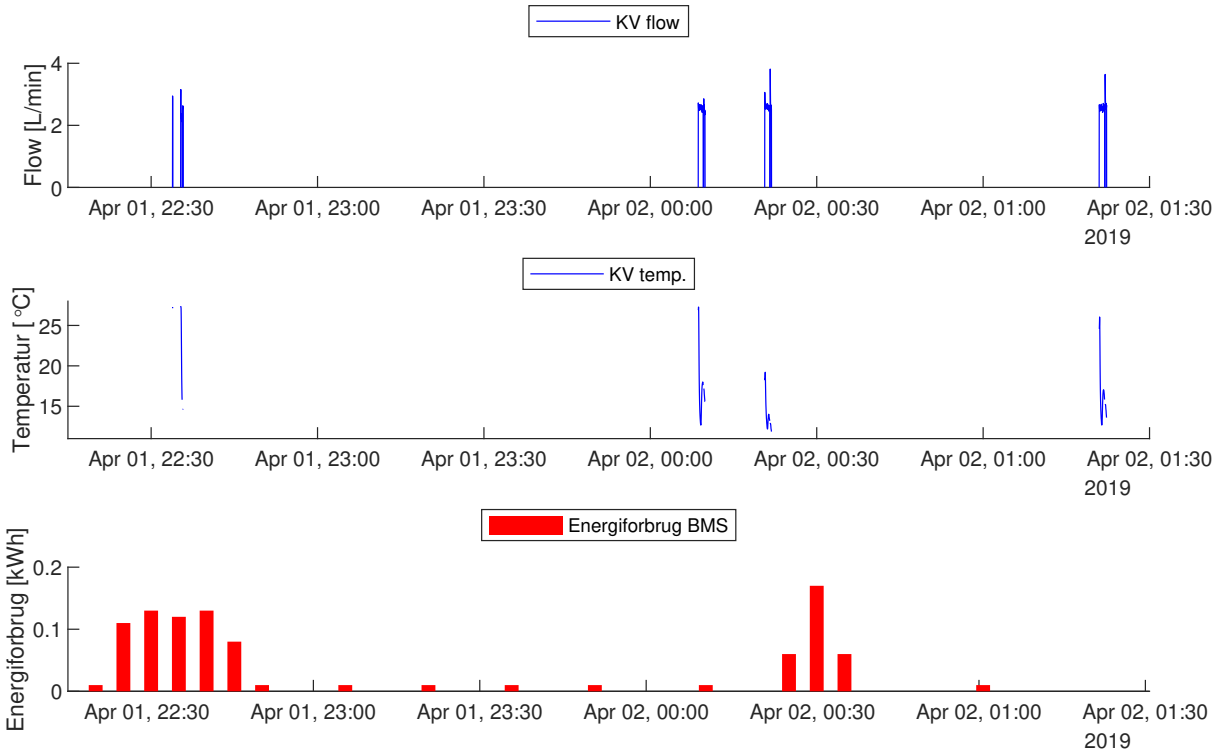
Figur 9.6: Tappeprofil for det hyppigst anvendte program for opvaskemaskinen ved Kærhavebakken.

I løbet af de 3,5 time tager opvaskemaskinen vand ind 11 gange, hvilket samlet giver et vandforbrug på 12,5 L pr. opvask. De første otte tapninger for programmet har en varighed på ca. 20 sek. og et forbrug på ca. 0,5 L pr. tapning, mens de sidste tre tapninger har en varighed på ca. 1 min. og et vandforbrug på knap 3 L pr. tapning. På figuren fremgår det, at flowet for alle tapninger konstant ligger på knap 3 L/min, mens koldtvandstemperaturen ligger mellem 16°C og 22°C. Koldtvandstemperaturen starter på ca. 22°C, hvilket svarer til temperaturen omkring koldtvandsrøret, mens den bliver koldere i løbet af tapningerne. Dette er bedst illustreret ved de otte tapninger, der finder sted fra kl. 09:38, hvor det fremgår, at koldtvandstemperaturen gradvist ændrer sig. Efter tapningens ophør stiger temperaturen igen og vender tilbage til udgangspunktet på ca. 22°C.

9.3.2 Kildebjerg Søvej

For Kildebjerg Søvej foretages en tilsvarende analyse af opvaskemaskinen, hvor energiforbruget fastlægges for hhv. koldt- og varmtvandstilkobling. I Kapitel 6 blev fastlagt, at opvaskemaskinen udgjorde 1% af det samlede vandforbrug og 3% af det samlede varmtvandsforbrug for måleperioden. Dog blev der kun målt på opvaskemaskinen i den første uge af måleperioden, hvorfor denne fordeling ikke kan regnes som værende gyldig for de reelle forhold. Ligeledes udgjorde opvaskemaskinen for Kærhavebakken 15% af det samlede koldtvandsforbrug og 7% af det samlede forbrug, hvilket er med til at understrege, at opvaskemaskinen er et vigtigt tapsted at undersøge nærmere.

I måleperiodens første uge blev der registreret to opvaske, der begge havde det samme forløb. Derfor foretages analysen af det program, hvor tappe- og temperaturprofilet er vist på Figur 9.7. Hertil fremgår også energiforbruget logget via boligens BMS-system for mængden af elforbrug opvaskemaskinen benytter henover en opvask.



Figur 9.7: Tappeprofil for opvaskemaskinen ved Kildebjerg Søvej.

Programmet har en varighed på ca. 3 timer og tager vand ind otte gange. Tapningerne har alle forskellige varighederne, mens der for hele opvasken er registreret et samlet vandforbrug på 9,3 L. Flowet ligger omkring 2,8 L/min for alle tapninger, mens koldtvandstemperaturen varierer mellem 14°C og 26°C. Som for Kærhavebakken falder koldtvandstemperaturen ved de længere tapninger, mens den grundet en højere omgivelsestemperatur omkring koldtvandsrøret stiger til ca. 26°C igen efterfølgende. Idet BMS-systemet for boligen logger det samlede strømforbrug til opvaskemaskinen, er dette også vist. Forbruget fra BMS-systemet kan efterfølgende sammenlignes med det beregnede forbrug, og herudfra kan det fastlægges, hvor stor en del af strømforbruget der går til opvarmning af vandet. Igen formodes det, at den sidste tapning i tappeprogrammet er en koldtvandstapning, hvor der skylles af. For BMS-systemet er der ligeledes ikke registreret et større energiforbrug derfor, hvorfor dette indikerer, at vandet ikke varmes op under tapningen.

9.3.3 Analyse af varmeforsyning

Som en sekundær analyse er det for opvaskemaskinerne i de to boliger undersøgt, om der er potentiale for i fremtiden at anvende varmtvandstilslutning fremfor koldtvandstilslutning. Med udgangspunkt i de hyppigst anvendte tappeprogrammer for de to boliger er der foretages beregninger af energiforbruget til el ved opvarmning af vandet gennem varmelegemet, mens det efterfølgende er forsøgt at generere et nyt varmtvandsprofil, der afspejler temperaturforløbet ved opvarmning med fjernvarme i veksleren. Nedenfor er konklusionen på analysen opridset, mens der henvises til Appendiks F for fremgangsmåde, beregninger og resultater af denne.

For begge opvaskemaskiner er det dokumenteret, at der, ud fra de gjorte antagelser omkring antallet af varmtvandstapninger og ventetiden, er potentiale for fremtidig varmtvandstilslutning fremfor koldtvandstilslutning, idet prisen på strøm er væsentlig højere end prisen på fjernvarme. Antagelsen om at se helt bort fra ventetiden, foretaget af praktiske årsager, gør det, at temperaturforløbet ikke afspejler de reelle forhold ved en varmtvandstilslutning. Det har for dette projekt ikke være muligt at undersøge, hvordan ventetiden vil påvirke resultaterne, idet det enten vil medføre et behov for el-supplement eller et større vandforbrug, idet der så skal være mulighed for, at vandet kan løbe direkte igennem opvaskemaskinen og ud i afløbet, indtil varmtvandstemperaturen er tilstrækkelig.

Dertil hersker der også en usikkerhed i, i hvilke af tapningerne for de to opvaskemaskiner vandet bliver opvarmet og i hvilke der udelukkende anvendes koldt vand. Disse usikkerheder medfører, at resultaterne af analysen ikke giver et realistisk billede på, hvorvidt en varmtvandstilslutning vil være rentabel ift. koldtvandstilslutning. Hertil kræves en mere nøjagtig undersøgelser af energiforbruget for de to installationer, både ved koldt- og varmtvandstilkolbling, således der ud fra disse kan foretages en sammenligning af de to løsninger. Ligeledes skal de ekstra anlægsomkostningerne ved en ekstra slange ud til installationen medregnes, før det kan konkluderes, om en varmtvandstilslutning er mere rentabel end en koldtvandstilslutning.

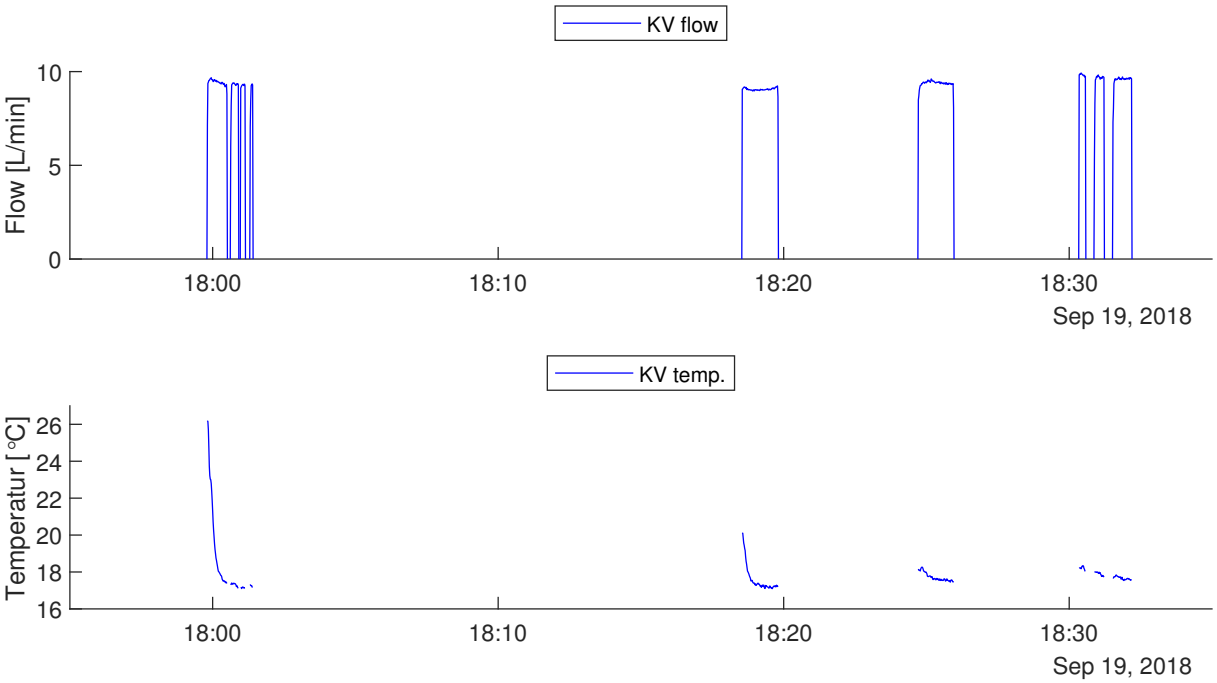
9.4 Vaskemaskine

Begge husstande har en vaskemaskine installeret, men kun for Kærhavebakken er der foretaget målinger af denne, hvorfor analysen kun foretages for dette tapsted. Som for opvaskemaskinerne er det ligeledes undersøgt, om der er potentiale i varmtvandstilslutning.

9.4.1 Kærhavebakken

For Kærhavebakken blev der gennem hele måleperioden også foretaget målinger af vaskemaskinen. Denne udgjorde 36% af det samlede koldtvandsforbrug og 18% af det samlede forbrug, hvorfor dette tapsted også er af interesse at undersøge nærmere.

Som for opvaskemaskinen er det mest hyppigt anvendte program identificeret. Dette er fastlagt til et Mix 40°C program med en varighed på 1 time. Tappe- og temperaturprofilet for en vask er vist på Figur 9.8.



Figur 9.8: Tappeprofil for det hyppigst anvendte program for vaskemaskinen ved Kærhavebakken.

Vaskemaskinen tager vand ind otte gange i løbet af varigheden på 1 time, og har et totalt vandforbrug på 38 L pr. vask. Flowet ligger konstant på ca. 9 L/min for alle otte tapninger, mens varigheden er forskellig, dog med to længste tapninger omkring 18:20 og 18:25. Temperaturprofilet er meget lig det viste for opvaskemaskinen, for koldtvandstemperaturen starter på 26°C og falder til omkring 17°C. Grundet den korte varighed mellem tapningerne når koldtvandstemperaturen ikke at stige tilbage til omgivelsestemperaturen på 26°C, men ligger i stedet under 20°C for alle tapninger med undtagelse af den første.

9.4.2 Analyse af varmeforsyning

For vaskemaskinen på Kærhavebakken er der foretaget samme analyse som for opvaskemaskinerne i de to boliger, hvor potentialet for i fremtiden at anvende varmtvandstilslutning fremfor koldtvandstilslutning undersøges. Analysen er foretaget ved brug af samme fremgangsmåde, hvor konklusionen er præsenteret nedenfor. Igen henvises til Appendiks F for fremgangsmåde, beregninger og resultater af analysen.

I lighed med analysen af opvaskemaskinerne for de to boliger understreger resultaterne for vaskemaskinen, at der er potentiale for i fremtiden at anvende varmtvandstilslutning og ikke koldtvandstilslutning. Dog er der gjort brug af samme antagelser omkring ventetiden,

mens der også hersker samme usikkerhed omkring antallet af varmtvandstapninger. Derfor er konklusionen på analysen også den samme, at der kræves en mere nøjagtig undersøgelse af energiforbruget ved både koldt- og varmtvandstilkolbling, hvis det skal kunne dokumenteres, om en varmtvandstilslutning er mere rentabel end en koldtvandstilslutning.

9.5 Opsummering

Ovenstående analyser af tapstederne ved Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej har givet en større indsigt i, hvordan tappeprofilerne ser ud for hvert tapsted, og hvor stor en rolle afstanden og ventetiden har for forløbet.

Begge boliger anvender oftest den bruser, der ligger fjernest teknikrummet, og grundet placeringen er der for alle tapninger en lang ventetid på det varme vand. For det første bad ved Kærhavebakken blev en ventetid fastlagt til 36 sek., svarende til et vandspild på 5,4 L eller 8,8% af det samlede vandforbrug for et gennemsnitsbad. For Kildebjerg Søvej var ventetiden, på trods af en rørstrækning der er 1/4 kortere end Kærhavebakken, 30 sek., og det medførte et vandspil på 4,0 L pr. bad, svarende til 6,3% af det samlede vandforbrug ved et gennemsnitsbad. Ingen af de to tapsteder overholder heller komfortkravet med en maksimal ventetid på 10 sek., selvom begge boliger er bygget indenfor de seneste seks år. Dette er med til at understrege, at der fortsat ikke lægges nok vægt på netop ventetiden og komfortkravet, når der opføres nye boliger.

Håndvaskene blev også undersøgt for begge husstande, hvor parametre som rørlængde, ventetid og vandspild blev fastlagt. Her blev det dokumenteret, at ventetiden på køkkenvasken var 16 sek. for Kærhavebakken og 15 sek. for Kildebjerg Søvej. Begge køkkener er placeret centralt i huset med en afstand på ca. 11 meter ud til teknikrummet, men heller ingen af de to tapsteder overholder kravet til komfort. Det samme gør sig gældende for håndvaskene på badeværelserne fjernest teknikrummene i de to boliger. For Kærhavebakken er det kun bryggersvasken og håndvasken på bad1, der grundet en placering tæt på teknikrummet overholder kravet til komfort. Det gør sig formodentligt også kun gældende for Kildebjerg Søvej, men da de tapsteder kun sjældent benyttes, blev der ikke registreret tilstrækkeligt med data til, at de var mulige at analysere nærmere.

Ud fra den gennemsnitlige varighed på både køkkenvasken og håndvasken på badeværelset længst væk for de to boliger kunne det samtidig konstateres, at der finder varmtvandstapninger sted, hvor det varme vand end ikke når ud til tapstedet, før der igen bliver slukket for vandet. Det betyder, at der anvendes energi til at producere varmt vand, som blot afkøler igen i varmtvandsrøret, inden det når frem til køkkenet. Det er ikke en optimal løsning og understreger ligeledes betydning af rørstrækningen samt placeringen af teknikrummet, som for begge boliger ligger i den ene ende af boligen.

Endeligt er opvaskemaskinerne for begge husstande samt vaskemaskinen for Kærhavebakken analyseret nærmere ud fra det hyppigst anvendte tappeprogram. Formålet med analysen var at dokumentere vandforbruget for tappeprogrammet samt undersøge, om der er potentiale for at koble de to installationer på varmt vand fremfor den nuværende løsning med en koldtvandstilslutning og elopvarming i de indbyggede varmelegemer. Analysen af sidstnævnte indebar en række antagelser, der alle havde betydning for resultatet af denne. Derfor var konklusionen på analyserne af både opvaskemaskinen og vaskemaskinen, at der, selvom beregningerne dokumenterede et potentiale for varmtvandstilslutning, var brug for mere

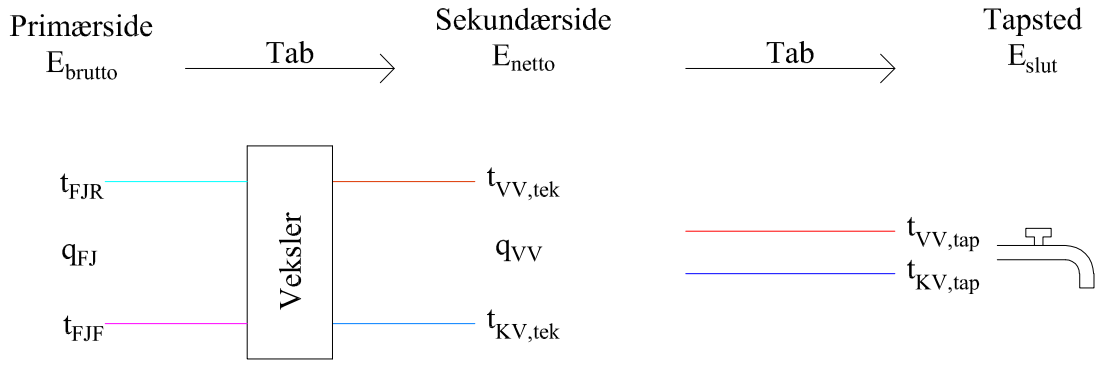
detaljerede analyser af energiforbruget for både koldt- og varmtvandstilslutning. I disse beregninger skal der tages højde for ventetid og antallet af varmtvandstapninger, således de reelle forhold afspejles, hvis det skal kunne konkluderes, hvorvidt det er mere rentabelt med en varmtvandstilslutning.

Energiforbrug og tab i brugsvandssytemer

10

I overensstemmelse med analysen af de enkelte tapsteder, præsenteret i Kapitel 9, redegøres og dokumenteres i dette kapitel for energiforbruget til opvarmning af vand samt tab i brugsvandssystemet med det formål at fastlægge, hvor der er potentiale for eventuelle besparelser. Energiforbruget dokumenteres på dagsbasis for de tre boliger, mens det også undersøges hvor i brugsvandssystemet tabene sker og hvor meget disse udgør. På baggrund af målinger udregnes energiforbruget på den primære og sekundære side af varmeveksleren samt energiforbruget ved tapsteder.

På Figur 10.1 fremgår en principskitse af, hvor energiforbrug og tab beregnes for de tre boliger.



Figur 10.1: Principskitse af hvor energiforbrug og tab udregnes for de tre boliger.

Ud fra Figur 10.1 beregnes energiforbruget for primær- og sekundærsiden samt ved tapstederne ved brug af hhv. Formel (10.1), Formel (10.2) og Formel (10.3).

$$E_{brutto} = q_{FJ} \cdot c_p \cdot (t_{FJF} - t_{FJR}) \tag{10.1}$$

$$E_{netto} = q_{VV} \cdot c_p \cdot (t_{VV,tek} - t_{KV,tek}) \tag{10.2}$$

$$E_{slut} = q_{VV} \cdot c_p \cdot (t_{VV,tap} - t_{KV,tap}) \tag{10.3}$$

Til dokumentation af tabet henover vekslen, dvs. fra primær- til sekundærsiden, foretages en analyse af vekslen for Kærhavebakken og Petersborgvej, hvor effektiviteten, η, beregnes jf. Formel (10.4).

$$\eta = \frac{E_{netto}}{E_{brutto}} \tag{10.4}$$

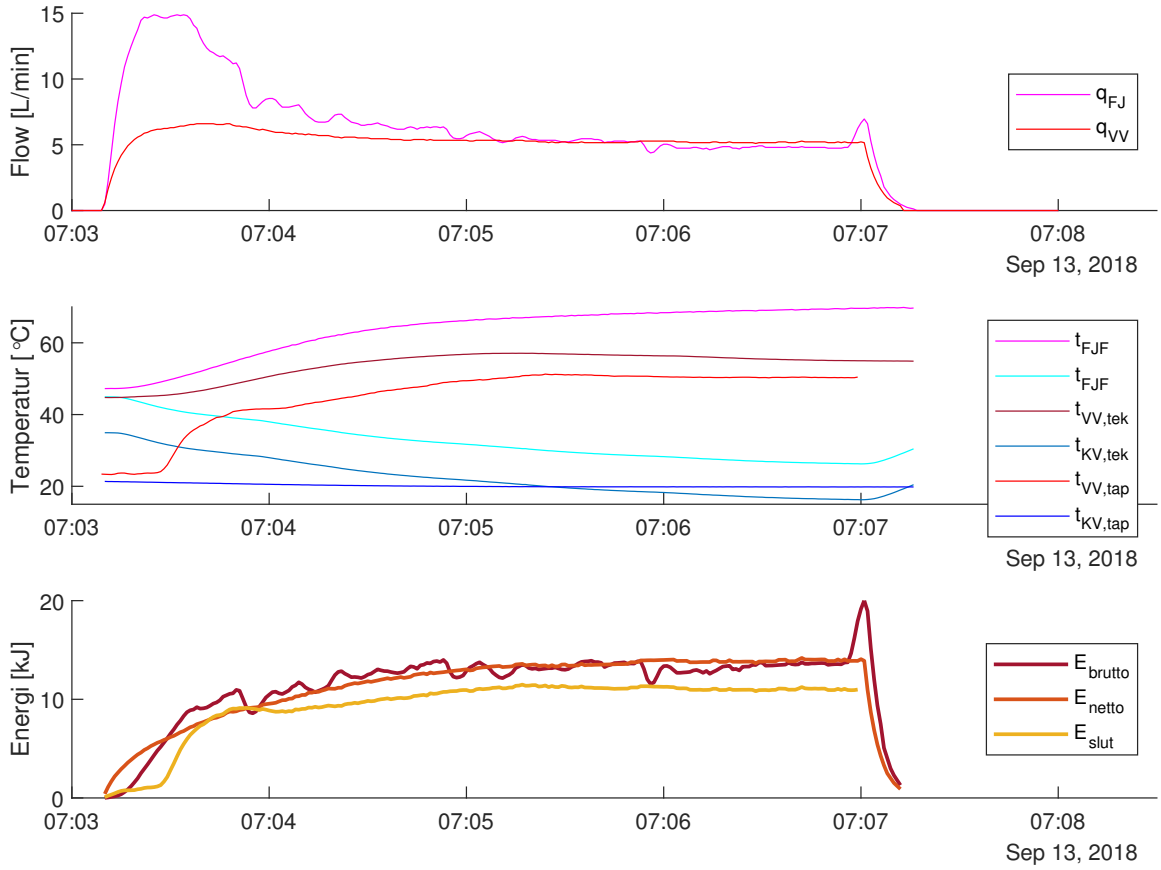
E	Energiforbrug	[kJ]
q	Flow	[L/s]
t	Temperatur	[°C]
c_p	Specifik varmekapacitet	[kJ/kg °C]
tek / tap	Teknikrum / tapsted	
FJF / FJR	Fjernvarme fremløb / retur	
KV / VV	Koldt vand / varmt vand	

10.1 Energiforbrug og tab ved Kærhavebakken

Som beskrevet tidligere førte udfordringer med målinger ved Kærhavebakken til, at der kun haves målinger i både teknikrum og ved tapsteder d. 13/09, hvorfor analysen tager udgangspunkt i denne dag. Ved at sammenholde målingerne foretaget med KATflows i teknikrummet og flowmålere ved tapsteder, beregnes fordelingen af energiforbruget til hhv. E_{brutto}, E_{netto} og E_{slut}. Hertil undersøges tabet fra primærsiden til sekundærsiden gennem en veksleranalyse og tabet fra sekundærsiden til tapstedet undersøges ved analyse af vandspild og rørtab ud fra temperaturprofiler. Afslutningsvist undersøges rørlængdens betydning ift. tabet fra sekundærsiden til tapstederne med henblik på at reducere det årlige energispild.

10.1.1 Energiforbrug

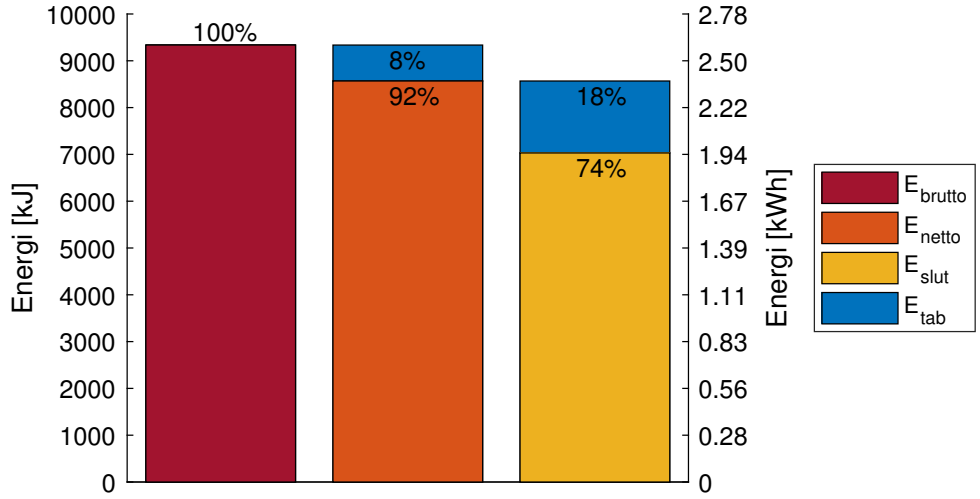
På baggrund af målinger d. 13/09 fastlægges fordelingen af energiforbruget jf. Formel (10.1)-(10.3). På Figur 10.2 fremgår et eksempel på tappe- og temperaturprofilet for det første bad d. 13/09, samt energiforbrugets forløb og fordeling henover badet.



Figur 10.2: Tappe- og temperaturprofiler samt energiforbrug for hhv. E_{brutto}, E_{netto} og E_{slut}.

Af Figur 10.2 fremgår det, at energien på sekundærsiden er større end på primærsiden ved badets begyndelse. Selvom fjernvarmeflowet er ca. tre gange større ved badets begyndelse end varmtvandsflowet gør den lavere temperaturforskel på fjernvarmen, at E_{brutto} bliver lavere end E_{netto}. En forklaring på dette kan skyldes placeringen af temperaturfølerne for KATflows'ne samt den højere temperatur i teknikrummet, hvilket gør at vandrørene opvarmes mellem tapninger. Idet temperaturføleren på returen for fjernvarmen var placeret tæt på varmeveksleren, ligger der en usikkerhed i temperaturforløbet for t_{FJR} ved badets begyndelse, hvor røret langsomt nedkøles. Herefter, ca. 20 sek. inde i tapningen, stiger temperaturforskellen for fjernvarmen således, at energiforbruget for primærsiden overstiger energien på sekundærsiden, hvilket afspejler et tab henover veksleren. Ved badets afslutning fremgår et peak for fjernvarmeflowet, også kaldet afterrun, hvor flowet stiger og derved også energiforbruget. En forklaring på dette afterrun kan skyldes en fejlindstillingen af trykdifferensregulatoren, hvor fjernvarmeflowet stiger idet der lukkes for vandet ved tapstedet. for at opretholde en fast trykforskel. Grundet en konstant koldtvandstemperatur ved tapstedet følger energiforbruget ved tapstedet, E_{slut}, temperaturforløbet for det varme vand. Gennem hele tapningen ligger energiforbruget ved tapstedet lavere end energiforbruget for sekundærsiden af veksleren, hvilket afspejler tabet der sker fra teknikrummet til tapstedet.

Med udgangspunkt i fremgangsmåden for den ovenstående analyse udregnes energiforbruget på dagsbasis for d. 13/09, hvor resultatet fremgår af Figur 10.3. Det skal hertil nævnes, at resultaterne på figuren kun afspejler energiforbruget for en enkelt dag i måleperioden, hvorfor det kan diskuteres, hvorvidt fordelingen er repræsentativ for resten af måleperioden. For boligen blev observeret en generel tendens til, at der hver dag forekommer to bade og herudover tapninger på de resterende tapsteder, hvilket også var tilfældet for d. 13/09. Derfor vurderes, at Figur 10.3 giver et godt billede af den daglige fordeling af energiforbruget, men flere målinger er nødvendige for at kunne validere denne og derved opnå en mere nøjagtig fordeling af energiforbruget.



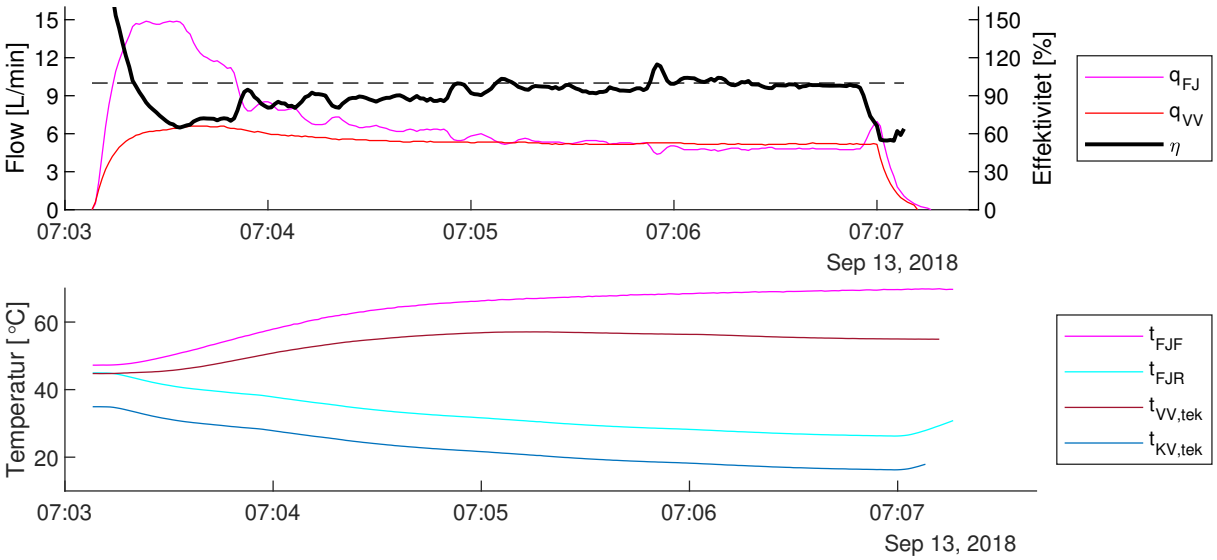
Figur 10.3: Gennemsnitlig fordeling af energiforbrug samt tab i brugsvandssystemet d. 13/09 for Kærhavebakken.

Af Figur 10.3 fremgår et totalt energiforbrug på ca. 9.000 kJ, svarende til 2,5 kWh, til opvarmning af vand for Kærhavebakken d. 13/09. Ud af det totale energiforbrug udgør energiforbruget ved tapstedet 74%, mens der forekommer et tab på 8% henover veksleren og et tab på 18% mellem teknikrummet og tapstederne. Dette indikerer altså, at størstedelen af energien går tabt, når vandet transporteres fra teknikrummet til tapstedet og ikke når det varme vand produceres. I

det følgende analyseres tabene i brugsvandssystemet nærmere med henblik på fastlægge mere detaljeret, hvor i brugsvandssystemet der er potentiale for eventuelle besparelser.

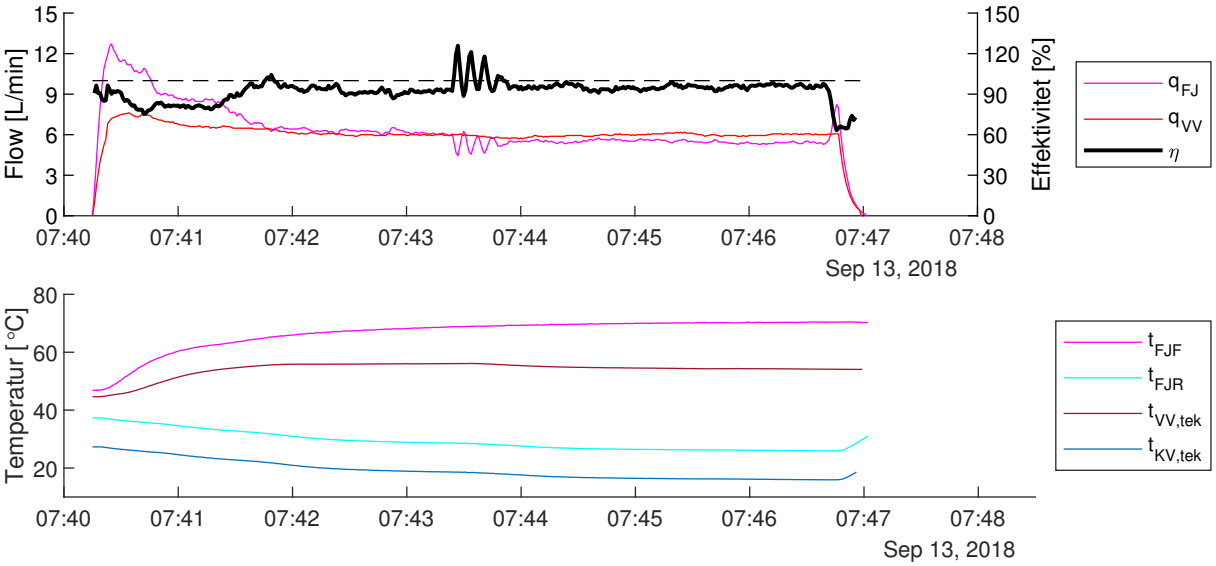
10.1.2 Tab i brugsvandssystem

Det første tab i brugsvandssystemet forekommer henover veksleren, når det varme vand produceres, hvorfor en analyse af selve varmeveksleren foretages. Til dokumentation af tabet undersøges effektiviteten af varmeveksleren, hvor denne, med udgangspunkt i målingerne for det første bad d. 13/09, beregnes jf. Formel (10.4). Resultater fremgår af Figur 10.4.



Figur 10.4: Effektivitet af varmeveksleren ved Kærhavebakken for det første bad d. 13/09.

Som det fremgik af Figur 10.2 var energiforbruget på sekundærsiden større end energiforbruget på primærsiden ved badet begyndelse, og derfor er effektivitet vist på Figur 10.4 større end 100% i de første 20 sek. af tapningen. Herefter falder effektiviteten i takt med, at temperaturforskellen for fjernvarmen øges og E_{brutto} derved overstiger E_{netto}. Ca. 2 minutter inde i badet, kl. 07:05, opnås stationære forhold, og et næsten identisk flow og temperaturforskel på hhv. primær- og sekundærsiden gør, at effektiviteten ligger tæt på 100%. Grundet det tidligere beskrevne afterrun på fjernvarmen stiger energiforbruget på primærsiden ved badets afslutning, og det medfører et fald i effektiviteten. Henover hele badet fås en gennemsnitlig effektivitet på 95%, svarende til et tab på 5% henover veksleren, og dermed 3% lavere end det gennemsnitlige fastlagte tab for veksleren præsenteret på Figur 10.3. Denne forskel skyldes, at effektiviteten de første 6 sek. af badet overstiger 200% grundet den lave temperaturforskel på fjernvarmen og at den samlede effektivitet er beregnet for hele dagen. Undersøges i stedet effektiviteten af det andet bad der forekommer ca. en halv time senere samme dag, fås et andet forløb for effektiviteten, som præsenteret på Figur 10.5.

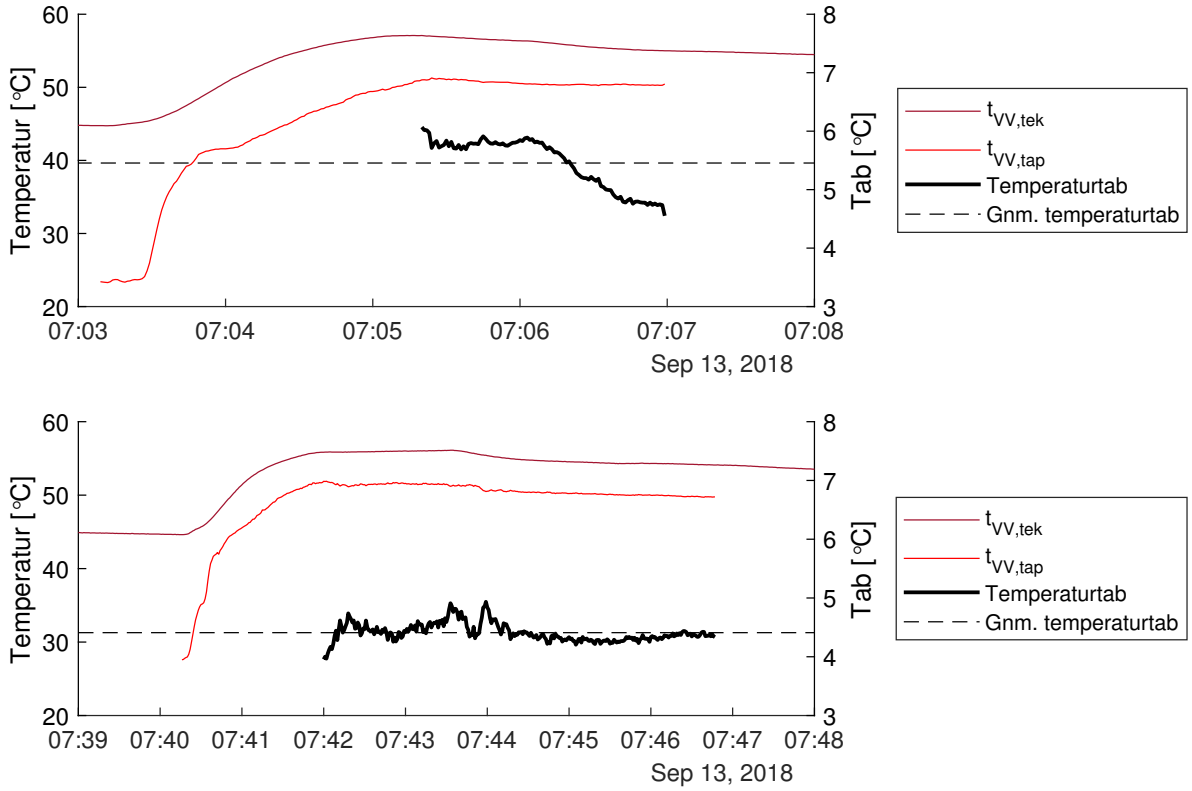


Figur 10.5: Effektivitet af varmeveksleren ved Kærhavebakken for det andet bad d. 13/09.

Af Figur 10.5 fremgår det, at effektivteten ved badets begyndelse for det andet bad d. 13/09 ikke overstiger 100%. Dette skyldes, at fjernvarmerøret for returvandet er afkølet fra forrige tapning, hvorfor den tidligere usikkerhed for temperaturforskellen på fjernvarmen ikke her er aktuel. Midtvejs i tapningen forekommer udsving i fjernvarmeflowet, der gør at E_{brutto} bliver mindre end E_{netto} og effektiviteten derved kortvarigt overstiger 100%. Ligesom for det første bad forekommer et afterrun på fjernvarmen, hvorfor effektiviteten ved badets slutning også falder i dette tilfælde. For badet på Figur 10.5 fås en gennemsnitlig effektivitet på 92%, svarende til et tab over veksleren på 8%, ligesom tabet på Figur 10.3 viste. På baggrund af analysen for dataene registreret den d. 13/09 konkluderes heraf et gennemsnitligt tab for veksleren på 8%. Det skal hertil nævnes, at der i teknikrummet for d. 13/09 kun blev registreret de to analyserede bade samt en tapning på køkkenvasken, og derfor er det kun muligt at vurdere effektiviteten af veksleren samt de fastlagte tab ud fra dette data. Flere målinger er derfor nødvendige for at kunne validere varmevekslerens effektivitet.

Udover tabet fra primær- til sekundærsiden undersøges tabet fra teknikrummet til selve tapstedet, i dette tilfælde for bruseren placeret længst væk fra teknikrummet. Med udgangspunkt i temperaturprofilet på Figur 9.3 på side 68 undersøges, hvor stor en del af tabet, der udgøres af hhv. vandspild ved badets begyndelse og opvarmning af rør samt rørtab ved stationære forhold. Rørtabet ved stationære forhold fastlægges ud fra de to bade d. 13/09, hvor tabet beregnes som forskellen mellem varmtvandstemperaturen i teknikrummet, $t_{VV,tek}$, og varmtvandstemperaturen ved tapstedet, $t_{VV,tap}$. På Figur 10.6 fremgår resultatet af rørtabet ved stationære forhold for de to bade d. 13/09.

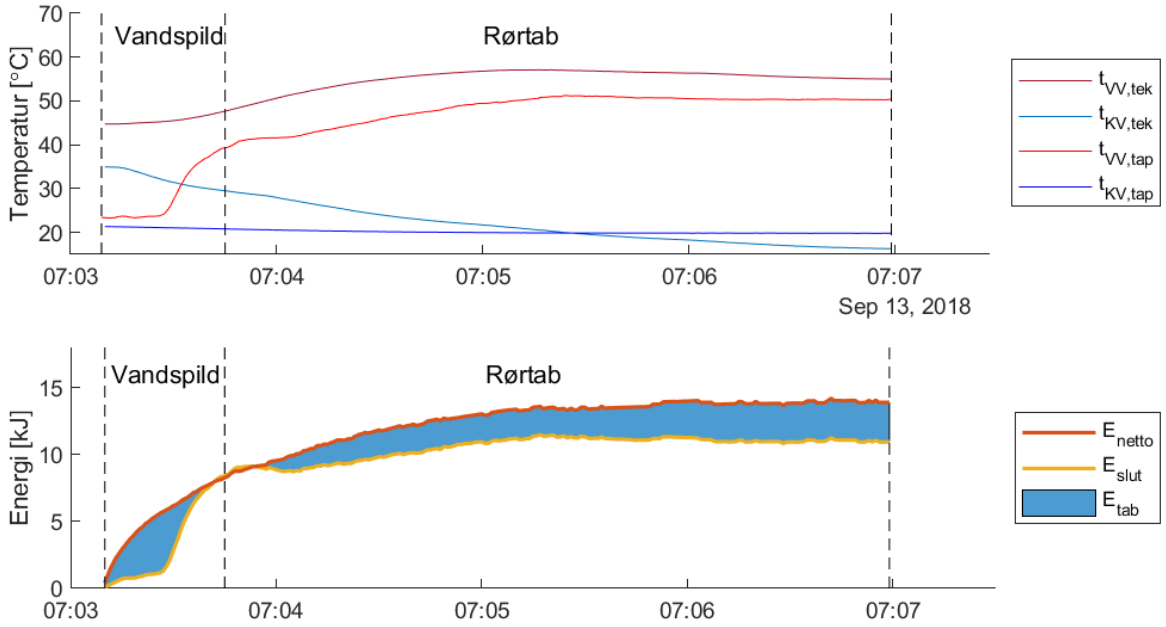
Af Figur 10.6 fremgår det, at stationære forhold for det første bad d. 13/09 forekommer ca. 2 min. inde i tapningen, mens de opnås hurtigere for det andet bad, idet vandrørene allerede er opvarmet. Herudover fremgår et mere stationært temperaturtab for det andet bad sammenliget med det første bad, idet varmtvandstemperaturen i teknikrummet, $t_{VV,tek}$, falder gennem det første bad. Ud fra rørlængden på 21,9 m og det gennemsnitlige temperaturtab for de to bade på hhv. 5,5°C og 4,4°C, udregnes et gennemsnitligt rørtab ved stationære forhold på 0,23°C/m, svarende til 140 W/m ved et flow på 9 L/min. Udregnes varmetransmissionskoefficienten for røret fås en værdi på 5 W/mK, hvilket, sammenlignet med standardværdier for vandrør, er



Figur 10.6: Rørtab ved stationære forhold for de to bade d. 13/09.

højere end værdien for uisolerede rør [Energistyrelsen, 2016]. Det kan derfor diskuteres, hvorvidt denne fremgangsmåde for den stationære beregning er repræsentativ for varmetabet af rørene. Derudover skal det nævnes, at temperaturerne i teknikrummet og ved tapstederne er målt ved brug af forskelligt måleudstyr med forskellige måleusikkerheder, hvilket også har betydning for resultatet. Nye rør-i-rør løsninger, fluktuationer i flowet samt installationen af rørene i beton med eller uden gulvvarme er nogle af de faktorer, der påvirker varmetabet og derved beregningerne ved udelukkende at sammenligne temperaturprofilet fra teknikrummet med tapstedet. Idet der er flere ubekendte faktorer i rørtabsberegninger bør disse foretages dynamisk i hele rørets længde for at kunne afspejle de reelle forhold korrekt.

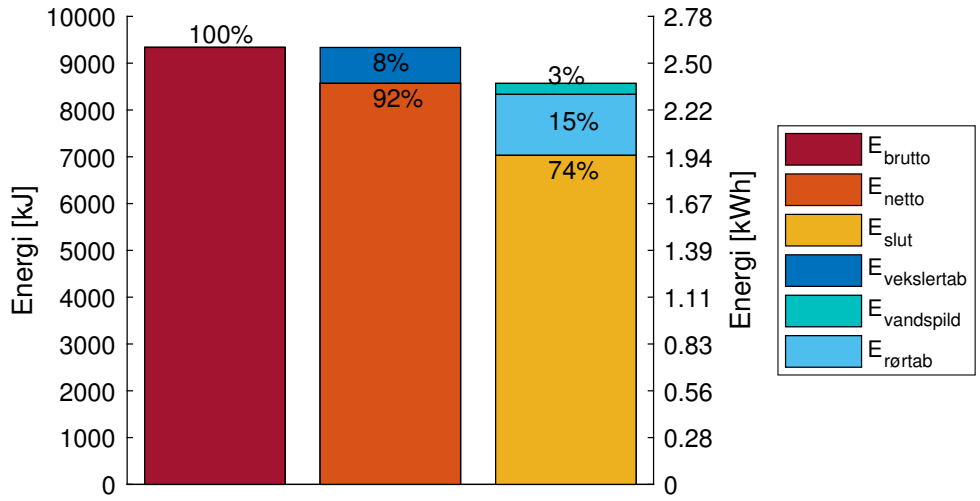
Som nævnt ovenfor kan energitabet inddeles i vandspild og rørtab, sidstnævnte igen i opvarmning af rør og rørtab ved stationære forhold. Og som det fremgår af Figur 10.6 udgør de stationære forhold kun en mindre andel af det samlede energitab for badet, hvorfor tabet fra teknikrummet til tapstedet ikke udelukkende kan vurderes heraf. Derfor foretages en nærmere analyse af temperaturprofilet for det første bad d. 13/09, hvor formålet er at dokumentere, hvor stor en procentdel af tabet der udgør hhv. vandspild og rørtab. På baggrund af Figur 9.3 på side 68 vurderes det, at vandspildet udgør de første 36 sek., svarende til den tid det tager at opvarme og transportere vandet fra teknikrummet til tapstedet med en temperatur på 40°C. Rørtabet inkluderer derfor den resterende del af badet, hvor en del af tabet består i at opvarme røret, hvorefter stationære forhold opnås med et konstant rørtab. På Figur 10.7 fremgår en illustration af, hvordan tabet fra teknikrummet til tapstedet er opdelt i vandspild og rørtab for det første bad d. 13/09.



Figur 10.7: Inddeling af tab fra teknikrum til tapsted i vandspild og rørtab for det første bad d. 13/09.

På baggrund af Figur 10.7 beregnes hhv. vandspildet og rørtabet ud fra forskellen mellem E_{netto} og E_{slut} i de to intervallet. Hertil konkluderes det, at vandspildet udgør 15% af det samlede tab imens rørtabet udgør de resterende 85%. Selvom temperaturprofilet for det andet bad d. 13/09 ikke er identisk med profilet på ovenstående figur, vurderes det, at forholdet mellem vandspild og rørtab er repræsentativ for begge bade. Vandspildet ved det andet bad afhænger af varighededen og afkølingen mellem de to bade, og idet dette varierer fra dag til dag, er det valgt at se bort fra denne usikkerhed.

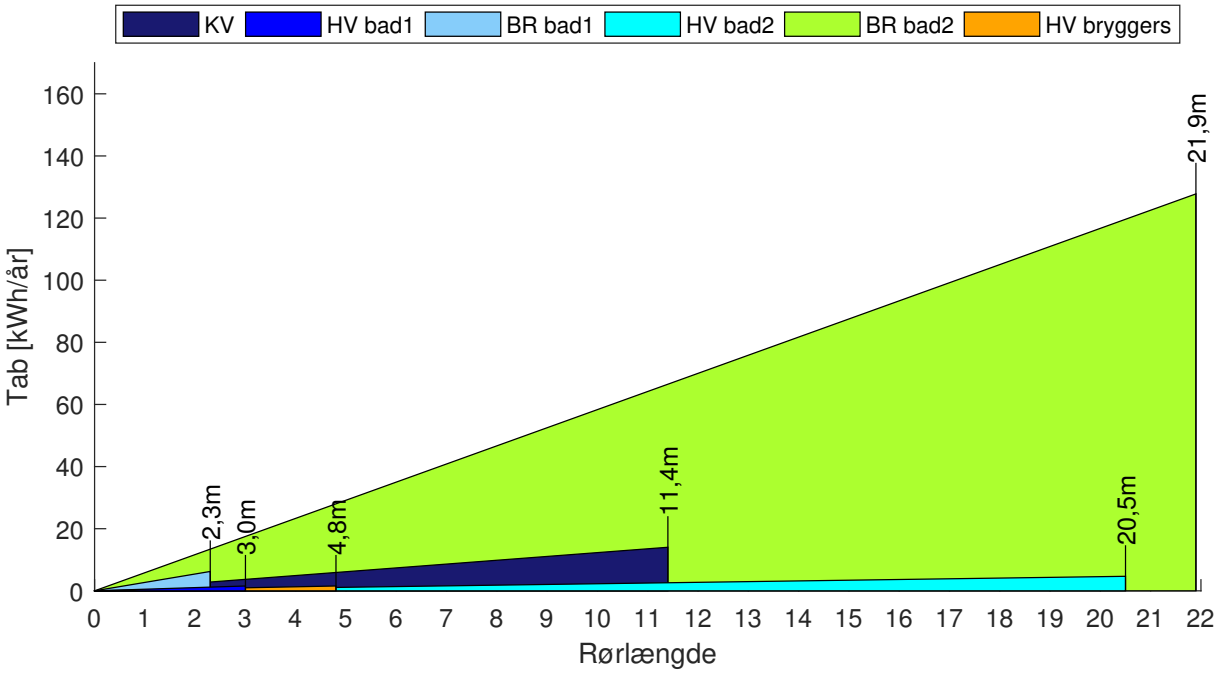
Med udgangspunkt i analysen for tabet over veksleren samt tabet fra teknikrummet til tapstedet opstilles Figur 10.8, hvor de enkelte tab i brugsvandssystemet fremgår sammen med fordelingen af energiforbruget.



Figur 10.8: Fordeling af energiforbrug og tab i brugsvandssytemet for Kærhavebakken.

Med den angivne fordeling for tabet til vandspild og rørtab beregnes ud fra Figur 10.8 et dagligt tab på hhv. 230 kJ og 1.306 kJ, svarende til et samlet tab på 0,43 kWh. Med antagelsen om at forbruget på ovenstående figur er repræsentativ for en gennemsnitsdag, bliver det samlede årlige tab fra teknikrummet til tapstederne 156 kWh/år. Energitabet mellem E_{netto} og E_{slut} kan efterfølgende opdeles på det enkelte tapsteder for at give en indikation på rørlængdens betydning for tabet. Ved at dele det samlede tab mellem E_{netto} og E_{slut} ud på hver enkelt tapning henover en dag vil det være muligt at fastlægge, hvor stor en andel de enkelte tabsteder udgør. Men idet der for d. 13/09 kun er registreret to bade samt en tapning på køkkenvasken, er det ikke muligt at foretage en opdeling af energitabet på alle tapsteder i boligen.

Derfor vælges der i stedet at tage udgangspunkt i det registrerede energitab på 156 kWh/år og, velvidende at dette ikke afspejler den reelle fordeling energitab, opdele dette på de enkelte tapsteder ud fra fordelingen af varmtvandsforbruget fastlagt i Kapitel 6, se Figur 6.3. Ved at gøre brug af antagelsen om at energitabet har samme procentvise fordeling som varmtvandforbruget beregnes det årlige tab for hvert enkelt tapsted. Her udgør varmtvandsforbruget til bruseren på bad2 82%, hvorfor det årlige tab beregnes til 128 kWh/år. På baggrund af den beskrevne fremgangsmåde beregnes tabet fra teknikrummet til de enkelte tapsteder, hvor resultater fremgår af Figur 10.9.



Figur 10.9: Årligt tab til vandspild og rør afhængigt af rørlængde for brugsvandssystemet ved Kærhavebakken.

Selvom der ikke er tale om en nøjagtig inddeling af energitabet, giver resultaterne alligevel en god indikation på, hvor det største tab opleves. Af Figur 10.9 fremgår det ikke overraskende, at bruseren på bad2 udgør det største tab fra teknikrum til tapsted på årsbasis. Grundet den store energitab for bruseren på bad2 sammenlignet med de andre tapsteder, samt antagelsen om et lineært forløb, vil en reduktion af rørlængden derfor have en væsentligt større effekt på det årlige tab. En mere central placering af teknikrummet for Kærhavebakken ville resultere i en kortere rørlængde til både håndvask og bruser på bad2 samt til køkkenvasken. Herved ville det årlige tab fra teknikrummet til de angivne tapsteder reduceres, hvilket særligt er fordelagtigt for bruseren.

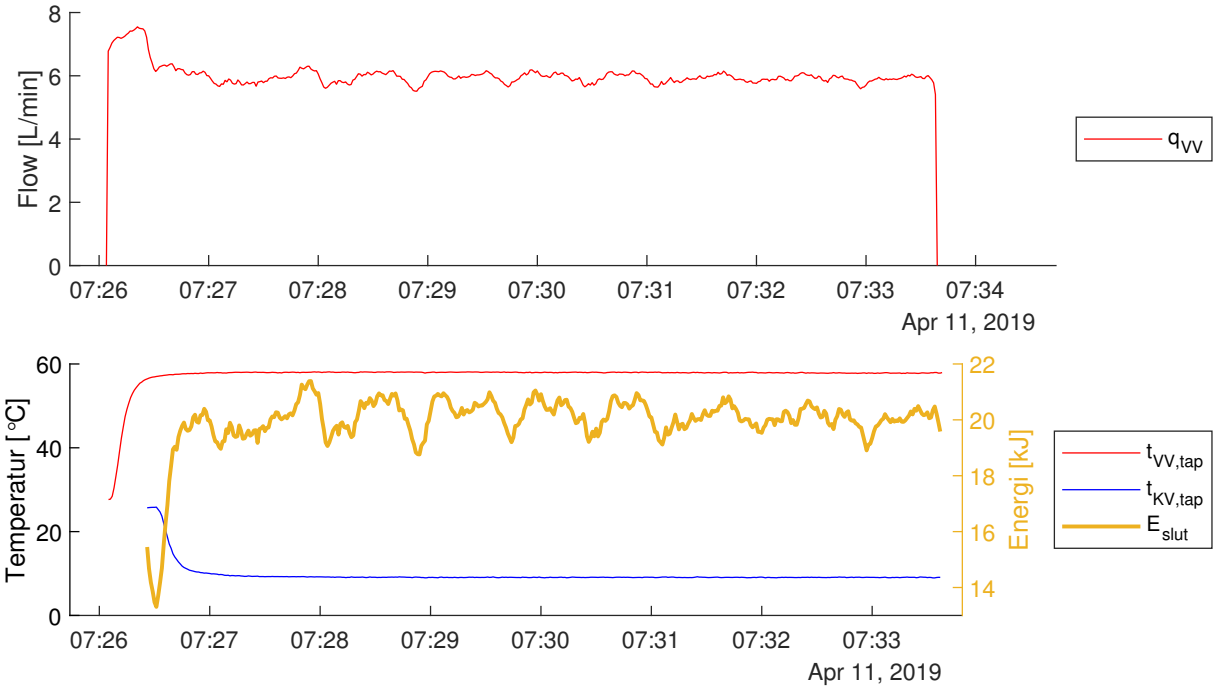
Det er dog vigtigt at nævne, at en mere central placering af teknikrummet vil øge rørlængden og derved også tabet til de resterende tapsteder i boligen. Med undtagelse af bruseren på bad1 indikerer de fastlagte tab vist på figuren, at en øget rørlængde vil være af mindre betydning for det samlede årlige tab for disse. Og selvom tabet for bruseren på bad1 vil øges i takt med en øget rørlængde, vurderes det at samlede årlige tab fra teknikrum til tapsteder samlet set vil kunne reduceres grundet ved en mere central placering af teknikrummet, grundet det største tab for bruseren på bad2.

10.2 Energiforbrug og tab ved Kildebjerg Søvej

I tråd med analysen for Kærhavebakken foretages ligeledes en analyse af energiforbruget og tabet i brugsvandssystemet for Kildebjerg Søvej. I modsætning til forrige analyse foretages beregningerne af energiforbruget ved Kildebjerg Søvej på baggrund af målinger over hele måleperioden. Ved analyse af målte værdier for fjernvarmeforbruget i Nilan-enheden i teknikrummet er det dokumenteret, at enheden ingen fjernvarme benyttede henover måleperioden, hvorfor E_{brutto} og effektiviteten af systemet ikke undersøges nærmere. I stedet tager analysen udgangspunkt i målinger ved tapsteder samt målinger logget med BMS-systemet, hvor fordeling af energiforbrug og tab undersøges. Ligesom for Kærhavebakken undersøges tabet fra sekundærsiden til tapsteder ved analyse af vandspild og rørtab, og afslutningsvist undersøges rørlængdens betydning ift. tabet.

10.2.1 Energiforbrug

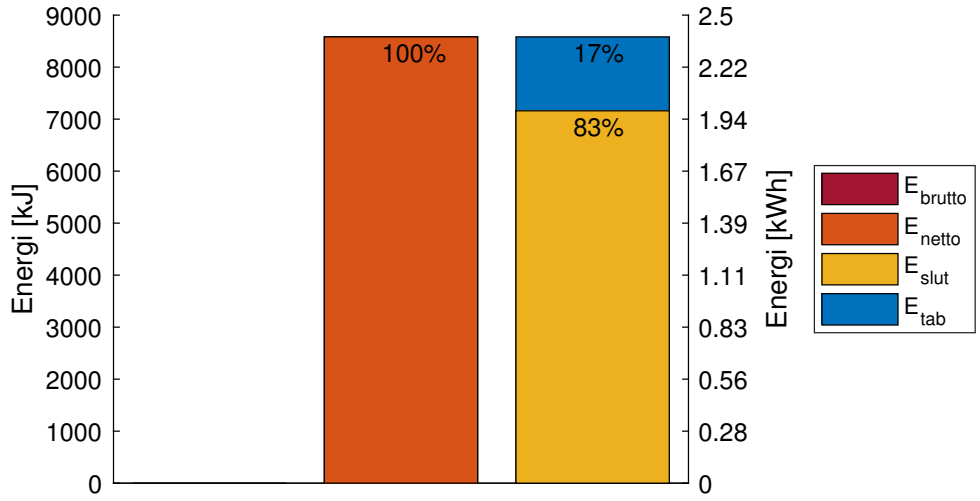
På baggrund af målinger ved tapsteder beregnes E_{slut} jf. Formel (10.3) for alle tapninger på sekundbasis henover måleperioden. Grundet opløsningen på BMS-systemet kan E_{netto} ikke udregnes på samme vis og målingerne kan derfor ikke sammenholdes på sekundbasis. På Figur 10.10 er vist et eksempel på tappe- og temperaturprofilet for et bad d. 11/04, hvor energiforbruget ved tapstedet, E_{slut}, ligeledes er angivet på sekundbasis.



Figur 10.10: Tappe- og temperaturprofil samt energiforbrug for E_{slut}.

Af tappe- og temperaturprofilet fremgår det på Figur 10.10, at flowet ved badets begyndelse er en smule højere, indtil varmtvandstemperaturen når ca. 58°C og der blandes koldt vand i tapningen. Idet der er tale om et badeprofil, betyder det, at målingen blev foretaget i selve teknikrummet for dette tapsted, hvilket også er forklaringen på, at koldtvandstemperaturen ved badet begyndelse er ca. 25°C hvorefter den begynder at falde. Grundet faldet i flowet og koldtvandstemepraturen ved badets begyndelse går der ca. 1 min., før energiforbruget, E_{slut}, stabiliseres omkring 20 kJ, kun med udsving grundet fluktuationer i flowet.

Den ovenstående fremgangsmåde benyttes for alle tapsteder henover hele måleperioden, hvortil en gennemsnitlig dagsværdi for energiforbruget ved tapsteder, E_{slut}, beregnes. Som beskrevet tidligere gjorde opløsningen på målingerne logget med BMS-systemet det ikke muligt at beregne energiforbruget på sekundærsiden i teknikrummet på sekundbasis. I stedet udregnes dette energiforbrug, jf. Formel (10.2), på baggrund af det totale varmtvandsforbrug logget med BMS henover hele måleperioden og en antagelse om, at vandet opvarmes fra 15°C til 60°C. Herefter beregnes en gennemsnitlig dagsværdi, der kan sammenholdes med energiforbruget ved tapsteder, og resultater fremgår af Figur 10.11.



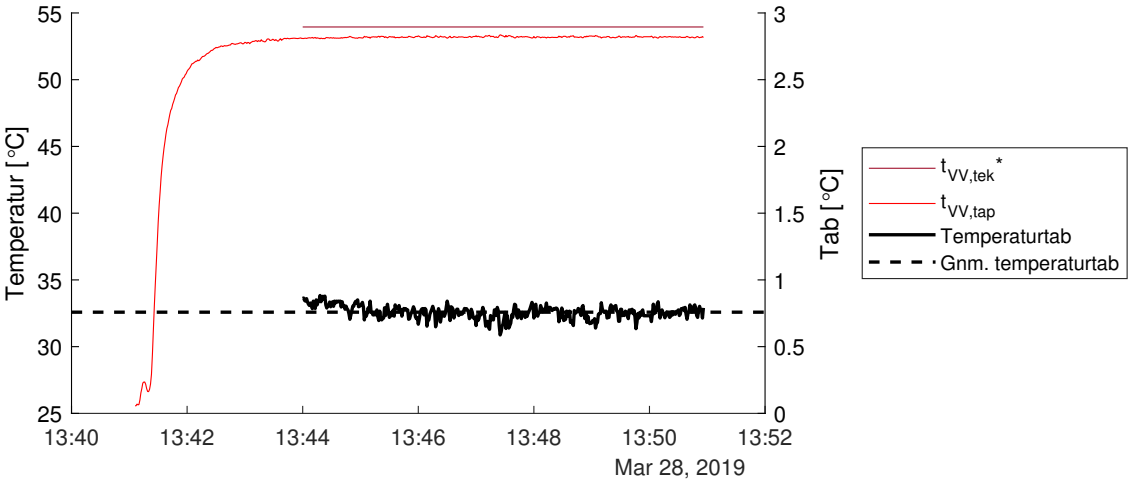
Figur 10.11: Gennemsnitlig fordeling pr. dag af energiforbrug samt tab i brugsvandssystemet for Kildebjerg Søvej.

Som det fremgår af Figur 10.11 udgør E_{netto} 100% af energiforbruget, hvilket skyldes den manglende analyse af primærsiden af brugsvandssystemet. Ved sammenligning med forbruget og fordelingen ved Kærhavebakken fås i dette tilfælde også et gennemsnitligt energiforbrug ved systemets sekundærside på ca. 2,3 kWh med et gennemsnitligt tab fra teknikrum til tapsteder på 17%. I dette tilfælde er det ikke muligt at dokumentere, hvor stor en procentdel af energien, der går tabt, når det varme vand produceres. Ligesom for Kærhavebakken indikerer resultaterne dog, at en del af energien går tabt, når vandet transporteres fra teknikrummet til tapsteder. I det følgende analyseres tabet fra teknikrummet til tapstederne næremere med henblik på at undersøge, hvor der er potentiale for eventuelle besparelser.

10.2.2 Tab i brugsvandssystem

Idet tabet fra primær- til sekundærsiden ikke analyseres for denne bolig, er det første tab, der undersøges for brugsvandssytemet ved Kildebjerg Søvej, rørtabet ved stationær forhold. Grundet opløsningen på BMS-systemet blev analysen foretaget ved manuel aflæsning af

varmtvandstemperaturen i teknikrummet på dagen for opsætningen af flowmålerne, d. 28/03. Ved at foretage en længere tapning på det fjerneste tapsted, i dette tilfælde håndvasken på badeværelset i forbindelse med soveværelset, og sammenholde målingerne fra tapstedet med den manuelle aflæsning bestemmes rørtabet ved stationære forhold. På Figur 10.12 er temperaturprofilet for det fjerneste tapsted sammenholdt med den manuelle aflæsning foretaget i teknikrummet d. 28/03 og temperaturtabet ved stationære forhold er beregnet.



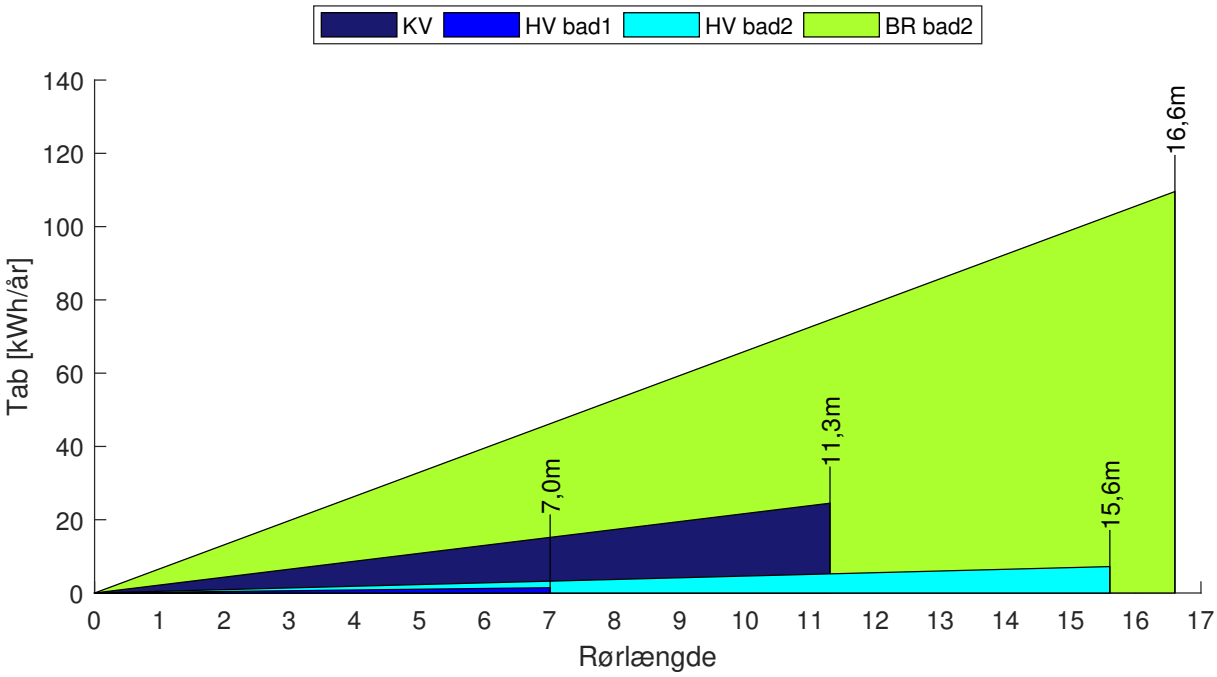
Figur 10.12: Rørtab ved stationære forhold for en tapning d.28/03. *Manuel aflæsning af varmtvandstemperaturen i teknikrummet.

Af Figur 10.12 fremgår det, at stationære forhold forekommer ca. 1,5 min. inde i tapningen, hvor der beregnes et gennemsnitligt temperaturtab på 0,76°C. Med en rørlængde på 15,6 m for dette tapsted og det gennemsnitlige temperaturtab for tapningen udregnes et gennemsnitligt rørtab ved stationære forhold på 0,049°C/m, svarende til 15,4 W/m ved et flow på 4,6 L/min. Transmissionskoefficienten for røret regnes til 0,8 W/mK, hvilket sammenlignet med værdien for Kærhavebakken på 5 W/mK indikerer, at vandrørene ved Kildebjerg Søvej er bedre isoleret. Men selvom resultatet viser, at vandrørene er bedre isoleret og transmissionskoefficienten ligger tættere på standardværdier for vandrør, kan det stadig diskuteres, hvorvidt den angivne fremgangsmåde for den stationære beregning er repræsentativ for varmetabet af rørene. Ligesom for Kærhavebakken må det konkluderes, at varmetabet af rør skal foretages ved dynamisk beregning, således de reelle forhold i hele røret længde afspejles korrekt.

I modsætning til Kærhavebakken er det ikke muligt at lave en analyse for Kildebjerg Søvej af, hvor stor procentdel af tabet fra teknikrummet til tapstedet der udgøres af hhv. vandspild og rørtab. Det skyldes, at målingerne fra BMS-systemet og derved også energiforbruget for sekundærsiden af systemet ikke kan beregnes på sekundbasis, hvorfor analysen af forholdet mellem E_{netto} og E_{slut} ikke kan foretages som eksemplet vist på Figur 10.7 på side 85. I stedet undersøges det samlede årlige tab fra teknikrummet til tapstederne ud fra samme fremgangsmåde som benyttet for Kærhavebakken. På baggrund af det gennemsnitlige daglige tab på 17%, svarende til 0,40 kWh, udregnes et årligt samlet tab på 144 kWh gældende for alle tapsteder i boligen.

Igen er det ikke muligt at foretage en nøjagtig opdeling af tabet til de enkelte tapsteder, hvorfor samme fremgangsmåde som for Kærhavebakken i stedet benyttes, velvidende at dette ikke vil afspejle en nøjagtig inddeling. I Kapitel 6, se Figur 6.6, blev fordelingen af varmtvandsforbruget fastlagt, og ud fra disse inddeles det samlede tab fra teknikrummet ud til de enkelte tapsteder.

For bruseren på bad2 beregnes det årlige tab dermed til 110 kWh/år, idet varmtvandsforbruget udgør 76%. Samme fremgangsmåde anvendes til at fastlægge tabet fra teknikrummet til de enkelte tapsteder, og resultater fremgår af Figur 10.13.



Figur 10.13: Årligt tab fra teknikrum til tapsteder afhængigt af rørlængde for brugsvandssystemet ved Kildebjerg Søvej.

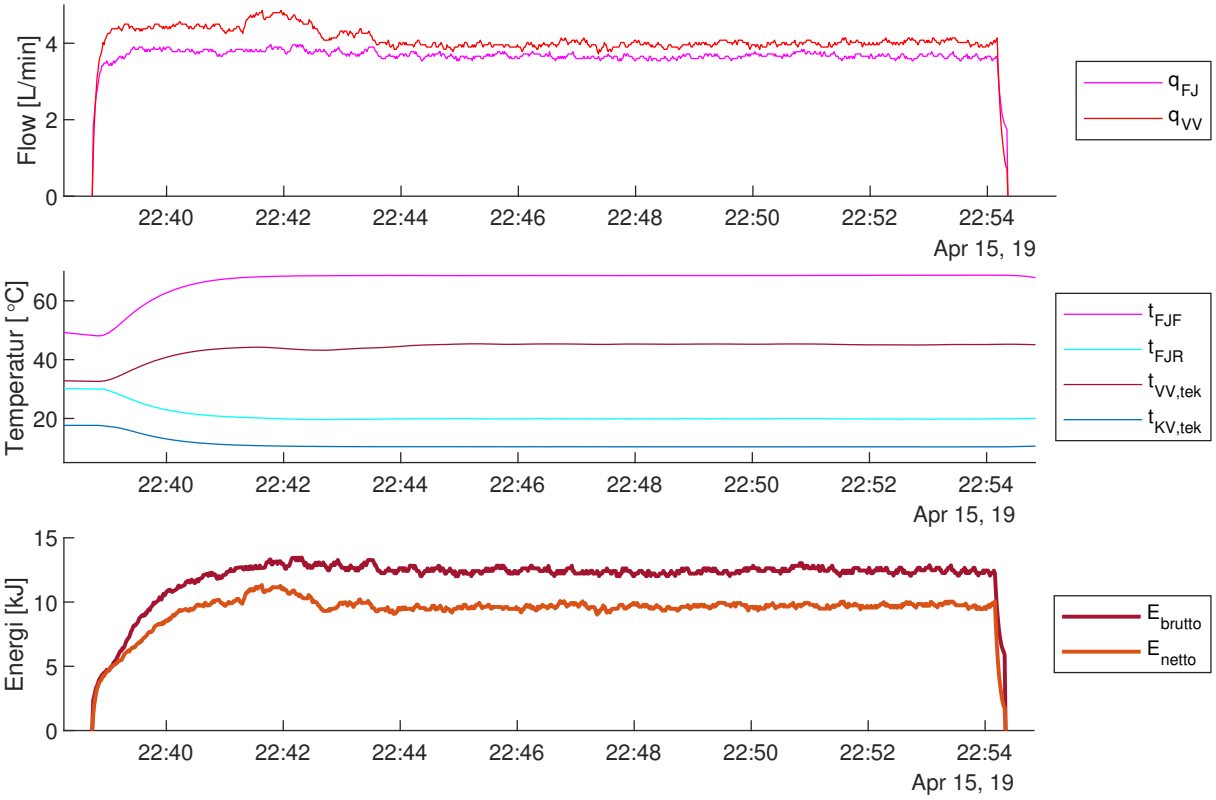
Selvom der ikke er tale om en nøjagtig inddeling, viser resultaterne på Figur 10.13, ligesom for Kærhavebakken, ikke overraskende, at bruseren på bad2 udgør det største tab fra teknikrum til tapsted på årsbasis. Idet varmtvandsforbruget for køkkenvasken for Kildebjerg Søvej udgjorde en større del af varmtvandsforbruget sammenlignet med Kærhavebakken, udgør tabet til køkkenvasken derfor også en større andel. For både bruseren og håndvasken på bad2 samt køkkenvasken ville en mere central placerering af teknikrummet derfor også have en positiv effekt på på det årlige samlede tab. En mere central placering af teknikrummet ville reducere rørlængden til de angivne tapsteder og kun håndvasken på bad1 ville få en øget rørlængde. Grundet det lave vandforbrug på håndvasken på bad1 vil en sådan ændring i rørlængden dog ikke have væsenlig betydning for det årlige tab, hvorfor det vurderes, at det årlige samlede tab ville kunne reduceres ved en mere central placering af teknikrummet.

10.3 Energiforbrug og tab ved Petersborgvej

For boligen på Petersborgvej ønskes energiforbruget og tabet i brugsvandssystemet ligeledes dokumenteret. Som beskrevet i Kapitel 3 blev målinger på Petersborgvej kun foretaget i teknikrummet, hvorfor energiforbruget og tabet, i modsætning til de to forrige boliger, kun undersøges for primær- og sekundærsiden af veksleren. Til analysen undersøges effektiviteten af veksleren ud fra forskellige tappeprofiler, mens der afslutningsvist kommenteres på cirkulationens betydning for brugsvandssystemet.

10.3.1 Energiforbrug

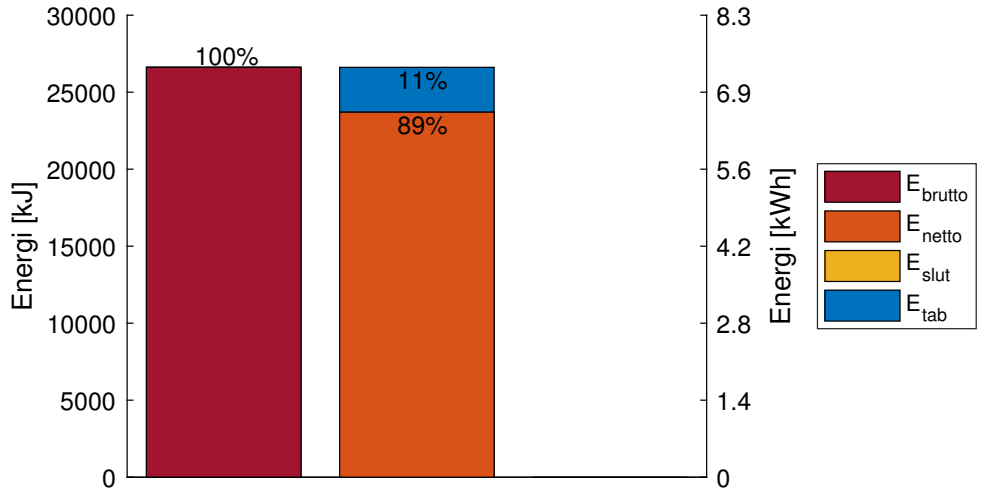
På baggrund af målingerne foretaget i teknikrummet beregnes E_{brutto} og E_{netto} jf. Formel (10.1) og Formel (10.2) for alle tapninger på sekundbasis henover måleperioden. På Figur 10.14 er vist et eksempel på en lang tapning d. 15/04, hvor tappe- og temperaturprofilet benyttes til udregningen af energien på primær- og sekundærsiden af veksleren.



Figur 10.14: Tappe- og temperaturprofil samt energiforbrug for hhv. E_{brutto} og E_{netto}.

Af tappeprofilet på Figur 10.14 fremgår det, at fjernvarme- og varmtvandsflowet begge ligger omkring 4 L/min, hvorfor det er temperaturforskellene på disse, der har størst indflydelse på forskellen mellem E_{brutto} og E_{netto}. Gennem hele tapningen forekommer en større temperaturforskel på primærsiden af veksleren for fjernvarmevandet, hvilket gør, at energien på primærsiden ligger højere end energien på sekundærsiden gennem hele tapningen. Resultaterne indikerer derfor, at der sker et næsten konstant tab henover veksleren ved de angivne forhold. Ved at benytte samme fremgangsmåde henover hele måleperioden beregnes et gennemsnitligt energiforbrug på dagsbasis for hhv. E_{brutto} og E_{netto}, hvor resultater fremgår af Figur 10.15.

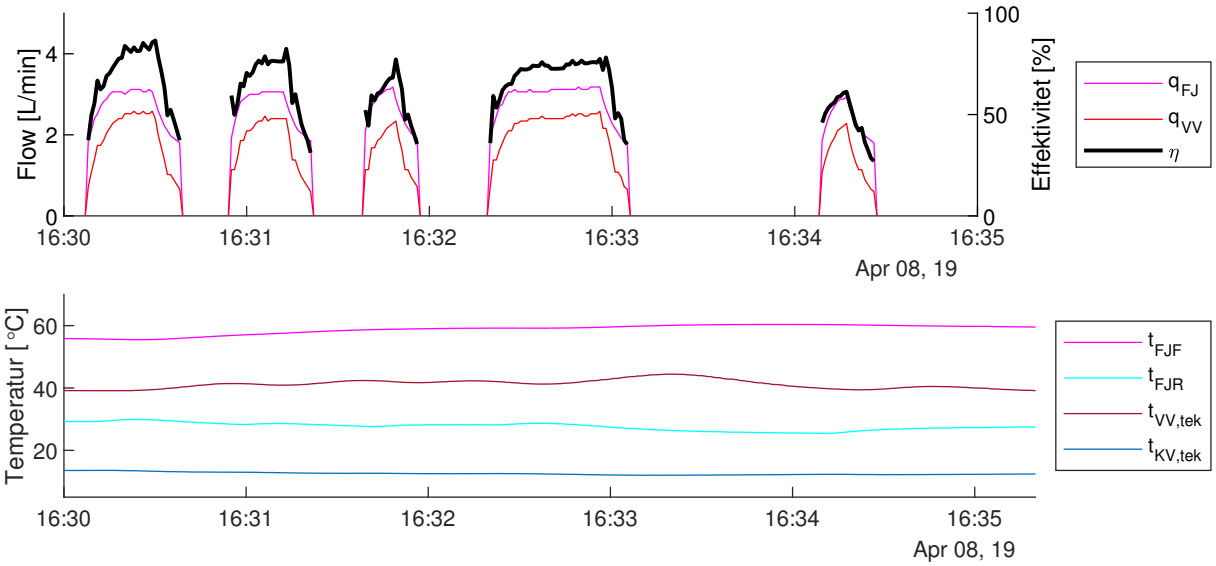
Af Figur 10.15 fremgår et dagligt energiforbrug på vekslerens primærside på ca. 26.600 kJ, svarende til 7,4 kWh, og med et tab på 11% ender energiforbruget på sekundærsiden på 23.600 kJ, svarende til 6,6 kWh. I overensstemmelse med det større varmtvandsforbrug på Petersborgvej er både E_{brutto} og E_{netto} næsten 3 gange så stort ved sammenligning med Kærhavebakken. Ved installation af målerne på Petersborgvej blev lange ventetider på det varme vand, på trods af cirkulation, observeret, hvorfor resultatet af tabet henover veksleren på 11% virker overraskende lavt. I det følgende foretages derfor en nærmere analyse af effektiviteten af veksleren og afslutningsvist kommenteres på cirkulationens betydning for brugsvandssystemet.



Figur 10.15: Gennemsnitlig fordeling af energiforbrug og tab i brugsvandssystemet pr. dag for Petersborgvej.

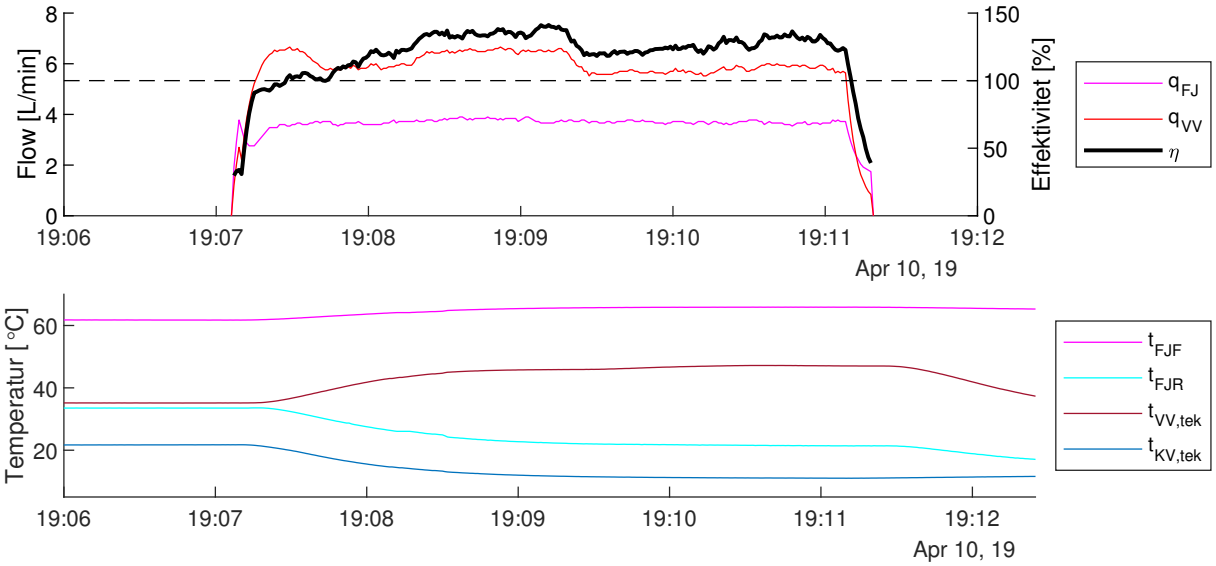
10.3.2 Tab i brugsvandssystem

Til analysen af tabet henover veksleren beregnes effektiviteten jf. Formel (10.4) for forskellige tapninger henover måleperioden. Det første eksempel, der fremgår af Figur 10.16, viser effektiviteten af veksleren henover en række korte tapninger efterfulgt af hinanden d. 08/04.



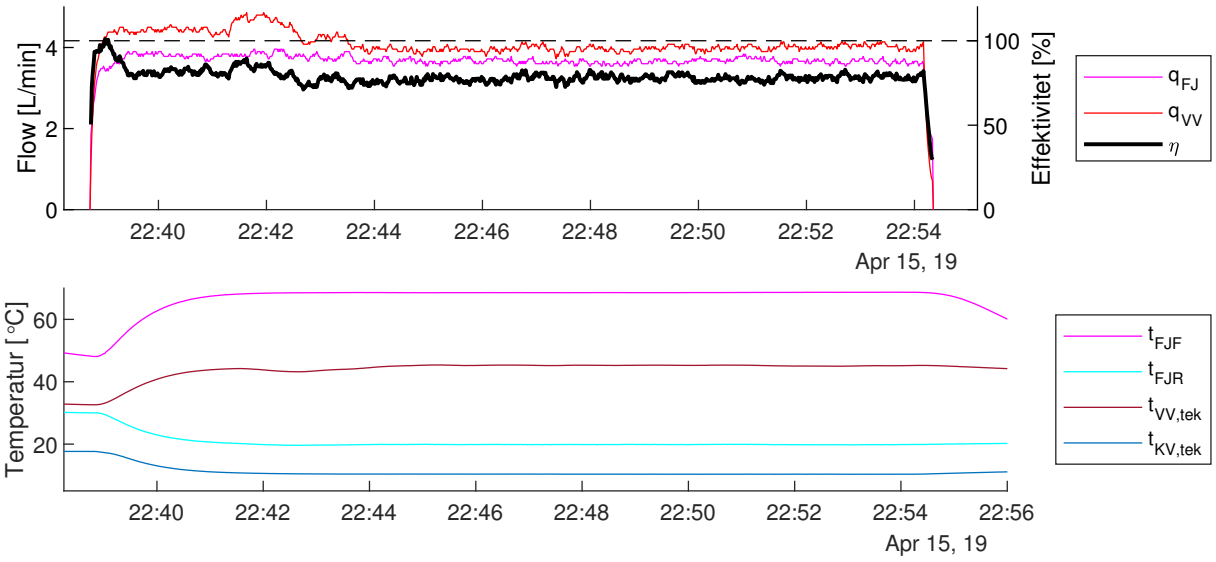
Figur 10.16: Effektivitet af veksler på Petersborgvej for tapninger efterfulgt af hinanden d. 08/04.

Af Figur 10.16 fremgår det, at effektiviteten i de fem tapninger ligger i et interval fra 30% - 85%. Det skyldes primært, at fjernvarmeflowet på ca. 3 L/min, som vist på figuren, ligger højere end varmtvandsflowet, hvormed E_{brutto} er større end E_{netto}. For den første, anden og fjerde tapning på figuren fremgår det, at der opnås et konstant forhold mellem fjernvarme- og varmtvandsflowet ca. 15 - 20 sek. inde i tapningen, hvorved effektiviteten rammer et stabilt niveau omkring 80%. Grundet en kortere varighed på den tredje og femte tapning opnås ikke et konstant forhold mellem de to flows, hvorfor effektiviteten er lavere i de to tilfælde. Et andet eksempel på effektiviteten er vist på Figur 10.17 for en tapning af længere varighed d. 10/04.



Figur 10.17: Effektivitet af veksler på Petersborgvej for en tapning på ca. 4 min d. 10/04.

I modsætning til forrige eksempel, viser Figur 10.17, at effektiviteten for tapningen d. 10/04 ligger højere end 100% i størstedelen af tapningen. For denne tapning ligger fjernvarmeflowet på ca. 3,8 L/min, altså lidt højere end det tidligere eksempel, og den højere effektivitet skyldes derfor det markant højere varmtvandsflow. Med et varmtvandsflow på ca. 6 L/min bliver energien på sekundærsiden af veksleren højere end energien på primærsiden og effektiviteten overstiger derved 100%. At effektivteten ved tapningens begyndelse og ca. 1 min ind i tapningen ikke overskrider 100%, selvom varmtvandsflowet ligger højere end fjernvarmeflowet, skyldes en højere temperaturforskel på primærsiden ved tapningens begyndelse. En effektivitet højere end 100% er af fysiske årsager ikke muligt, medmindre der fås et tilskud af varme andetsteds fra, eksempelvis gennem varmeakkumulering fra tidligere tapning. Havde dette været tilfældet for tapningen på Figur 10.17 havde effektiviteten i starten af tapningen oversteget 100% og ikke først senere inde i tapningen. Et sidste eksempel på effektiviteten af veksleren er vist på Figur 10.18 for en tapning med en varighed på ca. 15 min for d. 15/04, den samme tapning som benyttet ved analysen på Figur 10.14.



Figur 10.18: Effektivitet af veksler på Petersborgvej for en tapning på ca. 15 min d. 15/04.

Ligesom den forrige tapning fremgår det af Figur 10.18, at varmtvandsflowet for denne tapning også ligger højere end fjernvarmeflowet, men i dette tilfælde overstiger effektiviteten ikke 100%. Ligeledes opnås, som for det første eksempel på Figur 10.16, et konstant forhold mellem de to flows og en effektivitet omkring 80% ca. 1 min inde i tapningen. For fjernvarmeflowet er det bemærkelsesværdigt, at flowet i dette tilfælde også er ca. 3,8 L/min, selvom varmtvandsflowet er lavere, og dette kan indikere, at der måske er en begrænsning for flowet på primærsiden uafhængigt af flowet på sekundærsiden. Gennem analyse af målingerne henover hele måleperioden er dette scenario observeret flere gange, hvorfor eksempler ligesom Figur 10.17 viser, at effektiviteten overstiger 100% i 31% af tilfældene. Denne begrænsning kan skyldes setpunktet for trykdifferensregulatoren i brugsvandssystemet, der sikre en fast trykforskel mellem ind- og udløb, hvorfor fjernvarmeflowet får denne begrænsning lige under 4 L/min. Ved brug af samme fremgangsmåde henover hele måleperioden udregnes en gennemsnitsværdi for effektiviteten af varmeveksleren på 89%, svarende til forholdet mellem E_{brutto} og E_{netto}, som vist på Figur 10.15.

Selvom hovedformålet med målingerne på Petersborgvej ikke var at analysere cirkulationens betydning for brugsvandssystemet, blev dennes betydning alligevel undersøgt ift. fjernvarmeflowet. Ved at ændre på cirkulationspumpens effekt undersøges det, hvordan temperaturen og flowet på fjernvarmen ændrer sig. Resultaterne viste, at selvom der blev ændret på indstillingerne for cirkulationspumpen undervejs i måleperioden, gav dette ingen udsving af hverken fjernvarmetemperaturen eller -flowet, når der over en periode på 6 timer ikke blev tappet varmt vand, hvilket ellers var forventet ift. at opretholde en tilfredsstillende fremløbstemperatur på det varme vand i cirkulationsledningen. På baggrund af disse resultater vurderes, at fjernvarmeflowet er styret af trykdifferensregulatoren, der skal opretholde en fast trykforskel mellem ind- og udløb. For boligen på Petersborgvej betyder det, at der kun er flow på fjernvarmen, når der tappes varmt vand ved tapstederne, hvorfor der ikke skete udsving af fjernvarmeflowet ved ændring af cirkulationspumpens effekt. Dog kunne der på baggrund af beboernes udtagelser mærkes en forskel den dag, hvor cirkulationspumpen var slukket, mens de ingen forskel mærkede ved ændringen fra 5 W til 15 W. Selvom målingerne ikke indikerede en forskel vurderes ud fra beboernes udtalelser, at cirkulationen har en effekt ift. ventetiden på det varme vand. Derfor bør en analyse af brugsvandssystemet omfatte målinger både i teknikrummet, på cirkulationsledningen og ved tapstederne, hvis en dokumentation af cirkulationens betydning i en bolig ønskes dokumenteret mere nøje.

10.4 Opsummering

I de ovenstående afsnit er energiforbruget og tabet i brugsvandssystemerne undersøgt og dokumenteret på baggrund af målinger foretaget i de tre boliger. For Kærhavebakken omfattede analysen hele brugsvandssystemet for d. 13/09, hvor der var foretaget målinger for både teknikummet og tapstederne. Grundet varmtvandsproduktionen gennem ventilationsanlægget ved Kildebjerg Søvej omfattede analysen kun energiforbruget på sekundærsiden af systemet og ved tapstederne og herved også kun tabet fra teknikrummet til tapstederne. For den sidste bolig på Petersborgvej omfattede analysen kun energiforbruget i teknikrummet og tabet over veksleren, idet der ikke blev målt ved tapstederne. I Tabel 10.1 er resultaterne for energiforbruget på dagsbasis i de tre boliger opsummeret for hhv. E_{brutto}, E_{netto} og E_{slut} sammen med det procentvise tab.

Tabel 10.1: Dagligt energiforbrug og tab i brugsvandssystemet for de tre boliger.

	E_{brutto} [kWh/dag]	Tab [%]	E_{netto} [kWh/dag]	Tab [%]	E_{slut} [kWh/dag]
Kærhavebakken	2,59	8	2,38	18	1,95
Kildebjerg Søvej	-	-	2,38	17	1,99
Petersborgvej	7,39	11	6,58	-	-

Som det fremgår af Tabel 10.1, er energiforbruget, E_{netto}, ens for Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej. Hertil ligger energiforbruget ved tapstederne for de to boliger, E_{slut}, også tæt, hvorved tabet fra teknikrummet til tapstederne beregnes til hhv. 18% og 17%. Ved sammenligning af resultaterne for tabet over veksleren ved Kærhavebakken og Petersborgvej fremgår et 3% større tab for veksleren på Petersborgvej, mens selve energiforbruget er næsten tre gange større end for de to andre boliger. Årsagen til det større energiforbrug ved Petersborgvej skal findes i det større varmtvandsforbrug, der i henhold til Kapitel 6 også var det højeste for de tre boliger.

For brugsvandssystemerne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej er det dokumentet, at en mere central placering af teknikrummet i boligerne ville minimere tabet fra teknikrummet til tapsteder. Idet det største varmtvandsforbrug i begge boliger tappes på bruseren, det fjerneste tapsted, udgør energiforbruget til opvarmning af vand til bade derfor også den største procentdel af det samlede energiforbrug på dagsbasis. På baggrund af analyserne konkluderes heraf, at en mere optimal placering af teknikrummet for de to boliger ville være centralt i boligen. Herved minimeres rørlængden til de enkelte tapsteder, hvorved det årlige energispild fra teknikrummet til tapstedet også reduceres, særligt for bruseren. Det skal hertil nævnes, at en nærmere analyse af rørtabet fra teknikrummet til tapstedet bør fortages ved fremtidige analyse gennem dynamiske beregninger.

Del IV

Fremtidsløsninger

Bruser med varmegenvinding 11

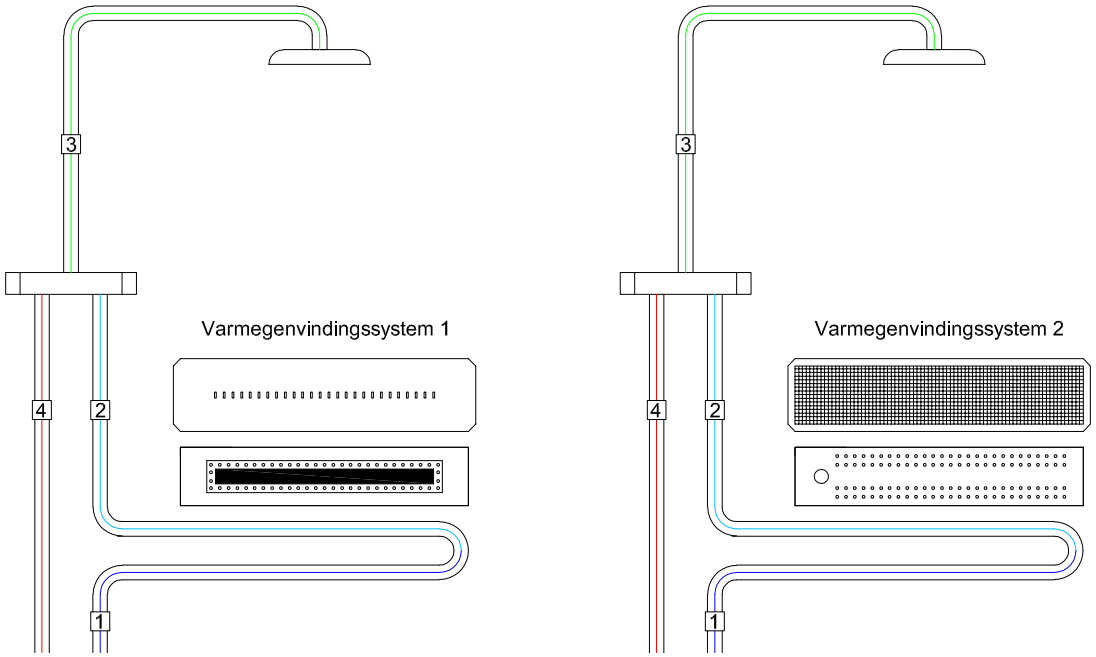
I Del III blev det samlede vandforbrug, herunder varmtvandsforbruget, undersøgt for tre forskellige husstande. Her blev det for to af boligerne, gennem målinger foretaget ved tapstederne, dokumenteret, at både varmtvandsforbruget og det samlede vandforbrug til brusebade udgør den største andel af vandforbruget. Grundet et øget fokus på at reducere det samlede energiforbrug i boliger, heriblandt energiforbruget til varmt vand, er det af interesse at undersøge, hvilke fremtidige løsninger der kan medføre et reduceret varmtvandsforbrug og dermed energiforbrug ved brusebade. Flere virksomheder har allerede i dag udviklet systemer, der genanvender varmen, og i nogle tilfælde også vandet, for på den måde at reducere energiforbruget i forbindelse med brusebade. I Malmø har virksomheden Orbital Systems udviklet et brusesystem, der genanvender både vandet og energien, mens en virksomhed i Tyskland har udviklet forskellige løsninger til et varmegenvindingssystem, hvor energien fra det varme vand bruges til at opvarme det kolde vand.

I dette projekt er der foretaget en række tests på et brusesystem udstyret med to af de udviklede varmegenvindingssystemer fra den tyske virksomhed. Formålet med testene er at fastlægge, hvad effektiviteten er for hver af de to varmegenvindingssystemer. Effektiviteten undersøges både ved forskellige setpunkter for tappetemperaturen og ved forskellige fremløbstemperaturer for det varme vand. Ud fra effektiviteten af varmegenvindingssystemerne fastlægges efterfølgende, hvor stor en besparelse systemerne ville medføre, hvis de var monteret i boligerne på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej. I nedenstående afsnit præsenteres brusesystemet og resultaterne af de foretagende tests, mens der henvises til Appendix G for en detaljeret gennemgang af fremgangsmåden for testene, databehandlingen og genereringen af referencebade.

11.1 Varmegenvindingssystemer

De to analyserede varmegenvindingssystemer er fremstillet og godkendt til brug i Tyskland. Oprindeligt var det ligeledes tiltænkt, at et af de to systemer skulle være installeret på begge badeværelser på Kildebjerg Søvej og indgå som en del af forskningsprojektet. Dog er begge systemer konstrueret med skjulte samlinger, hvorfor de ikke er lovlige til brug i Danmark, og derfor er de ikke installeret i nogle boliger. I stedet må de kun anvendes til laboratorieforsøg, hvorfor de foretagende tests er udført på en brusekabine i et laboratorie. De to varmegenvindingssystemerne, der testes i projektet, er hver monteret på en bundplade, der kan indsættes i brusekabinen. På Figur 11.1 er opbygningen af de to systemer vist.

Det første varmegenvindingssystem (VGS 1) består af en beholder, som vandet opsamles i. Når denne er fyldt op, løber vandet ud over kanten og ned gennem hullerne, hvorfra det rammer koldtvandsrørene og derved varmer det kolde vand op, før det når blandingsbatteriet. I bunden



Figur 11.1: Opbygning af de to analyserede varmegenvindingssystemer tilhørende brusekabinen. Talene 1 - 4 indikerer placering af de fire flowmålere.

er installeret et afløb, hvor vandet ledes ud fra systemet. Det andet varmegenvindingssystem (VGS 2) er opbygget på samme måde, men i stedet for en stor opsamlingsbeholder haves en mindre opsamlingsbakke med huller, hvor vandet løber igennem og rammer koldtvandsrørene. Opsamlingsbakken har et lille overløb, hvor vandet ledes direkte ned til bunden af systemet og ud i afløbet. Dertil er systemet VGS 2 udstyret med dobbelt så meget rørføring til koldt vand, idet to sæt koldtvandsledninger er installeret på bundpladen. Det er derfor muligt at anvende enten det ene eller begge sæt. Ved de foretagende tests var kun det ene sæt af koldtvandsledninger tilsluttet, hvorfor der haves samme længde på koldtvandsrørene for de to varmegenvindingssystemer.

På figuren er placeringen af de fire flowmålere, der er anvendt til testene, vist, hvor en flowmåler er monteret på det varme vand før blandingsbatteriet, en flowmåler måler det kolde vand før varmegenvindingssystemet, en flowmåler måler det kolde vand efter varmegenvindingssystemet og en måler på mixflowet efter blandingsbatteriet. Når fremløbstemperaturen på det varme vand omtales i de følgende afsnit, skal det noteres, at der er tale om den målte varmtvandstemperatur umiddelbart før blandingsbatteriet og ikke den varmtvandstemperatur, der sendes af sted fra teknikrummet, da denne er ukendt.

11.2 Testresultater af varmegenvindingssystemer

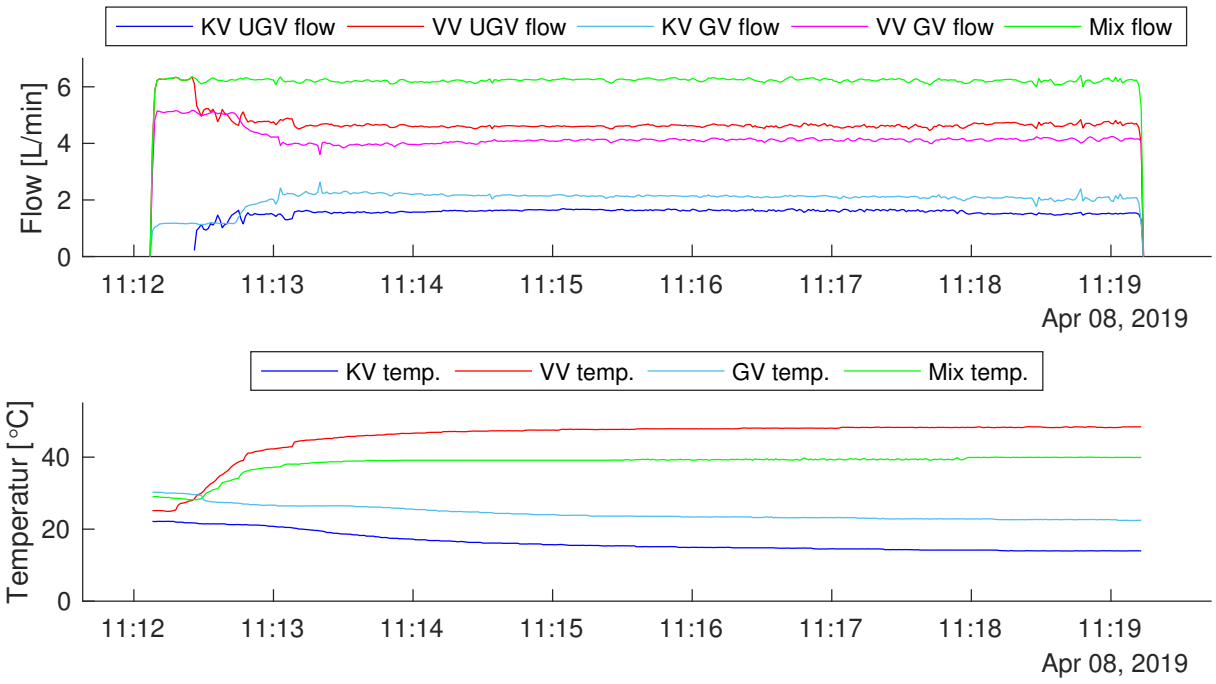
Effektiviteten af de to varmegenvindingssystemer fastlægges ved at lave en række tests på brusekabinen. Ud fra termostaten på blandingsbatteriet ændres på setpunktet for temperaturen, hvormed forskellige typer bade er undersøgt. Hver test er foretaget på begge varmegenvindingssystemer, og herefter er resultaterne brugt til at generere et referencebad, hvor der ikke er gjort brug af varmegenvinding. Ved at sammenligne resultaterne med og uden brug af varmegenvinding kan effektiviteten fastlægges for hver test. Slutteligt er en gennemsnitsværdi for effektiviteten regnet for hvert af de to varmegenvindingssystemer. I Tabel 11.1 er vist en oversigt over de syv tests, der er foretaget. For de udførte tests nedenfor er varmtvandstemperaturen

maksimalt registreret til 49°C umiddelbart før blandingsbatteriet.

Tabel 11.1: Oversigt over udførte tests på bruser med varmegenvinding. Varmtvandstemperaturen for det varme vand er 49°C for alle badene. *VGS = varmegenvindingssystem.

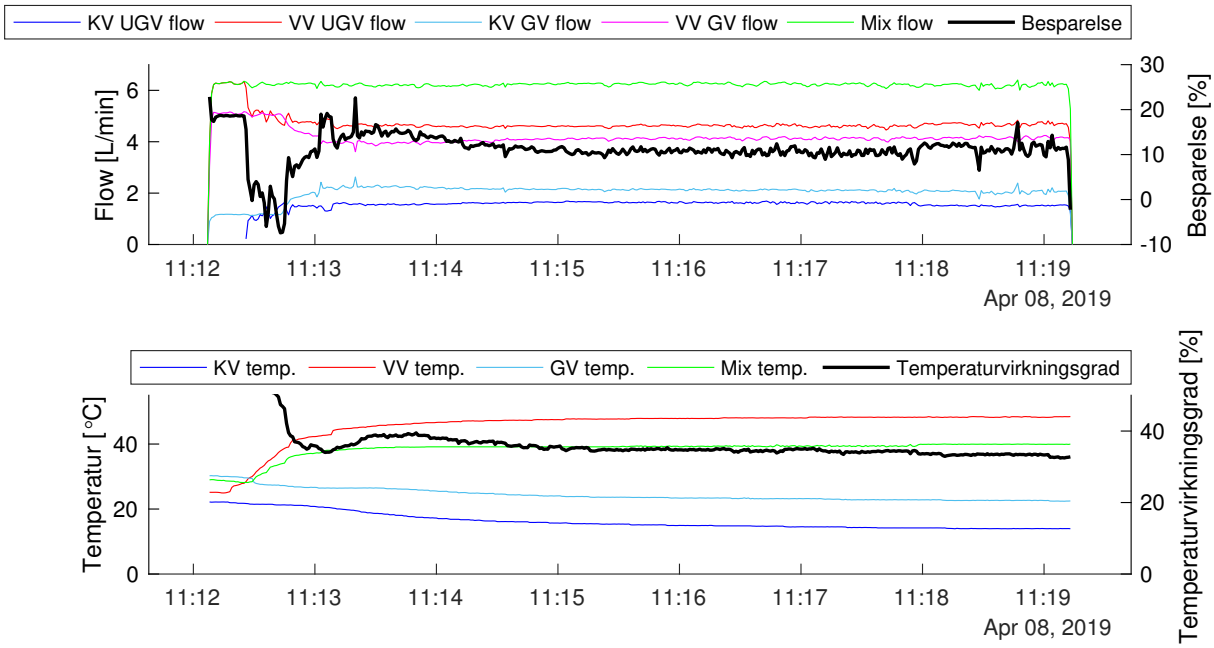
Test	VGS	Varighed [mm:ss]	Flow [L/min]	Setpunkt mix temp. [°C]	Tid siden forrige bad [mm:ss]
1.1	1	07:01	6,2	38,5	00:00
1.2	2	07:03	6,2	38,5	60:00
2.1	1	07:04	6,2	39,5	60:00
2.2	2	07:05	6,2	39,5	80:00
3.1	1	05:00	6,3	42,5	60:00
3.2	2	05:05	6,2	42,5	60:00
4.0	2	06:00	5,6	38,5	-

Test 1 - 3 er alle foretaget for begge varmegenvindingssystemer, mens Test 4 kun er foretaget for VGS 2. I modsætning til de foregående tests, hvor et bad med ventetid på det varme vand er undersøgt, er det varme vand for Test 4 ledt hen til blandingsbatteriet umiddelbart før testen foretages. Dermed undersøges det for Test 4, hvor stor en betydning ventetiden har på effektiviteten af VGS 2. Varigheden for alle bade er mellem 5 og 7 min., således stationære forhold opnås. Dertil er hver test foretaget med en times mellemrum, således omtrent de samme forhold haves for hver test. Dog er koldtvandstemperaturen ikke konstant for alle tests, hvorfor der mellem to identiske tests på hver af de to varmegenvindingssystemer kan forekomme mindre afvigelser i forholdene. På Figur 11.2 er vist flow- og temperaturprofilet for Test 2.2. For tappeprofilet er resultater både vist med og uden brug af varmegenvinding, mens temperaturprofilet er det samme for begge test, men med en højere koldtvandstemperatur ved brug af varmegenvinding.



Figur 11.2: Tappe- og temperaturprofil for Test 2.2 med og uden brug af varmegenvinding.

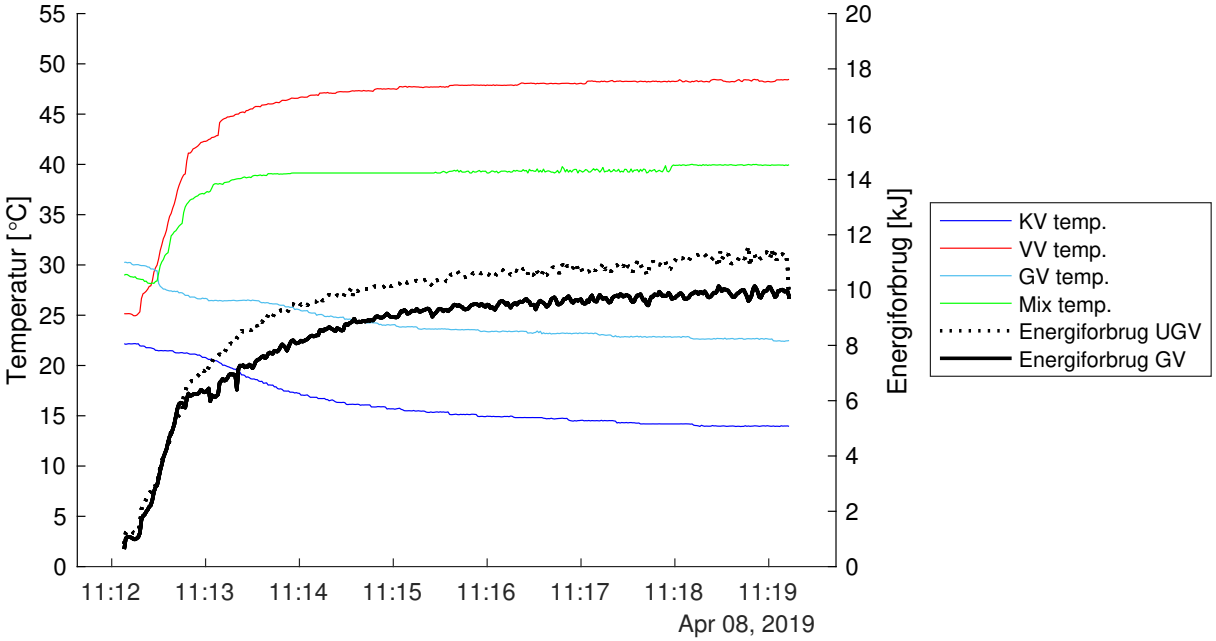
Resultaterne på Figur 11.2 viser, at der ved brug af varmegenvinding haves et større koldtvandsforbrug end uden brug af genvinding, mens varmtvandsforbruget er reduceret tilsvarende. Ved brug af genvinding ses det også, at der allerede fra starten af badet anvendes både koldt og varmt vand, mens der uden brug af genvinding først blandet koldt vand i, når varmtvandstemperaturen overstiger mixtemperaturen. Efter ca. 1 min. haves næsten stationære forhold, dog med koldt- og varmtvandstemperaturer der hhv. falder og stiger 1°C. Ud fra de to tappeprofiler er besparelsen på det varme brugsvand fastlagt for Test 2.2. Denne er vist på Figur 11.3, hvor temperaturvirkningsgraden for varmegenvindingssystemet også er indtegnet.



Figur 11.3: Besparelsen på varmt brugsvand ved brug af VGS 2 samt temperaturvirkningsgraden for Test 2.2.

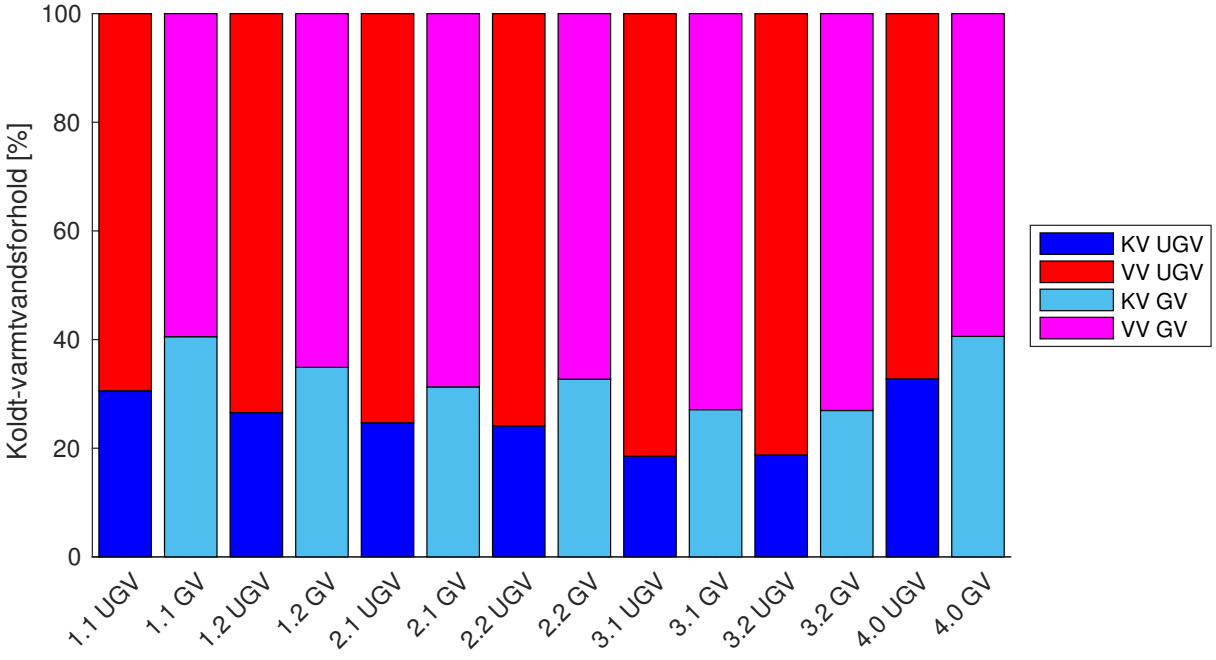
Af figuren fremgår det, at besparelsen i starten af badet er knap 20%, idet der ikke anvendes noget koldt vand ved referencebadet. Når der blandes koldt vand i referencebadet også, og de stationære forhold indtræffer, få en besparelse på ca. 11%. Dette indikerer derfor, at der bruges 11% mindre varmt vand, når varmegenvindingssystemet er i brug sammenlignet med referencebadet. Figuren viser også at temperaturvirkningsgraden i starten ligger over 100%, idet varmegenvindingstemperaturen, som følge af den foregående Test 2.1, er højere end mixtemperaturen, mens den for den resterende del af badet er ca. 30%. Den gennemsnitlige temperaturvirkningsgrad er 34%, hvilket betyder, at 34% af energien fra vandet, der løber nedover varmegenvindingssystemet, bliver genanvendt til at varme det kolde vand op.

Endeligt er nettoenergiforbruget, ved en antagelse om en konstant koldtvandstemperatur i teknikrummet på 13°C og en varmtvandstemperatur, der ligger 5°C højere i teknikrummet end ved brusekabinen, udregnet med og uden brug af varmegenvinding for Test 2.2, hvor resultater er præsenteret på Figur 11.4.



Figur 11.4: Nettoenergiforbrug til produktion af varmt vand i teknikrummet med og uden brug af varmegenvinding for Test 2.2.

Figur 11.4 viser, at nettoenergiforbruget med brug af varmegenvindingssystemet ligger lavere end nettoenergiforbruget for referencebadet. For de første sekunder af badet haves ca. samme energiforbrug, da det varme vand varmes op. Efterfølgende ligger genvinding lavere, idet flowet for det varme vand er lavere som følge af en højere koldtvandstemperatur og dermed et større koldtvandsforbrug. For hele badet haves et nettoenergiforbrug på 5.226 kJ for referencebadet og 4.634 kJ for badet med brug af varmegenvinding, hvilket giver en besparelse på 11%. På Figur 11.5 er vist en oversigt over koldt-varmtvandsforholdet for alle tests.



Figur 11.5: Oversigt over koldt-varmtvandsforhold for Test 1.1 - 4.0 med og uden brug af varmegenvinding.

Koldt-varmtvandsforholdet på Figur 11.5 viser, at der anvendes mest varmt vand ved Test 3.1 - 3.2, idet setpunktet for temperaturen er højest for denne. Omvendt anvendes der mindst varmt vand for Test 1.1 - 1.2, hvor setpunktet er 38,5°C. Forskellen mellem fordelingen af koldt og varmt vand for Test 1.1 og Test 1.2 skyldes, at koldt og varmtvandstemperaturerne ikke er nøjagtig de samme for de to tests. Derfor ændres forholdet en anelse, på trods af et identisk setpunkt. Resultaterne viser også, at forbruget af varmt vand reduceres for alle tests, når der anvendes varmegenvinding, idet koldtvandstemperaturen derved stiger. Det laveste varmtvandsforbrug haves ved Test 4.0, hvor der ingen ventetid haves. Sammenlignet med Test 1.1 - 1.2, som har samme setpunkt for temperaturen, fremgår det, at varmtvandsforbruget ligger ca. 5% lavere. Igen er det med til at understrege betydningen af ventetiden ved en varmtvandstapning. Ved brug af samme fremgangsmåde som for Test 2.2 er energiforbruget, besparelsen og temperaturvirkningsgraden fastlagt for alle tests og resultater præsenteret i Tabel 11.2.

Tabel 11.2: Oversigt over energiforbrug, besparelse og temperaturvirkningsgrad for alle tests med og uden brug af varmegenvinding.

Test	Energiforbrug UGV [kWh]	Energiforbrug GV [kWh]	Besparelse [%]	Temperatur-virkningsgrad [%]
1.1	0,55	0,47	14	33
1.2	0,59	0,52	11	31
2.1	0,61	0,56	9	32
2.2	0,62	0,55	11	34
3.1	0,34	0,30	11	36
3.2	0,34	0,31	10	36
4.0	0,38	0,34	11	32

Ud fra resultaterne i Tabel 11.2 fremgår det, at besparelsen varierer mellem 9% og 14% for de to varmegenvindingssystemer mens temperaturvirkningsgraden ligger mellem 31% og 36%. Energiforbruget til badene varierer mellem de enkelte tests grundet forskellige setpunkter for temperaturen, mens det reduceres med den respektive besparelse ved brug af varmegenvinding. Resultaterne indikerer ydermere, at der ikke er nogen væsentlig forskel på de to varmegenvindingssystemer. Ved brug af resultaterne for Test 1 - 3 regnes middelværdier for besparelsen og temperaturvirkningsgraden ud for de to systemer, hvor resultaterne fremgår af Tabel 11.3.

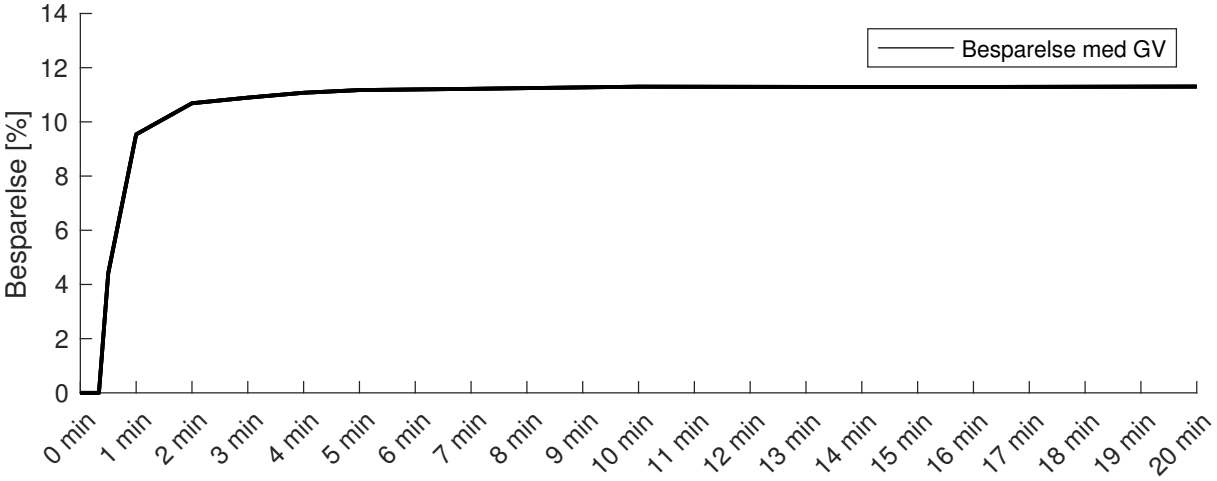
Tabel 11.3: Sammenligning af de to varmegenvindingssystemer ud fra en gennemsnitlig besparelse og temperaturvirkningsgrad.

VGS	Gns. besparelse [%]	Gns. temperatur-virkningsgrad [%]
1	11	34
2	11	33

Resultaterne i Tabel 11.3 understreger ligeledes, at de to varmegenvindingssystemer er ens, hvad angår effektivitet. Besparelsen og temperaturvirkningsgraden er marginalt højere for VGS 1, men forskellene er meget afhængige af, hvilke forhold der har gjort sig gældende for de respektive tests,

hvorvidt koldt- og varmtvandstemperaturen har været tilstrækkelig ens mellem testene og om der er opnået nøjagtig samme afkøling mellem testene. Ud fra betingelserne for de foretagende tests konkluderes det derfor, at der ingen forskel er på de to varmegenvindingssystemer, men det skal nævnes, at der for VGS 2 er mulighed for at koble det andet sæt rør på, således rørlængden fordobles. Dette vil give anledning til større opvarmning af det kolde vand og derved øge eff for VGS 2. Det anbefales derfor at foretage yderligere tests med denne opsætning, så den bedste effektivitet for VGS 2 kan fastlægges.

Varigheden af alle de foretagende tests var mellem 5 og 7 min., idet denne længde både afspejler varigheden af bade observeret på Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej og gav anledning til at opnå stationære forhold. Gennem måleperioder er bade af både kortere og længere varighed også observeret, hvorfor det også er af interesse at undersøge, hvordan besparelsen fordeler sig som funktion af varigheden af et bad. Ved at tage udgangspunkt i Test 1.1, hvor rørene er afkølet, udregnes besparelsen for bade af op til 20 min. varighed. Resultaterne er vist på Figur 11.6



Figur 11.6: Besparelsen ved brug af varmegenvindingssystem som funktion af varigheden af et bad.

Af Figur 11.6 fremgår det, at der ikke forekommer nogen besparelse de første 20 sek., idet det varme vand først skal nå frem til bruseren, før der kan anvendes genvinding. Herefter stiger besparelsen gradvist indtil den stabiliserer sig omkring 11% efter ca. 2 min. Resultaterne indikerer ligeledes, at der ikke er nogen væsentlig forskel på besparelsen ved varigheder over 4 - 5 min. Omvendt er der ingen minimumsgrænse på varigheden af et bad, da selv et bad på kun 1 - 2 min. vil give anledning til omtrent den samme besparelse.

11.3 Fremløbstemperatur ved tapsted

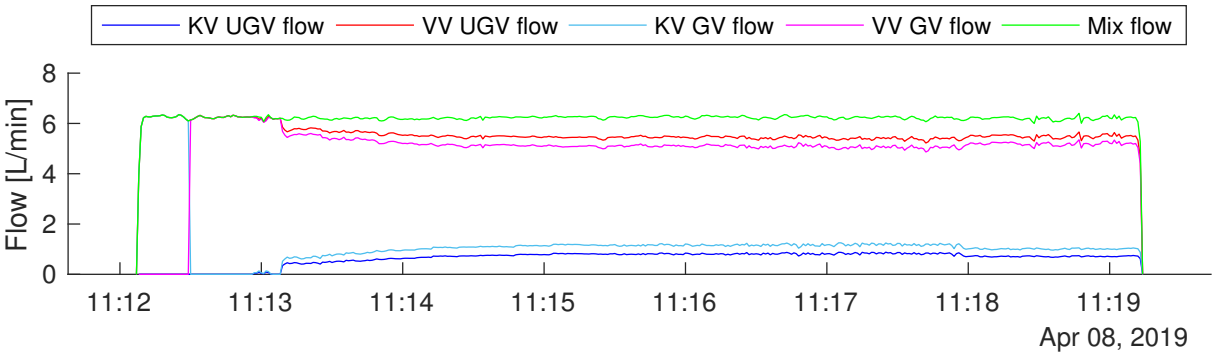
Resultaterne i det forrige afsnit dokumenterede, at den gennemsnitlige effektivitet for begge varmegenvindingssystemer var ca. 11%. Effektiviteten på varmegenvindingssystemerne er dog afhængig af temperaturen af det varme vand ved selve tapstedet. Alle tests blev udført med samme varmtvandstemperatur, hvor denne ved brusekabinen maksimalt nåede 49°C. Varmtvandstemperaturen i en bolig afhænger af fremløbstemperaturen fra teknikrummet samt tabet ud til tapstedet, og da fremløbstemperaturen i boliger varierer, er formålet med analysen at undersøge betydningen af varmtvandstemperaturen ved tapstedet og dokumentere dennes betydning for effektiviteten af systemet.

Til analysen tages der udgangspunkt i Test 2.2, hvilken fungerer som reference. Ved brug af data fra denne test justeres temperaturen på det varme vand ved enten at tillægge eller fratrække ændringen over hele badets varighed. Dermed fås nye varmtvandsprofiler og heraf nye koldt-varmtvandsforhold. I Tabel 11.4 fremgår en oversigt over de foretagne tests.

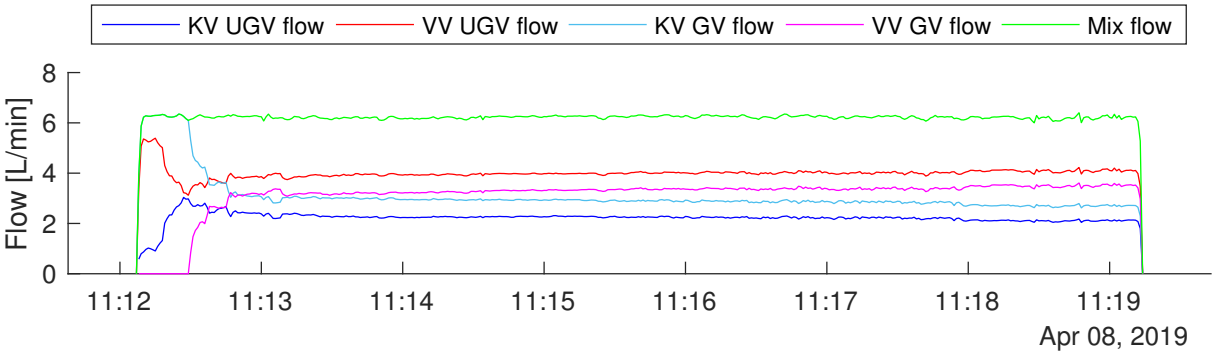
Tabel 11.4: Oversigt over fem udførte tests, hvor varmtvandstemperaturen ændres ift. Test 2.2.

Test	Ændring i varmtvands-temperatur [°C]	Varmtvandstemperatur ved tapsted [°C]
2.2 (Ref.)	0	49
2.2.1	-9	40
2.2.2	-7	42
2.2.3	-5	44
2.2.4	5	54
2.2.5	9	58

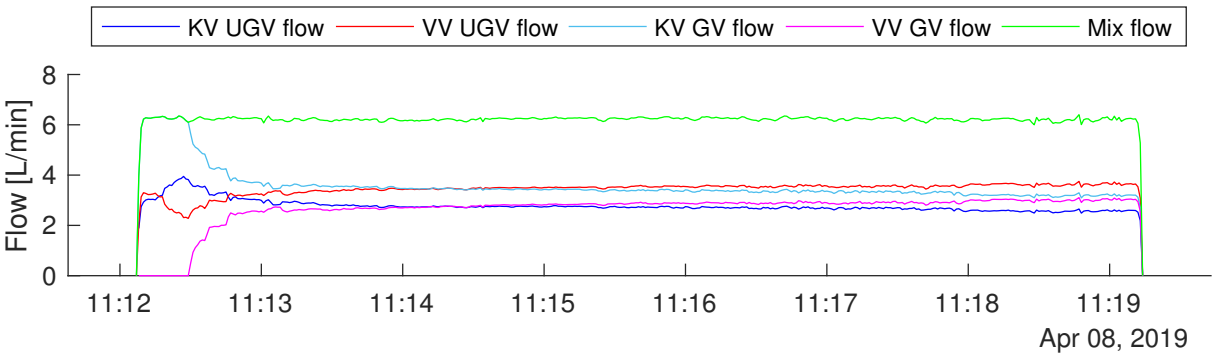
På baggrund af værdierne for varmtvandstemperaturerne præsenteret i Tabel 11.4, undersøges tappeprofilet for badene med henblik på at dokumentere forholdet og ændringen af koldt og varmt vand. På Figur 11.7 - 11.9 fremgår tappeprofilet for tre af de udførte test med en varmtvandstemperatur på hhv. 44, 54 og 58°C.



Figur 11.7: Tappeprofil for Test 2.2.3 med en varmtvandstemperatur på 44°C.

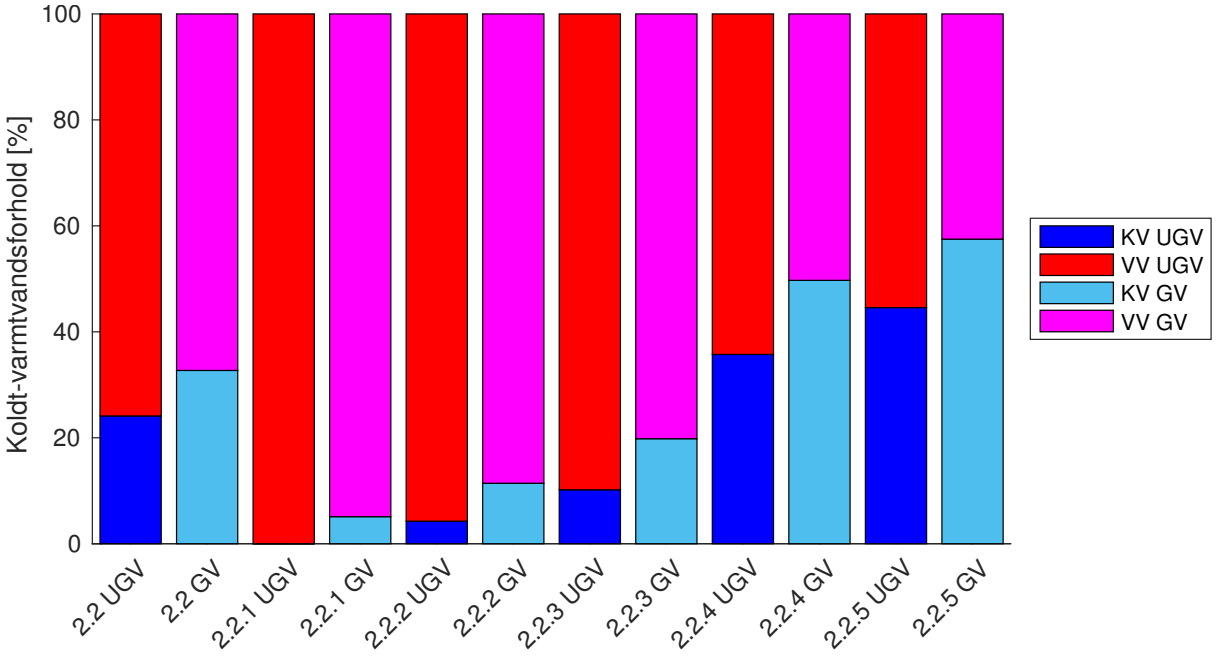


Figur 11.8: Tappeprofil for Test 2.2.4 med en varmtvandstemperatur på 54°C.



Figur 11.9: Tappeprofil for Test 2.2.5 med en varmtvandstemperatur på 58°C.

Figurerne illustrer betydningen af varmtvandstemperaturen, og hvordan denne påvirker koldt-varmtvandsforholdet. Ved en varmtvandstemperatur på 44°C, se Figur 11.7, anvendes væsentligt mere varmt vand sammenlignet med koldt vand. Grundet en lavere varmtvandstemperatur end koldtvandstemperatur med varmegenvinding anvendes i starten af badet kun koldt vand. Når mixtemperaturen bliver højere end koldtvandstemperaturen med varmegenvinding anvendes i stedet kun varmt vand, indtil temperaturen overstiger mixtemperaturen. Herefter blandes koldt vand i, mens varmtvandsflowet reduceres tilsvarende. Anderledes er fordelingen ved en fremløbstemperatur på 54°C, se Figur 11.8, hvor koldtvandsforbruget med varmegenvinding udgør knap halvdelen af flowet. For en varmtvandstemperatur på 58°C, se Figur 11.9, anvendes der omvendt mere koldt vand end varmt vand som følge af den høje varmtvandstemperatur. De nøjagtige koldt-varmtvandsfordelinger for alle seks tests er vist på Figur 11.10.



Figur 11.10: Oversigt over fordeling af koldt og varmt vand for Test 2.2 - Test 2.2.5 med og uden brug af varmegenvinding.

Fordelingen af koldt og varmt vand for de seks tests viser tydeligt, hvordan varmtvandstemperaturen på det varme vand påvirker forbruget. Ved en lavere varmtvandstemperatur end referencetesten anvendes mere varmt vand og mindre koldt vand. For Test 2.2.1 anvendes der uden

brug af genvinding slet ingen koldt vand, mens der ved brug af genvinding anvendes ca. 5% koldt vand. For Test 2.2.2, hvor varmtvandstemperaturen er øget med 2°C ift. Test 2.2.1, anvendes ca. 4% koldt vand uden brug af genvinding og 11% med brug af varmegenvinding. I Test 2.2.3, hvor varmtvandstemperaturen er 44°C, bruges ca. 9% koldt vand, når der ikke anvendes varmegenvinding, mens forbrug af koldt vand stiger til ca. 20% med brug af genvinding. Resultaterne indikerer derfor, at besparelsen bliver mindre jo lavere fremløbstemperaturen er på det varme vand. Omvendt forholder det sig for, når varmtvandstemperaturen stiger. For Test 2.2.4 udgør koldtvandsforbruget uden varmegenvinding ca. 1/3 af det samlede forbrug, mens fordelingen er næsten lige ved brug af varmegenvinding. Endeligt anvendes der ved Test 2.2.5 ca. 45% koldt vand uden brug af varmegenvinding og knap 60% med brug af varmegenvinding. For denne test anvendes derfor mere koldt vand end varmt vand ved brug af varmegenvinding. Ligeledes opleves en større besparelse, jo højere temperaturen på det varme vand er. I Tabel 11.5 er energiforbruget og besparelsen angivet for de seks tests.

Tabel 11.5: Oversigt over energiforbrug og besparelse med og uden brug af varmegenvinding for tests med nye varmtvandstemperaturer. Setpunktet for mixtemperaturen er 39,5°C for alle badene.

Test	Fremløbstemp. [°C]	Energiforbrug UGV [kWh]	Energiforbrug GV [kWh]	Besparelse [%]
2.2 (Ref.)	49	0,62	0,55	11
2.2.1	40	0,81	0,77	5
2.2.2	42	0,78	0,72	8
2.2.3	44	0,73	0,65	11
2.2.4	54	0,52	0,41	22
2.2.5	58	0,45	0,35	23

Resultaterne i Tabel 11.5 viser, hvordan besparelsen stiger, jo højere fremløbstemperaturen er. Ved en fremløbstemperatur på 40°C er besparelsen kun 5%, mens den ved en varmtvandstemperatur på 58°C er 23%. Det opnås derfor en større besparelse på energiforbruget ved højere varmtvandstemperaturer. Det kan dermed konkluderes, at varmegenvindingssystemerne vil være mest rentable i husstande, som har en høj fremløbstemperatur på det varme vand, mens hustande med lavere fremløbstemperatur ikke vil opnå samme effektivitet af systemerne.

11.4 Opsummering

Varmtvandsforbruget ved brusebade udgør for både Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej den største andel af det samlede varmtvandsforbrug. Derfor er forskellige tests foretaget på en brusekabine med to varmegenvindingssystemer, og effektiviteten af de to systemer fastlagt.

Først blev der for brusekabinen foretaget tests af bade med forskellige setpunkter for badetemperaturen. De indsamlede data blev brugt til at generere et tilsvarende referencebad uden brug af varmegenvinding, således effektiviteten kunne beregnes. I alt blev tre forskellige badetemperaturer testet for begge varmegenvindingssystemer, og ud fra middelværdier blev en gennemsnitlig besparelse og temperaturvirkningsgrad fastlagt for systemerne. Resultaterne indikerede, at der ikke var nogen særlig forskel på de to varmegenvindingssystemer og en besparelsen på 11% blev dokumenteret for begge systemer med temperaturvirkningsgrad på hhv. 34 og 33%.

De foretagne tests blev alle udført med en konstant temperatur på det varme vand. Denne er dog ikke konstant i alle husstande, hvorfor effektiviteten også er undersøgt for forskellige temperaturer på det varme vand. Her blev testresultaterne for Test 2.2 brugt til at generere fem nye bade, alle med forskellige temperaturer på det varme vand. Igen blev tilsvarende referencebade genereret, således effektiviteten kunne fastlægges. Resultaterne dokumenterede, at den største besparelse opnås ved en høj varmtvandstemperatur, idet der skal benyttes mindre varmt vand og mere koldt vand til at opnå den samme badetemperatur. Ved en varmtvandstemperatur på 58°C blev en maksimal besparelse på 23% dokumenteret, mens den laveste besparelse på 5% blev dokumenteret for en varmtvandstemperaur på 40°C. På baggrund af disse resultater konkluderes derfor, at den største besparelse opnås i boliger med en høj varmtvandstemperatur, idet effektiviteten af de to systemer i disse tilfælde er størst.

Effektiviteten på varmegenvindingssystemerne er også undersøgt ved forskellige varigheder af et bad. Her viste resultaterne, at nogenlunde stationære forhold indtraf efter ca. 2 min., hvorfor besparelsen forblev konstant på ca. 11%. Det kan derfor konkluderes, at ved bade over 2 min. varighed opnås den største effektivitet af varmegenvindingssystemerne.

Ud fra de foretagne tests er konklusionen, at varmegenvindingssystemer kan give anledning til en besparelse af varmtvandsforbruget og dermed nettoenergiforbruget på op til 23%, hvis temperaturen på det varme vand er 58°C. Ved fremløbstemperaturer under 44°C er besparelsen mindre end 10%, hvorfor systemerne bliver mindre rentable. Med tanke på at fjernvarmetemperaturen i fremtiden ønskes reduceret, ved Ultra-Lav-Temperatur-Fjernvarme (ULTFJ) helt ned til under 40°C, vil dette betyde, at varmegenvindingssystemerne i fremtiden vil blive mindre rentable. Ligeledes skal det noteres, at selvom bade af kort varighed giver anledning til ca. samme procentvise besparelse, vil energiforbruget på primærsiden også være lavere end ved bade af længere varighed. Derfor vil besparelsen i kroner være mindre og det vil tage længere tid, før varmegenvindingssystemet vil tjene sig ind. Derfor er det ikke kun fremløbstemperaturen men også varigheden på badene, der afgør, om varmegenvindingssystemerne vil være rentable eller ej.

Energiberegning 12

Indledningsvist blev det dokumenteret, at varmtvandsforbruget, som følge af strengere krav til det samlede energiforbrug samt en uændret standardværdi for varmtvandsforbruget på 250 L/m^2 år for boliger, udgør en større og større andel af det samlede energiforbrug. Men et begrænset kendskab til varmtvandsforbruget i boliger gør det svært at vurdere, om standardværdien skal reduceres og i så fald med hvor meget.

Ud fra analyserne foretaget i Del III blev det dokumenteret, at varmtvandforbruget for Kildebjerg Søvej var lavere end standardværdien. Derfor er energiberegningen fremskaffet med henblik på at analysere varmtvandsforbruget og dets betydning for det samlede energibehov for boligen. Ud fra energiberegningen undersøges først, hvordan energiforbruget til varmt brugsvand samt det samlede energibehov for boligen ændrer sig, hvis Kildebjerg Søvej havde haft et af varmegenvindingssystemerne beskrevet i Kapitel 11 installeret. Efterfølgende foretages en ny energiberegning, hvor det fastlagte varmtvandsforbrug for boligen på 101 L/m^2 år anvendes til beregningen. Endeligt foretages en sidste beregning, hvor energiforbruget fastlægges, hvis der for det målte varmtvandsforbrug på 101 L/m^2 år havde været anvendt og varmegenvinding installeret. Det har ikke været muligt at fremskaffe energiberegninger for Kærhavebakken og Petersborgvej, hvorfor varmtvandsforbruget for de to boliger i stedet behandles afslutningsvist.

12.1 Energiforbrug med varmegenvinding

I forrige kapitel blev det fastlagt, at effektiviteten af de to varmegenvindingssystemer var ens og kunne reducere varmtvandsforbruget til bade med op til 23%. Oprindeligt var det tiltænkt, at en type af varmegenvindingssystemerne skulle være installeret på Kildebjerg Søvej som en del af forskningsprojektet. Grundet lovgivningen på området er varmegenvindingssystemerne ikke lovlige til brug i Danmark, hvorfor de ikke blev installeret. En installation af varmegenvindingssystemerne vil ikke blot reducere varmtvandsforbruget i boligen, men vil også have betydning for energiberegningen af boligen, idet varmtvandsforbruget bidrager til det samlede energibehov. Derfor er det af interesse at undersøge, hvor stor en besparelse varmegenvindingssystemerne vil medføre for såvel nettobehovet til varmt brugsvand som bygningens samlede energibehov.

For den oprindelige energiberegning af boligen er et varmtvandsforbrug på 175 L/m^2 år og en temperatur på 40°C anvendt i stedet for standardværdierne på 250 L/m^2 år og 55°C. Ændringerne formodes at skyldes brugsvandssystemet bestående af Nilan Compact Unit'en beskrevet i Kapitel 3. Derfor vælges det at tage udgangspunkt i disse værdier, når besparelsen ved brug af varmegenvinding skal fastlægges.

I analysen af varmegenvindingssystemerne blev det fastlagt, at effektiviteten på disse varierede alt efter varmtvandstemperaturen ved brusearmaturet. For Kildebjerg Søvej var

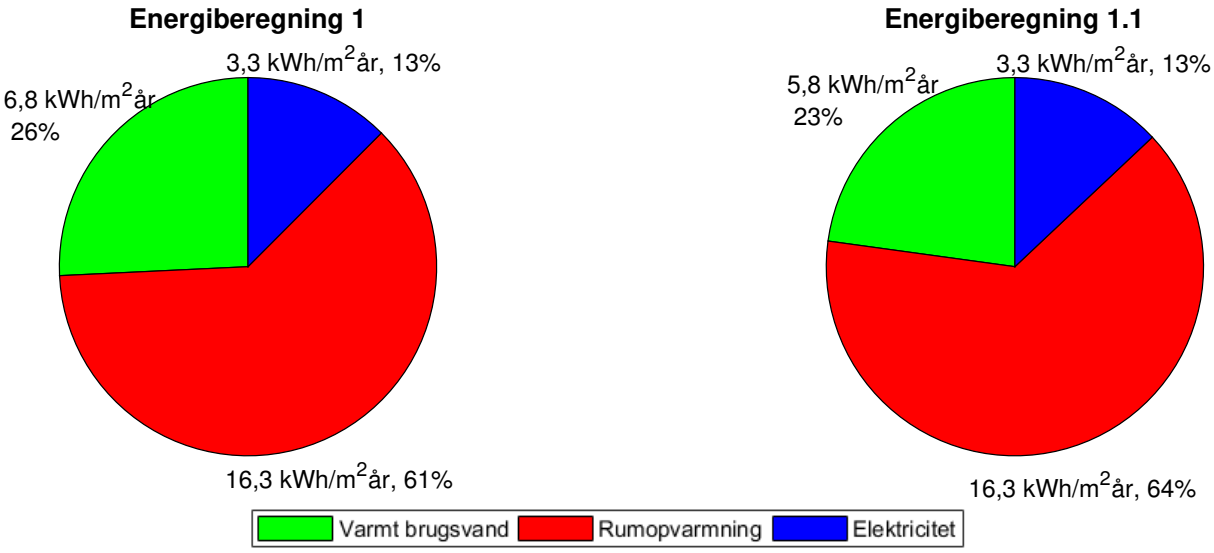
flowmålerne monteret i teknikrummet og ikke på badeværelset, hvorfor den nøjagtige varmtvandstemperatur ved tapstedet ikke kan fastlægges med sikkerhed. Derfor anvendes værdier for varmtvandstemperaturen registreret ved teknikrummet, hvorefter et varmetab modregnes, for derved at fastlægge varmtvandstemperaturen ved bruseren. Ud fra Figur 10.10 på side 87 fremgår det, at varmtvandstemperaturen i teknikrummet er 58°C. Det vurderes, at denne vil falde til ca. 54°C ved bruseren, og dermed vil effektivteten af varmegenvindingssystemet være 22%.

En installation af varmegenvindingssystemet vil derfor medføre en besparelse på 22% af det varme vand, der anvendes til brusebade. I Kapitel 6 blev det fastlagt, at 76% af varmtvandsforbruget går til brusebade, svarende til 133 L/m^2 år af det samlede varmtvandsforbrug på 175 L/m^2 år. Af disse fratrækkes 22% som følge af varmegenvindingen, og derved fås et varmtvandsforbrug til brusebade på 104 L/m^2 år. Hertil tillægges varmtvandsforbruget til håndvaske i boligen på 42 L/m^2 år, hvormed det samlede varmtvandsforbrug for boligen, ved brug af varmegenvinding, bliver 146 L/m^2 år. Ved brug af denne værdi foretages en ny energiberegning, og resultaterne er vist i Tabel 12.1 sammen med resultaterne for den oprindelige energiberegning.

Tabel 12.1: Varmtvandsforbrug, nettobehov og energibehov for Kildebjerg Søvej med og uden brug af varmegenvinding.

Energi-beregning	Varmtvands-forbrug [L/m^2 år]	Nettobehov VBV [kWh/m^2 år]	Samlet energibehov [kWh/m^2 år]
1 (Ref.)	175	6,8	25,9
1.1	146	5,8	25,0

Resultaterne i Tabel 12.1 viser, at varmtvandsforbruget falder fra 175 L/m^2 år til 146 L/m^2 år, en reduktion på 29 L/m^2 år, når der anvendes varmegenvinding på bruserne med en effektivitet på 22%. Det medfører en besparelse i nettobehovet til varmt brugsvand på 1,0 kWh/m^2 år samt en samlet besparelse i energibehovet for boligen på 0,9 kWh/m^2 år. Derfor er der næsten 1,0 kWh/m^2 år at hente, hvis boligen har varmegenvindingssystemet installeret. Besparelsen er ligeledes illustreret på Figur 12.1, hvor nettobehovene for rumopvarmning, varmt brugsvand og el til bygningsdrift samt andel af de tre er vist for de to energiberegninger.



Figur 12.1: Fordeling af nettobehovene for Energiberegning 1 og Energiberegning 1.1.

Fordelingen på Figur 12.1 viser, at nettobehovet til varmt brugsvand på 6,8 kWh/m^2 år oprindeligt udgør 26% af det samlede energibehov uden primær energifaktorer. Med varmegenvinding falder nettoforbruget til 5,8 kWh/m^2 år, hvormed varmt brugsvand nu udgør 23% af det samlede energibehov uden primær energifaktorer. Andelen til varmt brugsvand falder dermed fra 26% til 23%, og hertil skal det tages i forbehold, at det samlede energibehov uden primære energifaktor er faldet fra 26,4 kWh/m^2 år til 25,4 kWh/m^2 år.

12.2 Energiforbrug med målt varmtvandsforbrug

I starten af projektet blev det beskrevet, hvordan den samme standardværdi for varmtvandsforbruget i boliger på 250 L/m^2 år også blev anvendt i 2006 under Bygningsreglementet [2007]. De sidste 15 år er den samme værdi blevet anvendt til energiberegninger, og det kan vække undren med tanke på, at det samlede vandforbrug i Danmark er faldet med 14% i denne periode samt at der for denne periode er et stort fokus på at reducere energiforbruget for alt byggeri. For to af de tre målte boliger er det gennem målinger ligeledes dokumenteret, at varmtvandsforbruget er væsentligt lavere en standardværdien, som anvendes til energiberegninger, heriblandt deres respektive energiberegninger. Derfor undersøges for dette afsnit, hvordan energibehovet for Kildebjerg Søvej ændrer sig, når den målte værdi på 101 L/m^2 år anvendes.

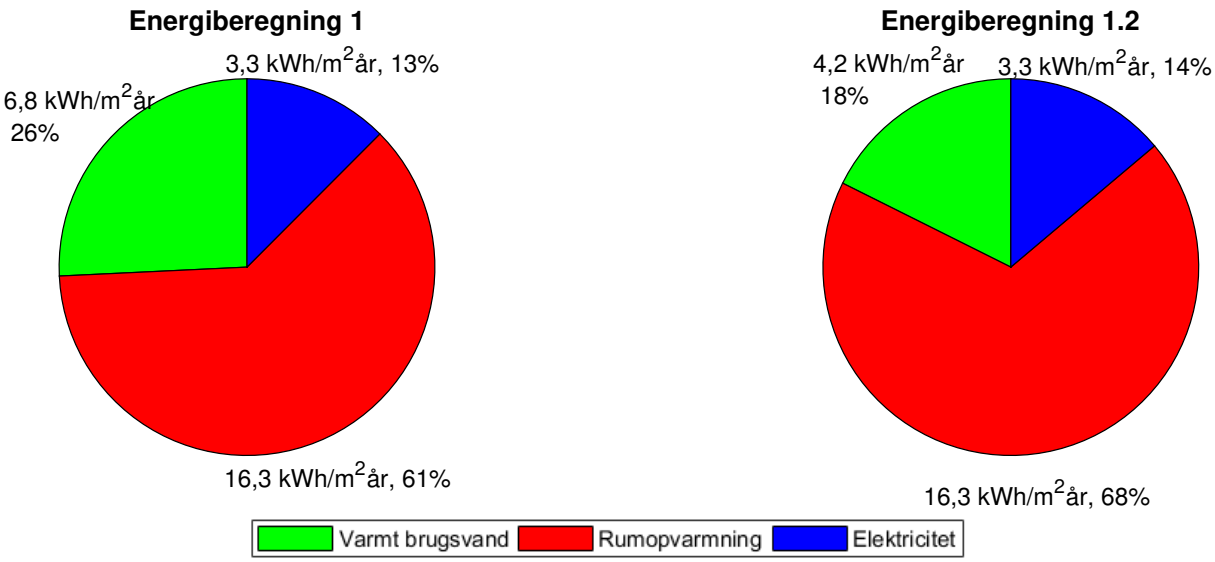
I den oprindelige energiberegning for Kildebjerg Søvej var standardværdien for varmt brugsvand på 250 L/m^2 år ikke anvendt men i stedet en værdi på 175 L/m^2 år. Det betyder, at besparelsen vil være mindre end hvis værdien på 250 L/m^2 år var anvendt i første omgang. Ved at angive 101 L/m^2 år som boligens varmtvandsforbrug foretages en ny energiberegning. I Tabel 12.2 er resultaterne vist, igen sammenholdt med de oprindelige.

Tabel 12.2: Varmtvandsforbrug, nettobehov og energibehov for Kildebjerg Søvej ved brug af et varmtvandsforbrug på hhv. 175 L/m^2 år og 101 L/m^2 år.

Energi-beregning	Varmtvands-forbrug [L/m^2 år]	Nettobehov VBV [kWh/m^2 år]	Samlet energibehov [kWh/m^2 år]
1 (Ref.)	175	6,8	25,9
1.2	101	4,2	23,7

Af Tabel 12.2 fremgår det, at der ved et varmtvandsforbrug på 101 L/m^2 år opnås en besparelse i nettobehovet til varmt brugsvand på 2,6 kWh/m^2 år samt en samlet besparelse i energibehovet for boligen på 2,2 kWh/m^2 år. Besparelsen er dermed større ved brug af et varmtvandsforbrug på 101 L/m^2 år fremfor varmegenvinding. Fordelingen af nettobehovene for rumopvarmning, varmt brugsvand og el til bygningsdrift samt andelen af de tre er vist på Figur 12.2 for de to energiberegninger.

Af Figur 12.2 fremgår det, at varmtvandsforbruget for Energiberegning 1.2 udgør 18% af det samlede energibehov uden primær energifaktorer, sammenlignet med 26% for den oprindelige energiberegning. Igen skal der for den procentvise andel tages forbehold for, at det samlede energibehov uden primære energifaktor er faldet fra 26,4 kWh/m^2 år til 23,8 kWh/m^2 år.



Figur 12.2: Fordeling af nettobehovene for Energiberegning 1 og Energiberegning 1.2.

12.3 Energiforbrug med målt varmtvandsforbrug og varmegenvinding

I de to ovenstående analyser er det dokumenteret, at nettobehovet til varmt brugsvand samt det samlede energibehov for boligen falder, når der bruges varmegenvinding eller anvendes det målte varmtvandsforbrug for boligen. Derfor af det af interesse at undersøge, hvad resultaterne af energiberegningen vil være, hvis der med udgangspunkt i det nuværende varmtvandsforbrug på 101 L/m^2 år også anvendes varmegenvinding.

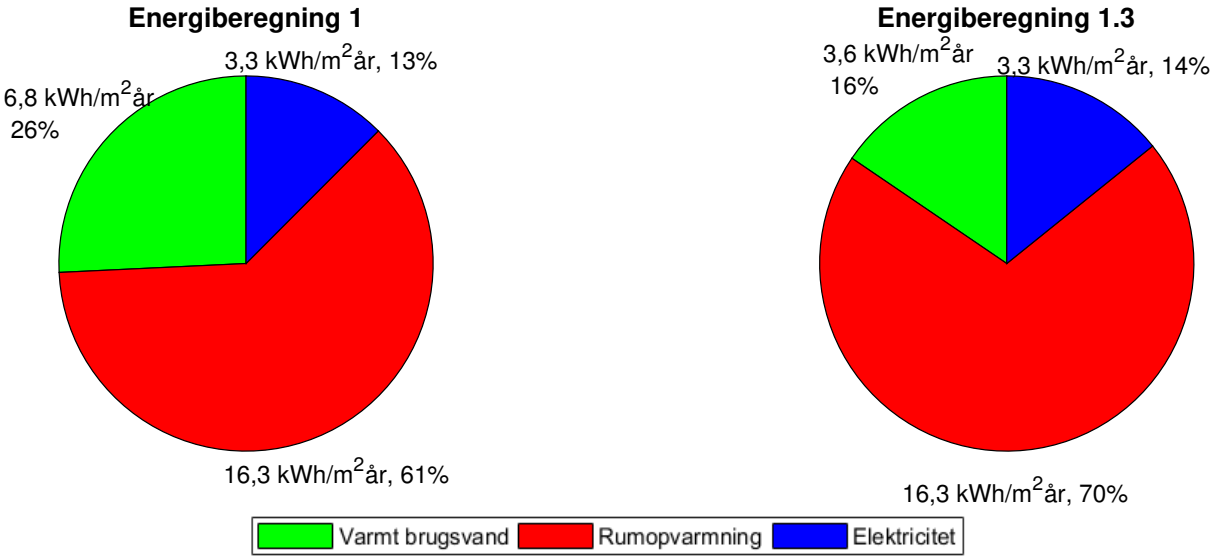
Før energiberegningen foretages udregnes først det nye varmtvandsforbrug. Her anvendes samme fremgangsmåde som tidligere, hvor varmegenvindingen har betydning for 76% af det samlede varmtvandsforbrug, som går til brusebade. Med en effektivitet på 22% falder varmtvandsforbruget til brusebade fra 76 L/m^2 år til 59 L/m^2 år, mens forbruget til håndvaske på 24 L/m^2 år tillægges. Det giver til sammen et varmtvandsforbrug for boligen på 83 L/m^2 år, hvilket indsættes i energiberegningen. I Tabel 12.3 er resultaterne af den nye energiberegning vist sammen med den oprindelige.

Tabel 12.3: Varmtvandsforbrug, nettobehov og energibehov for Kildebjerg Søvej ved brug af målt varmtvandsforbrug og varmegenvinding.

Energi-beregning	Varmtvands-forbrug [L/m^2 år]	Nettobehov VBV [kWh/m^2 år]	Samlet energibehov [kWh/m^2 år]
1 (Ref.)	175	6,8	25,9
1.3	83	3,6	23,2

Resultaterne i Tabel 12.3 viser, at et varmtvandsforbrug på 83 L/m^2 år medfører en besparelse i nettobehovet til varmt brugsvand på 3,2 kWh/m^2 år samt en besparelse på 2,7 kWh/m^2 år i den samlede energiberegning. Ved brug af det reelle varmtvandsforbrug for boligen kombineret med varmegenvinding giver derfor en besparelse på knap 3 kWh/m^2 år i den samlede energiramme. På Figur 12.3 er fordelingen af nettobehovene vist for Energiberegning 1.3 og sammenholdt med

den oprindelige energiberegning og andelene er angivet for de tre bidrag.

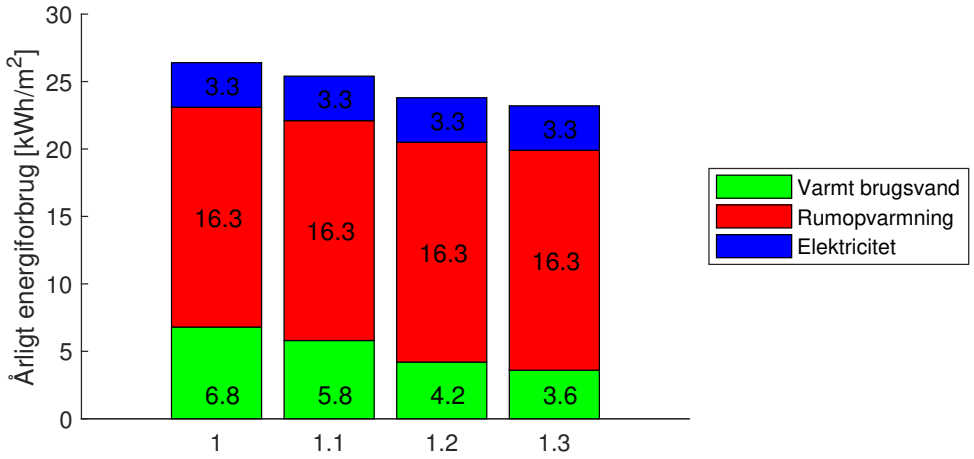


Figur 12.3: Fordeling af nettobehovene for Energiberegning 1 og Energiberegning 1.3.

Figur 12.3 viser, at varmtvandsforbruget for Energiberegning 1.3 udgør 16% sammenlignet med 26% for den oprindelige energiberegning. Dertil er det samlede energibehov uden primære energifaktorer reduceret med 3,2 kWh/m^2 år, hvilket understreger betydningen af varmtvandsforbruget og hvor meget, der er at hente i energiberegningen, hvis der anvendes andre værdier end standardværdien for varmt brugsvand.

12.4 Opsummering

De ovenstående analyser af Kildebjerg Søvej har dokumenteret, at angivelserne i varmtvandsforbruget for en energiberegning er af stor betydning for den samlede energiramme. Selvom der for Kildebjerg Søvej ikke er benyttet standardværdien på 250 L/m^2 år men en værdi på 175 L/m^2 år ligger denne væsentligt højere end det målte varmtvandsforbrug for boligen. På Figur 12.4 er resultaterne for de tre analyser opsummeret.



Figur 12.4: Nettoenergibehov til elektricitet, rumopvarmning og varmt brugsvand for Energiberegning 1 - 1.4 af Kildebjerg Søvej.

Resultaterne af de tre analyser viser, at nettobehovet til varmt brugsvand kan reduceres med op til 3,2 kWh/m^2 år mens det samlede energibehov for boligen kan reduceres med op til 2,7 kWh/m^2 år. Denne besparelsen ville være endnu større, hvis der i stedet var taget udgangspunkt i standardværdien på 250 L/m^2 år og ikke værdien på 175 L/m^2 år.

Med tanke på at reducere energibehovet i boliger, understreger resultaterne af ovenstående analyser for Kildebjerg Søvej, at varmtvandsforbruget er et område, der bør fokuseres og investeres mere i. Ud fra energiberegningerne kan det konkluderes, at for hver L/m^2 år varmtvandsforbruget reduceres, falder nettobehovet til varmt brugsvand med 0,035 kWh/m^2 år, når der anvendes en varmtvandstemperatur på 40°C. Var standardtemperaturen på 55°C for varmt brugsvand i stedet anvendt, ville nettobehovet til varmt brugsvand blive reduceret med 0,053 kWh/m^2 år for hver liter, forbruget blev reduceret. Som resultaterne for Kildebjerg Søvej også understreger, vil en ændring i standardværdien for forbruget af varmt brugsvand kunne medføre et reduceret energibehov med op til flere kWh/m^2 år, noget som i sidste ende kan være afgørende for, om en bolig overholder den ønskede energiramme eller ej.

At varmtvandsforbruget for Kildebjerg Søvej ligger lavere end standardsværdien er heller ikke et enkeltstående tilfælde. Målingerne for Kærhavebakken dokumentere et varmtvandsforbrug på 166 L/m^2 år, en værdi der ligger knap 100 L/m^2 år lavere end standardværdien. Ved en varmtvandstemperatur på 55°C vil dette varmtvandsforbrug medføre et reduceret nettobehov til varmt brugsvand på 4,5 kWh/m^2 år, en formodentligt stor besparelse i forhold til boligens samlede energibehov.

I modsætning til de to boliger på hhv. Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej blev der for Petersborgvej målt et gennemsnitligt varmtvandsforbrug svarende til 525 L/m^2 år for boligen, altså en værdi over dobbelt så høj som standardværdien. Antages der, at der er foretaget en energiberegning for boligen med en varmtvandstemperatur på 55°C, burde nettobehovet til varmt brugsvand have været 14,6 kWh/m^2 år højere, hvis det reelle forbrug var angivet i stedet for standardværdien. For denne bolig er der derved en gevinst i at anvende standardværdien og ikke det reelle forbrug. For Petersborgvej skal det dog, som det også blev diskuteret i Kapitel 6, noteres, at boligen er den mindste af de tre målte og samtidig har den det største forbrug, og derfor kan der sås tvivl om, hvorvidt beregningsmetoden og standardværdien er optimal. For selv hvis det målte varmtvandsforbrug på Petersborgvej havde været identisk med forbruget på eksempelvis Kærhavebakken, vil nettobehovet til varmt brugsvand for Petersborgvej stadig være væsentlig større, idet boligen rummer færre kvadratermeter. Ved en ny beregningsmetode for forbruget af varmt vand, hvor der i stedet tages højde for antallet af personer og tapsteder i boligen, vil et mere retvisende forbrug formodentligt kunne opnås. Ligeledes kan det diskuteres, om det er retvisende at fordele varmtvandsforbruget ud på en boligs kvadratmeter, idet nettobehovet for to forskellige størrelser boliger med samme varmtvandsforbrug fortsat vil være forskelligt. Endeligt kan det for fremtiden overvejes, om der også bør tages højde for alderen på brugsvandssystemet samt ventetiden på det varme vand, da de to faktorer begge har betydning for det samlede varmtvandsforbrug i en bolig.

Del V

Afrunding

13 Diskussion

Flere studier har gennem de senere årtier undersøgt varmtvandsforbruget i danske hustande og udviklingen viser generelt et fald i danskernes varmtvandsforbrug siden 1996. På trods af et øget fokus på at reducere boligers samlede energiforbrug er standardværdierne for varmt brugsvand til beregning af energirammen dog fortsat uændrede, og den samme årlige standardværdi på 250 L/m^2 år angivet fortsat for boliger. Derfor ønskes et større kendskab til danskernes varmtvandsforbrug, hvorfor der i dette studiet blev foretaget målinger af varmtvandsforbruget i tre danske parcelhuse for at dokumentere dette.

Resultatet af målingerne foretaget i de tre parcelhuse i Danmark stemte for to af boligerne overens med den generelle tendens med et faldende varmtvandsforbrug for Danmark dokumenteret i tidligere studier. Her viste resultater for begge boliger et lavere varmtvandsforbrug end for studierne, både angivet pr. person og pr. bolig. Selvom varmtvandsforbruget er styret af mange forskellige faktorer, indikerer resultaterne, at der for nybyggeri haves et lavere varmtvandsforbrug end tidligere. Af samme årsag vurderes resultater for den sidste bolig at have et markant højere varmtvandsforbrug grundet alderen på boligen og derved også alderen på brugsvandsinstallationerne. Det er derfor vigtigt, at der opnås et repræsentativt sammenligningsgrundlag, når sådanne målinger skal sammenholdes. Særligt for standardværdien benyttet til beregning af energirammen skal der skelnes mellem målinger i ældre byggeri og nybyggeri. Skal standardværdien til energiberegningen på sigt revurderes, bør flere målinger foretages af både nyt og ældre byggeri, idet udformningen af brugsvandssystemet bør stemme overens med den udformning, der vil blive benyttet ved fremtidigt byggeri.

Udover ovenstående skal det nævnes, at varigheden og tidspunktet af måleperioderne er af betydning for resultaterne. For boligen på Kærhavebakken strakte målinger sig over i alt 43 dage, hvor efterårsferien var inkluderet, mens påskeferien var inkluderet i måleperioder for boligen på Kildebjerg Søvej på 28 dage. For boligen på Petersborgvej blev målingerne også foretaget lige op til påskeferien og strakte sig kun over en måleperiode på i alt 8 dage. Sådanne ferier kan have stor betydning resultaterne, idet beboerne har andre rutiner i ferie og af denne grund bør måleperiode til dokumentation varmtvandsforbrug og energiforbrug være så lang som muligt. I tidligere studier har måleperioden i alle tilfælde været minimum en måned og i flere tilfælde har målinger også været foretaget over et helt år (eller flere). Ved en længere måleperiode vil varmtvandsforbruget både afspejle forbruget i dagligdagen, weekender og i ferier, hvilket er optimalt hvis en gennemsnitsværdi for varmtvandsforbruget skal dokumenteres. Herudover kan eventuelle sæsonvariationer, som tidligere studier har undersøgt, også undersøges og dokumenteres.

I modsætning til tidligere studier var opløsningen på målingerne til dette studie af betydelig højere kvalitet. I tidligere studier var den højeste opløsning 0,5 Hz, mens dette studie havde en opløsning på 8 Hz for målinger ved tapsteder, svarende til hhv. 8 målinger pr. sekund. En

høj opløsning muliggør en dybdegående analyse af de enkelte tappeprofiler og gør samtidig at temperaturprofiler, energiforbrug og effektivitet kan dokumenteres over hele tapningens længde. Ved en opløsning på 1 min (0,017 Hz) eller højere fås ikke den samme nøjagtighed ved analyse af tappeprofilerne. Opløsningens betydning er meget afhængig af, hvad formålet med analysen er. Opløsninger lavere end 8 Hz, eksempelvis på 1 min. eller 5 min. er tilstrækkelige til dokumentation af forbrug, men de formodentligt også egner sig bedre ved præsentation af forbrugsprofiler. For boligen på Kildebjerg Søvej gjorde opløsningen på målingerne ved BMS-systemet det muligt at sammenholde forbruget på time- og dagsbasis med målinger foretaget ved tapsteder, mens opløsningen ikke var tilstrækkelig til at sammeholde målingerne for de enkelte tappeprofiler. På baggrund af målingerne foretaget i dette studie vurderes det, at den mest detaljerede og dybdegående analyse finder sted, når målinger foretages i både teknikrum og ved tapsteder med den samme opløsning. Hertil bør opløsningen vælges på baggrund af, hvad formålet med målingerne i det enkelte tilfælde er.

Til analysen af brusesystemet med forskellige varmegenvindingssystemer blev denne foretaget på baggrund af målinger udført i laboratoriet, hvor resultater efterfølgende blev benyttet i energiberegningen for én af de tre boliger. Som enhver anden analyse der foretages i laboratoriet, er det vigtigt at laboratorieforholdene afspejler de reelle forhold for boligen der sammenlignes med. Idet brugsvandssystemet i laboratoriet på Thomas Manns Vej ikke afspejler forholdene for brugsvandssystemet i boligen, ligger der derfor en usikkerhed i, hvorvidt resultaterne for varmegenvindingssystemet er repræsentativt ved installation i boligen. For at afspejle forholdene i boligen bedst muligt blev varierende varmtvandstemperaturer undersøgt ved beregning. På baggrund af disse resultater vurderes det, at der ved fremtidige studier bør kunne reguleres på både koldt- og varmtvandstemperaturen for brusesystemet i laboratoriet. Herved kan de reelle forhold for enhver bolig afspejles og usikkerheder ved beregning undgås. Det skal dog nævnes, at parametre som rørtab og omgivelsestemperatur fortsat vil være usikkerheder, der har indflydelse på resultaterne og kan medføre, at sammenligning med målinger fra en bolig ikke er repræsentativt.

Afslutningsvist bør validering af alle resultater foretages på baggrund af måleusikkerheden på det anvendte måleudstyr. I dette studie blev måleusikkerheden på det anvendte måleudstyr dokumenteret gennem kalibrering af udstyret udført i laboratoriet. For at minimere usikkerheder på målinger grundet udstyret bør kalibrering ske både før og efter målinger foretages. Af praktiske årsager var dette ikke muligt i projektet, og derfor blev alt udstyr kun kalibreret én gang. Derfor kan afvigelser på målingerne være større end angivet i rapporten, da der kan være opstået fejl og mangler på udstyret henover måleperioden. Med henblik på at validere resultater i et studie som dette, bør måleusikkerheder være en del af enhver analyse og bør samtidig være repræsentativ for hver enkelt måler. I en analyse af eksempelvis energiforbruget henover en tapning kan selv små usikkerheder af tappe- og temperaturprofiler have stor indflydelse på beregningen af det endelige energiforbrug. Til validering af resultater bør måleusikkerheden på det anvendte udstyr for fremtidige studier derfor være en større del af de enkelte analyser.

Konklusion 14

Information om varmtvandsforbruget og dets energiforbrug i danske husstande er af vigtig betydning for fremtidens byggeri, med henblik på at optimere og sænke boligernes samlede energiforbrug. Derfor har har formålet med dette studie været at undersøge og dokumentere varmtvandsforbruget og energiforbruget for brugsvandssystemet i tre danske parcelhuse. På baggrund af målinger er der foretaget analyser af vand- og energiforbruget i de tre husstande, og resultater er sat i relation til tidligere studier samt standardværdien benyttet ved energiberegninger.

Siden standardværdien fra Bygningsreglementet [2018] på 250 L/m^2 år fortsat er uændret, vil varmt brugsvand i energiberegningen på sigt udgøre en større del af energirammen, såfremt der kun fokuseres på at nedbringe energiforbruget til rumopvarmning og elektricitet. Derfor har dette studie blandt andet fokuseret på at dokumentere varmtvandsforbruget i de tre husstande gennem målinger og sammenholde forbruget med standardværdien iht. Bygningsreglementet [2018]. For de tre boliger blev varmtvandsforbruget i [L/m^2 år] dokumenteret til hhv. 166, 101 og 525, hvoraf det konkluderes, at forbruget i alle tilfælde afviger fra standardværdien på 250 L/m^2 år. Idet standardværdien angives ift. boligens størrelse og ikke tager højde for antallet af beboere og/eller tapsteder, vil forbruget pr. m^2 derfor være styret af boligens størrelse alene. Dette gør sig også gældende i dette studie, hvor de to laveste værdier for varmtvandsforbruget fås i de to boliger med det største boligareal, mens det højeste varmtvandsforbrug fås i boligen med det mindste boligareal. Hertil kan det konkluderes, at alderen på brugsvandsystemerne også påvirker varmtvandsforbruget. Ældre varmtvandsinstallationer kan være præget af korrosion- og kalkbelægninger, der reducerer flowet, forlænger ventetiden og derved øger vandspildet, hvilket vurderes at være en af årsagerne til det højere vandforbrug i den ældste af de tre boliger.

På baggrund af resultaterne af varmtvandsforbruget i de tre boliger er der gennem studiet rejst spørgsmål om, hvorvidt standardværdien bør angives i [L/m^2 år]. Ved sammenligning af varmtvandsforbruget med tidligere studier i [L/bolig] og [L/pers.] har det gennem projektet vist sig, at forbruget følger tendenserne siden 1996 om et faldende varmtvandsforbrug for de to nyere boliger. I den ældste af de tre boliger kunne et varmtvandsforbrug på 46 L/pers./dag dokumenteres, mens forbruget for de to nyere boliger kunne dokumenteres til 22 L/pers./dag. Sammenholdes disse resultater med tidligere studier fra Danmark, hvor varmtvandsforbruget blev angivet til 40 L/pers./dag, afspejles det lavere forbrug i de to nyere boliger mens forbruget i den ældste af boligerne stemmer overens med tidligere studier. På baggrund af denne observation vurderes det, at der ved fremtidige studier bør foretages en nærmere analyse af varmtvandsforbruget ift. standardværdien med henblik på at validere værdien samt undersøge, hvorvidt denne bør angives i [L/m^2 år]. Herudover vil supplerende studier også kunne benyttes til at vurdere potentialet for en reduktion af standardværdien og en fastlæggelse af denne.

Til dokumentation af varmtvandsforbruget i en bolig kan det også konkluderes, at antallet af

målinger, varigheden af måleperioden og opløsningen på målingerne, alle er parametre, der har afgørende betydning for resultaterne. Skal varmtvandsforbruget dokumenteres på årsbasis, bør måleperioden som minimum strække sig over et helt år, således hverdage, weekender, ferier og eventuelle sæsonvariationer i forbruget afspejles gennem målingerne. Kortere måleperioder og derved færre målinger kan benyttes til dokumentation af varmtvandsforbruget på dagsbasis, som i dette studie, men hvis forbruget også skal benyttes til at estimere forbruget på årsbasis øges usikkerheden, idet færre scenarier af beboernes forbrugsmønstre afdækkes. Herudover kan det konkluderes, at opløsningen på målingerne bør vælges på baggrund af, hvilke analyser der skal foretages. Ønskes udelukkende at dokumentere varmtvandsforbruget på dags- eller årsbasis kan en højere opløsning benyttes end hvis en nærmere analyse af de enkelte tapninger skal foretages. Skal tappe- og temperaturprofiler samt en analyse af energiforbruget og effektiviteten henover de enkelte tapninger undersøges kan det gennem studiet konkluderes, at en opløsning på minimum 1 Hz skal benyttes for målingerne. Hertil konkluderes, at de mest nøjagtige resultater opnås, hvis der foretages målinger både i teknikrummet og ved tapsteder, således forbruget kan sammenholdes og målinger herved valideres ift. hinanden.

Udover varmtvandsforbruget blev målingerne i de tre boliger også benyttet til at undersøge energiforbruget til produktion af varmt brugsvand og hertil vurdere potentialet for energioptimering af brugsvandssystemerne. På baggrund af målinger ved de enkelte tapsteder foretaget i to af de tre boliger konkluderes det i begge tilfælde, at bruserne placeret længst væk fra teknikrummet er de mest kritiske tapsteder ift. produktionen af varmt brugsvand. Grundet den længere varighed og en tappetemperatur på ca. 40°C dokumenteres det højeste energiforbrug ved produktion af varmt brugsvand benyttet til bade. I begge boliger er det bruseren på badeværelserne længst fra teknikrummet, der benyttes mest, hvorfor det største vandspild og rørtab ligeledes kan dokumenteres for disse tapsteder. Det konkluderes heraf, at det største potentiale for at opnå energibesparelser i brugsvandssystemet i de to boliger skal findes ved bruserne placeret længst væk fra teknikrummene. Herudover kan det for den ene af boligerne også konkluderes, at der er potentiale for energibesparelser ved køkkenvasken, idet tapstedet i ca. 40% af tapningerne har en tappetemperatur højere end 42°C. Selvom varigheden på tapninger ved køkkenvasken er væsentlig kortere end ved bruserne, gør den højere tappetemperatur, at energiforbruget til produktion af varmt brugsvand liggere højere end resterende tapsteder, hvorved der er potentiale for energibesparelser.

Som en mulig fremtidsløsning til at reducere energiforbruget ved bade, blev der i studiet foretaget en række forsøg af et brusesystem med to forskellige varmegenvindingssystemer. Formålet med disse forsøg var at undersøge effekten af de to varmegenvindingssystemer og hertil dokumentere besparelsen af varmt vand og energiforbruget iht. energirammen. På baggrund af forsøgene dokumenteres det, at en gennemsnitlig besparelse på 11% for begge varmegenvindingssystemer kan opnås, hvis temperaturen på det varme vand ved blandingsbatteriet er 49°C og såfremt varigheden af badene er længere end 2 min. Herudover er besparelsen afhængig af fremløbstemperaturen ved bruseren, hvilket skal stemme overens med temperaturen i den pågældende bolig, hvis resultater skal kunne sammenholdes og besparelsen være repræsentativ. Ved at øge fremløbstemperaturen på brusesystemet, svarende til fremløbstemperaturen i én af de tre boliger, kunne derfor dokumenteres en højere gennemsnitlig besparelse på 22%. På baggrund af forsøgene konkluders det, at et brusesystem med varmegenvinding kan være en mulig løsning til at reducere energiforbruget til varmt brugsvand på sigt, hvis sådan et system installeres i boligen.

Med udgangspunkt i besparelsen opnået ved forsøgene udført på brusesystemet med varmegenvinding blev betydningen for energirammen afslutningsvist undersøgt. Ved en gennemsnitlig besparelse på 22% for varmtvandsforbruget ved bade kunne en reduktion af nettobehovet for varmtbrugsvand fastlægges til 1 kWh/m^2 år. Grundet denne reduktion i energiforbruget til varmt brugsvand kunne en reduktion på 0,9 kWh/m^2 år opnås for det samlede energibehov og andelen af varmt brugsvand faldt fra ca. 26% til ca. 23%. En anden måde at reducere energirammen for boligen på, var ved at benytte det samlede målte varmtvandsforbrug på 101 L/m^2 år i stedet for den oprindelige værdi angivet i boligens energiberegning. Denne ændring gav en væsentlig højere årlig besparelse, nemlig 2,6 kWh/m^2 år i nettobehovet for varmt brugsvand og andelen af varmt brugsvand ift. det samlede nettobehov faldt fra ca. 26% til ca. 18%. Ud fra resultaterne fra energiberegningerne kan det herved konkluderes, at den største energibesparelse opnås ved reduktion af det samlede varmtvandsforbrug og ikke ved installation af varmegenvinding på brusesystemet. Hertil skal det nævnes, at rentabilitet ved installation af et brusesystem med varmegenvinding også er en parameter, der bør undersøges, ligesom flere målinger er en nødvendighed til at dokumentere, at værdien for det samlede varmtvandsforbrug kan reduceres.

Grundet en eksplorativ fremgangsmåde gennem studiet kan det afslutningsvist konkluderes, at emnet omhandlende varmt brugsvand fortsat åbner op for nye forskningsområder. Flere målinger og omfattende analyser af danskernes varmtvandsforbrug og dets energiforbrug kan på sigt benyttes til at validere dette studies resultater og give en større indsigt i danskernes vand- og energiforbrug. Denne viden vil samtidig være brugbar for fremtidens byggerier, hvor der forsat er fokus på at reducere det samlede energiforbrug og herved leve op til de strengere krav ift. energirammen.

Perspektivering 15

På baggrund af konklusionen og den eksplorative tilgang i dette studie er området indenfor varmt brugsvand fortsat et emne, der åbner op for nye forskningsområder. Ud fra analyserne og resultaterne foretaget i dette studie belyses i det følgende nogle af de områder, fremtidige studier bør fokusere nærmere på.

Det overordnede formål i dette studie var at undersøge varmtvandsforbruget i danske parcelhuse og hertil også undersøge betydningen af forbruget ift. energirammen. Undersøgelsen blev foretaget på baggrund af målinger, hvor resultater af varmtvandsforbruget blev benyttet i energirammeberegningen for ét af de tre parcelhuse. Fordi denne fremgangsmåde kun belyser energirammen ved ændring af varmtvandsforbruget fra en værdi til en anden, kan det ikke dokumenteres, er det ikke undersøgt, hvordan andre parametre såsom rørlængden og varmetab angivet for brugsvandssystemet i en energiberegning har større eller mindre betydning på energiforbruget til varmt brugsvand. I fremtidige studier kunne en løsning derfor være at foretage en stokastisk analyse af energiberegning for at belyse, hvilke parametre der har størst indflydelse på energiforbruget til varmt brugsvand. Ud fra en sådan analyse ved det kunne dokumenteres, hvor der er størst potentiale for at reducere nettobehovet til varmt brugsvand.

I studiet blev potentiale for reduktion af energiforbruget for de enkelte tapsteder vurderet ud fra beregninger af energiforbruget samt energitabet for brugsvandssystemet i de tre parcelhuse. Her kunne det for målingerne i én af boligerne konstateres, at det største energitab i brugsvandssystemet forekom mellem sekundærsiden og tapstederne og herudover viste resultaterne, at rørtabet udgjorde den største andel sammenlignet med vandspildet. Idet målingerne for denne bolig var begrænsede, samt at det for de to andre boliger slet ikke var muligt at fastlægge fordelingen af energitabet fra sekundærsiden til tapstederne, vil der fortsat være behov for en nærmere analyse af energitabet i brugsvandssystemer. Kun gennem yderligere målinger i flere boliger, hvor der gøres brug af måleudstyr med en opløsning på sekundbasis, kan det dokumenteres, om rørtabet udgør den største andel af det samlede energitab. I forlængelse af dette er det af interesse at undersøge, hvad varmetabet er i PEX-rørene, som primært anvendes i brugsvandssystemer. I nogle tilfælde er der angivet et varmetab i produktkataloget for et rør, men den angivne værdi er kun gældende for stationære forhold, og som målingerne i dette projekt konstaterede, optræder der kun stationære forhold ved tapninger af længere varighed. Varmetabet er dynamisk, og derfor er det nødvendigt at foretage detaljerede, dynamiske modeller og beregninger, hvis det reelle varmetab for et rør skal fastlægges.

At opnå et større kendskab til energiforbruget og ikke mindst energitabet i boliger er også essentielt med tanke på ønsket om at reducere energiforbruget til boliger i fremtiden. Resultaterne i denne rapport underbygger konklusionen fra tidligere studier om, at energitabet i brugsvandssystemer udgør en stor andel af det samlede energiforbrug, og derfor bør der allerede i designfasen tages forbehold for dette. Ud fra de indsamlede data for de tre boliger, suppleret

med flere målinger og eventuelt en dynamisk model, der kan fastlægge varmetabet i et rør, vil det være muligt at sammenfatte resultaterne og udarbejde en designguide, som ingeniører vil kunne gøre brug af i den tidlige designfase. Dermed vil det være muligt for en ingeniør at dokumentere præcist, hvor meget energitabet øges eller reduceres, hvis et tapsted eller teknikrummet placeres det ene sted fremfor det andet. Derfor bør det være et tilsigtet mål for fremtiden at indsamle tilstrækkeligt med data til at udvikle en model til fastlæggelse af varmetab i rør, således en designguide vil kunne udformes.

Som følge af Danmarks Energistrategi 2050, det intensiverede fokus på grøn energi og at reducere energiforbruget betyder, at varmt brugsvand et område, der uomtvisteligt vil få mere opmærksomhed i fremtiden også. Allerede i dag er der en udvikling i gang på området, hvor der foretages undersøgelser af den næste generations fjernvarme, noget der også indledningsvist blev behandlet kort i denne rapport. Denne vil have stor betydning for det samlede energiforbrug i Danmark, herunder energiforbruget til varmt brugsvand, hvor en lavere fremløbstemperatur vil medføre et reduceret varmetab, ikke blot for fjernvarmenettet men også i de enkelte husstande. Tidligere studier har samtidig dokumenteret, at selv fremløbstemperaturer under 40°C fortsat vil kunne opfylde komfortkriterier omkring varmt brugsvand uden samtidig at øge risikoen for legionella. Studier som disse bør fortsat være en del af målet om at reducere fremløbstemperaturen for fjernvarmen, idet en lavere temperatur kan have betydning for den nuværende opbygning af brugsvandsystemerne, hvor krav iht. Bygningsreglementet [2018] fortsat skal overholdes.

Som en konsekvens af en lavere fremløbstemperatur på fjernvarmen bør nye løsninger for brugsvandssystemerne derfor også fortsat undersøges med henblik på at overholde kravene i Bygningsreglementet [2018]. En fremløbstemperatur for fjernvarmen under 40°C vil kunne medføre et behov for supplerende energi, der kan opvarme vandet til over fremløbstemperaturen. I dag opleves en stigning i salget af Quookere, og det samme princip kan tænkes at blive nødvendigt for flere andre tapsteder. Et eksempel kunne være brug af elboostere placeret ved tapstederne, således vandet først opvarmes ved selve tapstederne til den ønskede temperatur. På den måde vil rørtabet blive reduceret grundet den lavere temperatur på det varme vand, mens der i stedet vil blive brugt en vis mængde el til at opvarme vandet. Her bør der foretages studier, der undersøger, om denne løsning vil være rentabel for den næste generation af fjernvarme, eller om det større elforbrug vil opveje besparelserne ved det reducerede varmeforbrug.

Endeligt blev der i projektet foretaget undersøgelser af to varmegenvindingssystemer for en brusekabine, og netop varmegenvinding er et område, som den dag i dag oplever en stigende interesse. Men med tanke på næste generation af fjernvarme eller varmepumper, der er mest effektive ved lavere temperaturer, vil denne type varmegenvindingssystem ikke være nær så effektiv. Derfor kunne en løsning i stedet være at rette mere opmærksomhed mod genanvendelse af vandet, da dette vil kunne medføre besparelser i både vand- og energiforbruget. Det svenske firma Orbital Systems har allerede i dag udviklet et brusesystem, der genanvender både vandet og varmen, og det formodes, at lignende systemer vil vinde ind i fremtiden, såfremt omkostningerne kan holdes lave og dermed gøre det rentabelt for den almindelige borger. Netop sådanne systemer og nytænkning er interessant at undersøge nærmere, da den kan være en medvirkende faktor til at reducere ikke bare vand- og energiforbruget i en husstand, mens også det verdensomfattende problem med manglende drikkevand.

Litteratur

Ahmed et al., **2015**. Kaiser Ahmed, Petri Pylsy og Jarek Kurnitski. *Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings.* Energy and Buildings, Volume 97, pages 77 – 85, 2015. ISSN 0378-7788.

Ahmed et al., **2016**. Kaiser Ahmed, Petri Pylsy og Jarek Kurnitski. *Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings.* Solar Energy, Volume 137, pages 516 – 530, 2016. ISSN 0038-092X.

Becker og Stogsdill, **1990**. B.R. Becker og K.E. Stogsdill. *Development of Hot Water Use Data Base.* ASHRAE Transactions, pages 422 – 427, 1990.

Brand et al., **2010**. Marek Brand, Jan Eric Thorsen, Svend Svendsen og Christian Holm Christiansen. *A direct heat exchanger unit used for domestic hot water supply in a single-family house supplied by low energy district heating.* 12th International Symposium on District Heating and Cooling, pages 60 – 68, 2010.

Bygningsreglementet, **2010**. *Trafik- og Byggestyrelsen. Bygningsreglementet 2010.* `http://bygningsreglementet.dk/br10/0/42`, 2010.

Bygningsreglementet, **2015**. *Trafik- og Byggestyrelsen. Bygningsreglementet 2015.* `http://historisk.bygningsreglementet.dk`, 2015.

Bygningsreglementet, **2018**. *Trafik- og Byggestyrelsen. Bygningsreglementet 2018.* `http://www.bygningsreglementet.dk`, 2018.

Bygningsreglementet, **2007**. *Trafik- og Byggestyrelsen. Bygningsreglementet 1998.* `https://historisk.bygningsreglementet.dk/brs98_11/0/42`, 2007.

Bøhm, **2012**. B. Bøhm. *Production and distribution of domestic hot water in selected Danish apartment buildings and institutions. Analysis of consumption, energy efficiency and the significance for energy design requirements of buildings.* Energy Conversion and Management, Volume 67, pages 152 – 159, 2012. ISSN 0196-8904.

Bøhm et al., **2009**. Benny Bøhm, Flemming Schrøder og Niels Christian Bergsøe. *Varmt Brugsvand - Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger.* ISBN: 978-87-563-1372-8, 1. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut, 2009.

Bøhm et al., **2010**. Benny Bøhm, Flemming Schrøder og Niels Christian Bergsøe. *SBi Nr. 2009:10 - Varmt Brugsvand - Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger.* SBi forlag, 2010.

DANVA - Dansk Vand og Spildevandsforening, **2018**. DANVA - Dansk Vand og Spildevandsforening. *Vand i tal 2018.* Danva, page 52, 2018. ISSN 1903-3494.

Energistyrelsen, **2019**. *Byggeri og renovering - Energibesparende tiltag for nybyggeri og renovering af eksisterende byggeri.*

https://ens.dk/ansvarsomraader/energibesparelser/byggeri-og-renovering, 2019. Downloadet: 27-02-2019.

Energistyrelsen, **2015**. *Fakta om drivhusgasser.* https://ens.dk/ansvarsomraader/energi-klimapolitik/fakta-om-drivhusgasser, 2015. Downloadet: 27-02-2019.

Energistyrelsen, **2016**. *Varmerør.* http://www.hbemo.dk/haandbog-for-energikonsulenter-hb2016/vejledende-tekniske-anvisninger-i-tabelform/varmeroer, 2016.

Eniig, **2019**. *Priser på fjernvarme.* https://eniig.dk/privat/fjernvarme/priser-og-bestemmelser/priser/, 2019. Downloadet: 17-05-2019.

Fuentes et al., **2018**. 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, Volume 81, Part 1, pages 1530 – 1547, 2018.

Jensen et al., **2011**. Rasmus L. Jensen, Jesper Nørgaard, Ole Daniels og Rasmus O. Justesen. *DCE Technical Report No. 69 - Person- og Forbrugsprofiler.* Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University, page 81, 2011.

Klima- og Energiministeriet, **2011**. *Energistrategi 2050 - fra kul, olie og gas til grøn energi.* http://www.stm.dk/multimedia/Energistrategi_2050.pdf, 2011. Downloadet: 27-02-2019.

SBi 213, **2018**. SBi 213. *Søren Aggerholm og Karl Grau - SBi-anvisning 213 - Bygningers energibehov - Beregningsvejledning.* ISBN: 978-87-563-1878-5, 5. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut, 2018.

SE Energi og Klima, **2019**. *Elpriser - Hvad koster el og betaler du for meget?* https://www.se.dk/elpriser, 2019. Downloadet: 17-05-2019.

Thomas et al., **2011**. M. Thomas, A. Hayden, O. Ghiricociu og R. Cane. *A New Study of Hot-Water Use in Canada.* ASHRAE Transactions, pages 673 – 682, 2011.

Yang et al., **2016a**. Xiaochen Yang, Hongwei Li og Svend Svendsen. *Decentralized substations for low-temperature district heating with no Legionella risk, and low return temperatures.* Energy, Volume 110, pages 65 – 74, 2016. ISSN 0360-5442.

Yang et al., **2016b**. Xiaochen Yang, Hongwei Li og Svend Svendsen. *Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating.* Energy, Volume 109, pages 248 – 259, 2016. ISSN 0360-5442.

Yao og Steemers, **2005**. Runming Yao og Koen Steemers. *A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK.* Energy and Buildings, 37(6), 663 – 671, 2005.

Kalibrering af flowmålere A

I dette appendiks redegøres for kalibrering af flowmålerne, der gennem projektet benyttes til måling af både koldt og varmt brugsvand. I hht. produktkataloget for målerne kalibreres hver enkelt måler for flow og temperatur. I de følgende afsnit redegøres for formålet, forsøgsopstillingen samt metoden for kalibreringen, hvorefter resultater for hver enkelt måler præsenteres.

A.1 Formål

Formålet med kalibreringen er, som for enhver anden kalibrering, at undersøge nøjagtigheden af det måleudstyr, der anvendes til målinger gennem projektperioden, idet denne ændrer sig over tid. I dette projekt anvendes flowmålere af typen Huba Flow Sensor 236 til måling af både koldt og varmt brugsvand. Den anvendte type flowmåler af størrelsen DN10 har jf. produktkataloget et måleområde fra 1,8 L/min - 32 L/min for flow og -40°C - 125°C for temperatur, mens driftsbetingelserne er ved en omgivende lufttemperatur mellem -15°C og 80°C. Huba flowmålerne giver et spændingsoutput for både flow og temperatur, hvorfor en omregning til SI-enheder for hhv. flow og temperatur skal foretages. For at undersøge nøjagtigheden af målerne sammenholdes resultaterne logget på selve målerne med standardformlerne jf. produktkataloget.

Spændingsoutputtet for flowet omregnes jf. produktkataloget ved Formel (A.1).

$$Q = K_u \cdot U_{out} \tag{A.1}$$

Q	Flow	[L/s]
K_u	Nominel variable (0,0553 for DN10)	$[\frac{L}{V \cdot s}]$
U_{out}	Spændingsoutput	[V]

Spændingsoutputtet for temperaturen omregnes jf. produktkataloget ved Formel (A.2).

$$T = \frac{150\,[°C]}{10\,[V]} \cdot U_{out,t} - 25\,[°C] \tag{A.2}$$

T	Temperatur	[°C]
$T_{out,t}$	Spændingsoutput	[V]

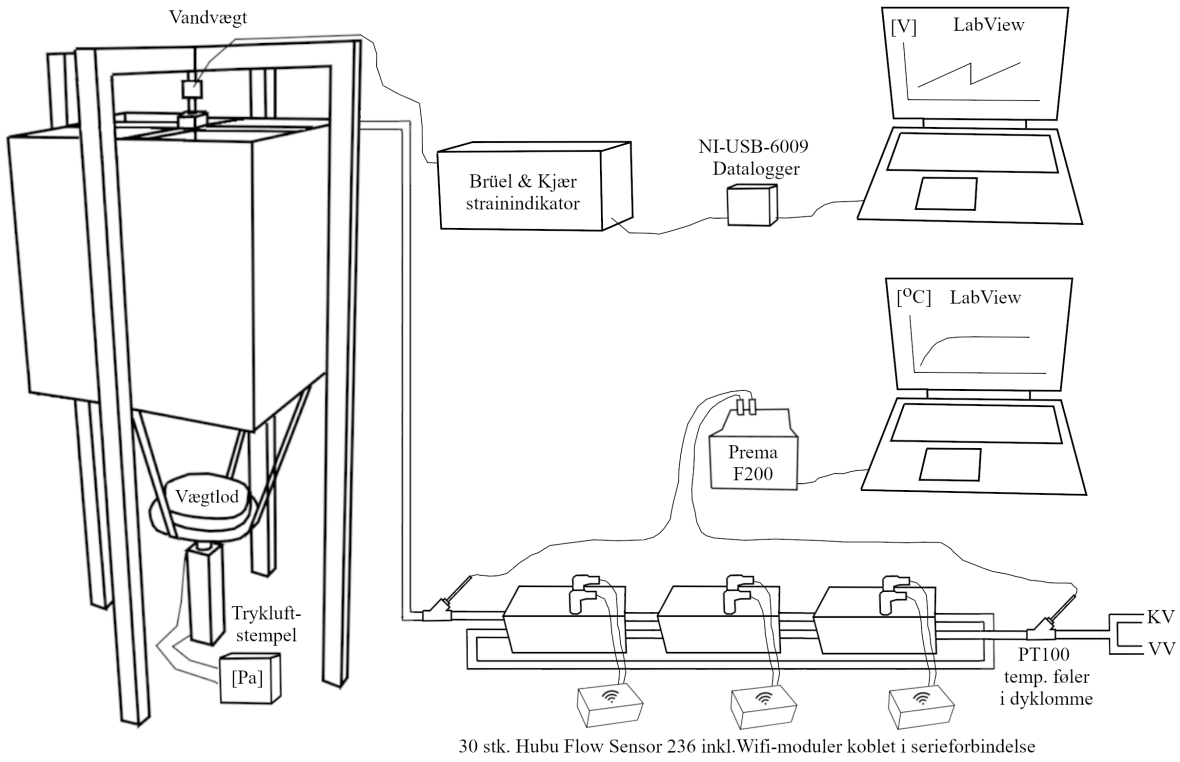
På baggrund af Formel (A.1) og Formel (A.2) er formålet med kalibreringen at opnå en korrigeret formel for hver enkelt flowmåler for hhv. flow og temperatur. Da standardformlerne er opnået ved standardiserede forsøg hos producenten vil målinger i praksis ikke nødvendigvis stemme overens med disse formler og afvigelser kan forekomme. Derfor er kalibrering af hver enkelt måler nødvendigt for at opnå korrekte resultater efter databehandling af målinger. Det skal nævnes, at de bedste resultater opnås ved kalibrering af måleudstyr både før og efter at målinger foretages, således der tages højde for eventuelle fejl opstået på måleudstyret under en givet

måleperiode. Af praktiske årsager har det dog ikke været muligt at kalibrere målerne både før og efter måleperioden i dette projekt.

A.2 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen for kalibreringen af målerne tager udgangspunkt i forsøgsvejledning 1.4.2 "*Kalibrering af vandstrømsmålere*". Nedenfor er listet det udstyr der benyttes til kalibrering af målerne, hvortil forsøgsopstilling er præsenteret på Figur A.1.

- Vandvægt inkl. vægtlodder
- Brüel og Kjær strainindikator nr. 05530
- NI-USB-6009-datalogger
- 2 stk. dyklommer
- 2 stk. PT100 temperaturfølere
- Prema F200 præcisionstermometer
- Computer med LabView software
- 34 stk. Huba Flow Sensor 236

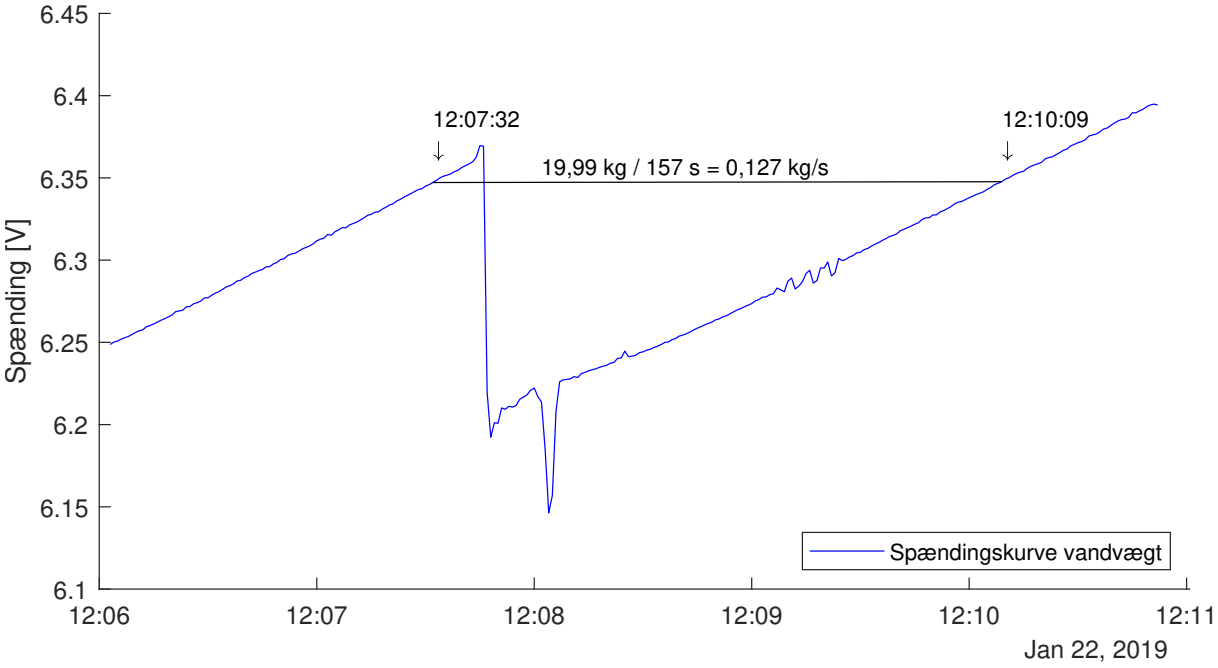


Figur A.1: Forsøgsopstilling for kalibrering af flowmålere.

A.3 Metode

På baggrund af forsøgsopstillingen, præsenteret i forrige afsnit, redegøres der i dette afsnit for metoden af kalibreringen. Som det fremgår af Figur A.1 kobles alle 34 målere i serieforbindelse med det formål, at alle målere skal kunne registrere det samme flow og den samme temperatur. For at opnå det største spænd ift. temperaturer tilsluttes alle målerne både koldt og varmt vand, således vandet kan mikses afhængigt af åbningsgraden for hhv. koldt og varmt vand. På

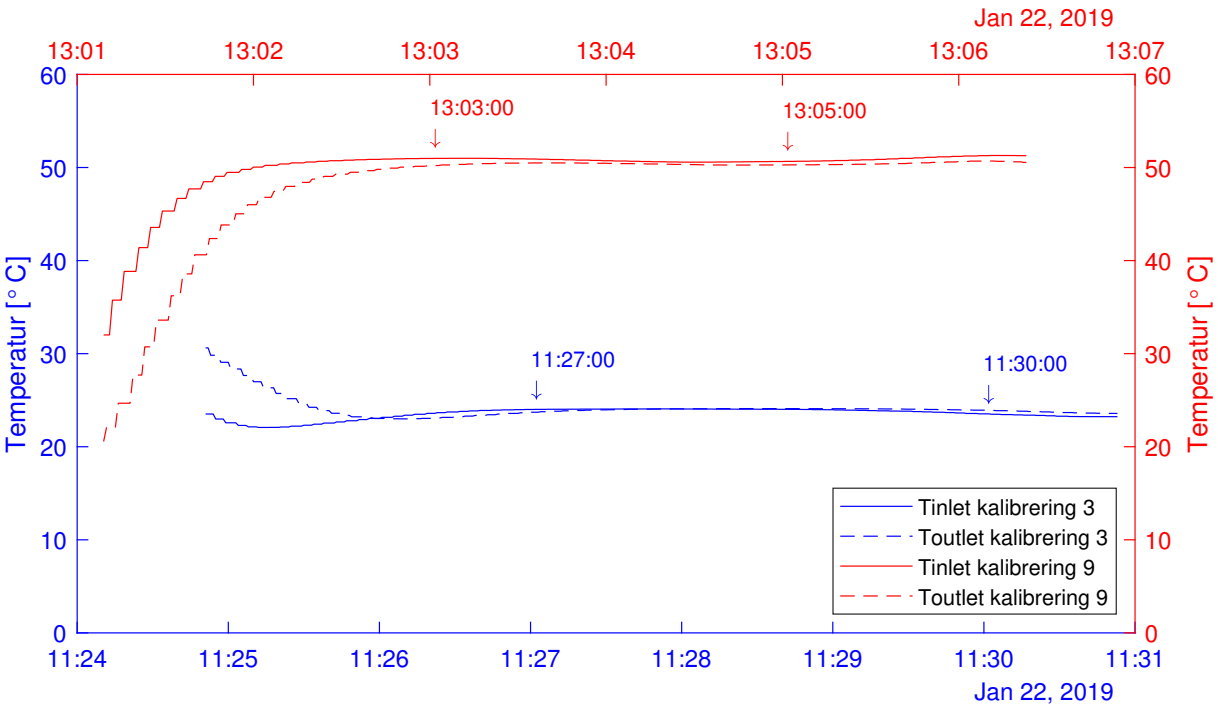
samme måde kontrolleres flowet på vandet gennem målerne. Når der er opnået et konstant flow, ledes vandet fra målerne over i vandvægten, hvorved spændingen måles ift. tid ved brug af LabView. Idet flowet er konstant, vil spændingen stige lineært ift. tiden, indtil vægtlodderne under vandvægten løftes ved brug af stemplet, som er tilsluttet trykluft. Når lodderne løftes falder spændingen, svarende til den vægt, der "fjernes", hvilket samtidig er den mængde vand, der igen skal fyldes i vandvægten for at kunne bestemme flowet. Ved brug af den kendte vægt på lodderne på 19,99 kg og den tid, det tager at fylde den samme mængde vand i vandvægten, kan flowet herved beregnes i [kg/s]. På Figur A.2 er vist et eksempel på, hvordan spændingen fra vandvægten omregnes til flow.



Figur A.2: Eksempel på spændingskurve for vandvægt d. 22/01.

Som det fremgår af Figur A.2 opnås et flow på 0,127 kg/s, svarende til 7,64 L/min, i det givne eksempel. Grundet følsomheden af strainindikatoren fra Brüel og Kjær blev flere udsving af spændingsoutputtet observeret under kalibreringen. Dette gør sig også gældende for det givne eksempel på figuren ovenfor, hvor udsving af spændingsoutputtet forekommer, selvom flowet var konstant under udførelsen. Derfor er flowet udregnet i punkter, hvor spændingsoutputtet både før og efter at lodderne løftes har en konstant hældning, svarende til konstant flow. Ved gentagelse af forsøget med forskellige flowrater opnås de punkter der senere benyttes til at sammenligne det målte spændingsoutput for hver enkelt flowmåler. Herved er det muligt at lave en regression og korrigere Formel (A.1) for hver enkelt flowmåler.

For kalibrering af temperaturen måles referencetemperaturen ved brug af temperaturfølerne, der tilsluttes dyklommerne hhv. før og efter målerne. Temperaturfølerne tilsluttes herefter Prema F200 præcisionstermometeret, hvorved temperaturen logges ift. tid ved brug af LabView. Når der er opnået en konstant temperatur, udregnes en middelværdi for et givet tidsinterval i [°C]. På Figur A.3 er vist to eksempler på, hvordan temperaturen logges og hvordan tidsintervallet, hvor middelværdien beregnes, er angivet.



Figur A.3: Eksempler på temperaturkurver for temperaturfølere d. 22/01.

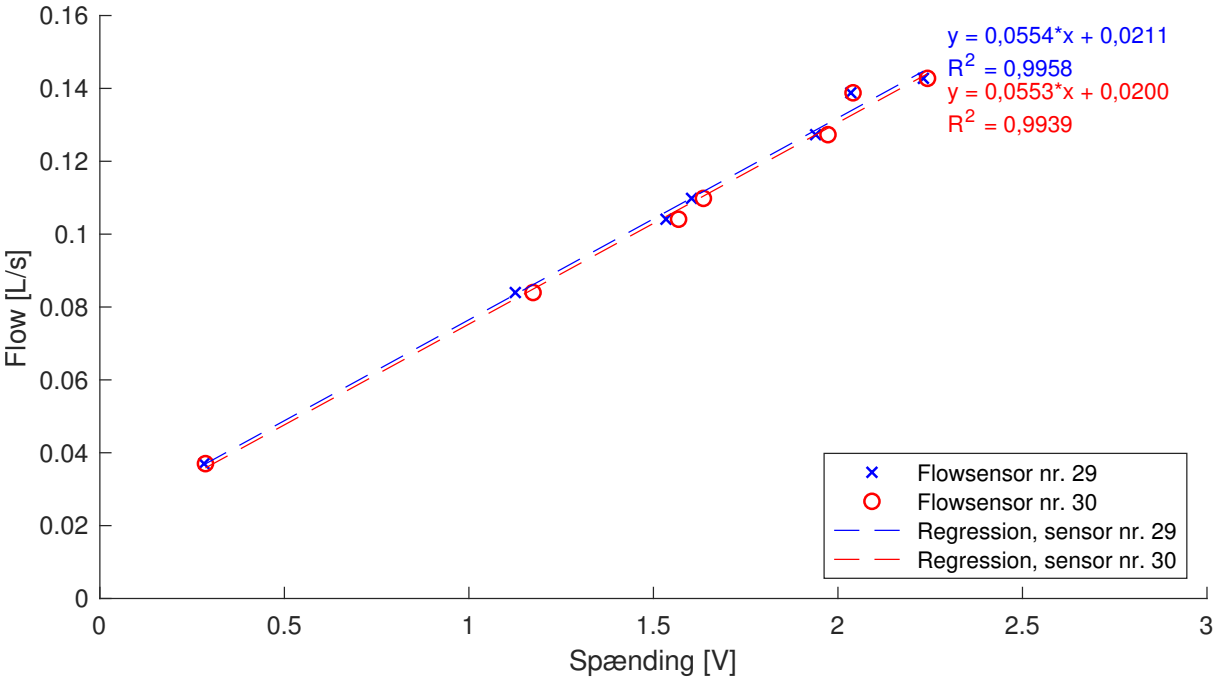
På baggrund af Figur A.3 beregnes en middeltemperatur på 23,98 °C i kalibrering nr. 3 og en middeltemperatur på 50,57 °C i kalibrering nr. 9. Som det fremgår af figuren ovenfor, måles temperaturen både for inlet og outlet svarene til placering af dyklommerne før og efter målerne. Formålet med at måle temperauren både før og efter målerne er at undersøge, om temperaturen gennem målerne ændres og derved om målerne i starten af opsætningen bør kalibreres ud fra en anden temperatur end målerne placeret til slut i opsætningen. På baggrund af temperaturkurverne på Figur A.3 vurderes det, at temperaturen for både inlet og outlet er tilnærmelsesvist ens, hvorfor alle målere kalibreres ud fra en middelværdi mellem inlet og outlet. På samme vis som ved kalibrering af flowet gentages forsøget med forskellige temperaturer, hvorved der opnås en række punkter, der senere benyttes til at sammenligne det målte spændingsoutput for hver måler. Derved er det igen muligt at lave en regression og korrigere Formel (A.2) for hver enkelt flowmåler.

For enhver kalibrering er det vigtigt at sikre sig, at alt det anvendte udstyr er kalibreret og måler præcist, således korrekte værdier opnås med mindst mulig usikkerhed. Det er både vigtigt ift. referenceudstyret, som repræsenterer sande værdier, og ift. det udstyr, der anvendes til at logge og omregne dataene til SI-enheder. Det da ikke har været muligt at foretage nye kalibreringer af alt det anvendte udstyr forudsættes det blot, at udstyret er kalibreret for nyligt og dermed måler nøjagtigt, hvorfor resultater for kalibreringen regnes som værende nøjagtige.

A.4 Resultater

I forlængelse af metodenafsnittet, redegøres i dette afsnit for resultaterne af kalibreringen. Som beskrevet tidligere var formålet med kalibreringen at korrigere Formel (A.1) og Formel (A.2) for hhv. flow og temperatur for hver enkelt måler. De korrigerede formler for flow og temperatur benyttes fremadrettet til alt databehandling for de udførte målinger.

Som beskrevet i forrige afsnit udføres kalibreringen for flowet ved forskellige flowrater og flowet beregnet ud fra vandvægten plottes herefter som funktion af spændingsoutputtet fra målerne. Dette gøres for hver måler, hvortil en regression af punkterne udføres, hvilket giver den korrigerede formel af Formel (A.1). På Figur A.4 er vist et eksempel på regressionen af flowet for hhv. flowmåler nr. 29 og flowmåler nr. 30.

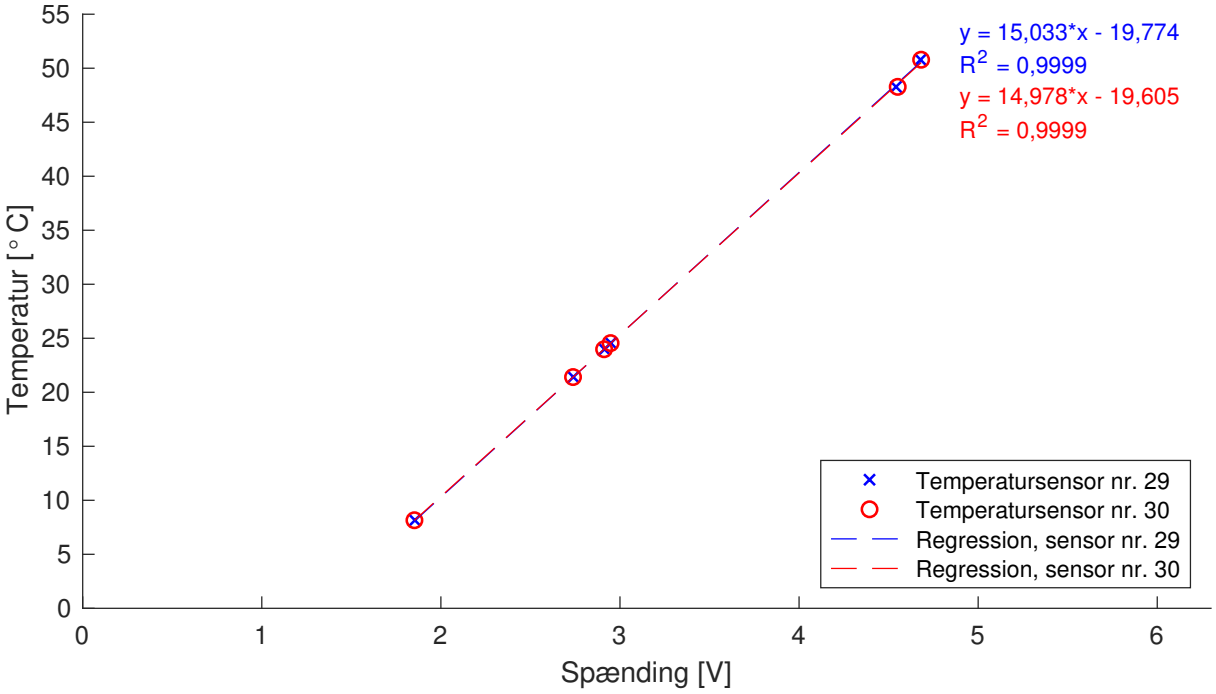


Figur A.4: Eksempel på regression af flow for flowmåler nr. 29 og nr. 30.

Som det fremgår af regressionerne på Figur A.4 afviger de to målere både fra hinanden og fra Formel (A.1). I modsætning til Formel (A.1) skærer regressionsformlerne ikke i (0,0), hvilet kan skyldes "baggrundsstøj"på målerne. Det betyder, at når et spændingsoutput på 0 V fra målerne kalibreres fås et flow på 0,0211 L/s for flowmåler nr. 29. Dette er ikke ønsket, da en spænding på 0 V skal svare til et flow på 0 L/s, hvorfor alle spæningsoutput på 0 V fra flowmålererne er omregnet til at give et flow på 0,0 L/s. For alle spændingsoutput højere end 0 V er regressionsformlerne anvendt til kalibrering af målinger. Denne fremgangsmetode er benyttet for alle 34 målere, og resultaterne er præsenteret i Tabel A.1.

Til kalibrering af temperatursensorerne laves regressionen for temperaturen logget med temperaturfølerne og temperaturen målt med temperaturfølerne plottes som funktion af spændingsoutputtet fra temperatursensorerne. På Figur A.5 er vist et eksempel på regressionen af temperaturen for hhv. temperatursensor nr. 29 og flowmåler nr. 30.

Som for flowet fremgår det af Figur A.5, at regressionerne for temperaturen også afviger fra hinanden og fra Formel (A.2). Dette betyder, at de korrigerede formler for temperaturen, opnået ved regression, benyttes fremadrettet til kalibrering af målinger. Ligesom for flowet er den samme fremgangsmetode anvendt for alle 34 målere og resultaterne er præsenteret i Tabel A.1.



Figur A.5: Eksempel på regression af temperatur for temperatursensor nr. 29 og nr. 30.

Tabel A.1: Resultater for kalibreringskurver af flowmålere for hhv. flow og temperatur.

Måler nr.	Kalibreringskurve flow	Kalibreringskurve temperatur
1	$Q=0{,}0543 \cdot U_{out}+0{,}0251$	$T=14{,}908 \cdot U_{out,t}-18{,}636$
2	$Q=0{,}0548 \cdot U_{out}+0{,}0254$	$T=14{,}924 \cdot U_{out,t}-18{,}573$
3	$Q=0{,}0553 \cdot U_{out}+0{,}0260$	$T=15{,}142 \cdot U_{out,t}-18{,}920$
4	$Q=0{,}0548 \cdot U_{out}+0{,}0265$	$T=15{,}234 \cdot U_{out,t}-18{,}939$
5	$Q=0{,}0248 \cdot U_{out}+0{,}0054$	$T=16.006 \cdot U_{out,t}-21{,}153$
6	$Q=0{,}0246 \cdot U_{out}+0{,}0050$	$T=15{,}876 \cdot U_{out,t}-20{,}984$
7	$Q=0{,}0244 \cdot U_{out}+0{,}0064$	$T=16{,}063 \cdot U_{out,t}-21{,}375$
8	$Q=0{,}0248 \cdot U_{out}+0{,}0073$	$T=15{,}799 \cdot U_{out,t}-20{,}616$
9	$Q=0{,}0564 \cdot U_{out}+0{,}0264$	$T=15{,}140 \cdot U_{out,t}-17{,}933$
11	$Q=0{,}0557 \cdot U_{out}+0{,}0266$	$T=15{,}325 \cdot U_{out,t}-18{,}642$
12	$Q=0{,}0571 \cdot U_{out}+0{,}0270$	$T=15{,}365 \cdot U_{out,t}-18{,}728$
13	$Q=0{,}0618 \cdot U_{out}+0{,}0085$	$T=14{,}752 \cdot U_{out,t}-19{,}306$
14	$Q=0{,}0578 \cdot U_{out}+0{,}0166$	$T=14{,}221 \cdot U_{out,t}-17{,}234$
15	$Q=0{,}0538 \cdot U_{out}+0{,}0338$	$T=15{,}835 \cdot U_{out,t}-18{,}832$
16	$Q=0{,}0530 \cdot U_{out}+0{,}0335$	$T=15{,}814 \cdot U_{out,t}-18{,}770$
17	$Q=0{,}0570 \cdot U_{out}+0{,}0233$	$T=15{,}148 \cdot U_{out,t}-18{,}886$
18	$Q=0{,}0563 \cdot U_{out}+0{,}0235$	$T=15{,}225 \cdot U_{out,t}-18{,}958$
19	$Q=0{,}0564 \cdot U_{out}+0{,}0258$	$T=15{,}415 \cdot U_{out,t}-18{,}953$
20	$Q=0{,}0552 \cdot U_{out}+0{,}0265$	$T=15{,}425 \cdot U_{out,t}-19{,}098$
23	$Q=0{,}0556 \cdot U_{out}+0{,}0247$	$T=15{,}271 \cdot U_{out,t}-19{,}047$
24	$Q=0{,}0548 \cdot U_{out}+0{,}0259$	$T=15{,}291 \cdot U_{out,t}-19{,}024$
25	$Q=0{,}0552 \cdot U_{out}+0{,}0230$	$T=15{,}835 \cdot U_{out,t}-18{,}832$
26	$Q=0{,}0543 \cdot U_{out}+0{,}0234$	$T=15{,}123 \cdot U_{out,t}-19{,}599$
29	$Q=0{,}0554 \cdot U_{out}+0{,}0211$	$T=15{,}033 \cdot U_{out,t}-19{,}774$
30	$Q=0{,}0553 \cdot U_{out}+0{,}0200$	$T=14{,}978 \cdot U_{out,t}-19{,}605$

31	$Q=0{,}0546\cdot U_{out}+0{,}0241$	$T=14{,}873\cdot U_{out,t}-18{,}891$
32	$Q=0{,}0547\cdot U_{out}+0{,}0241$	$T=14{,}737\cdot U_{out,t}-18{,}632$
33	$Q=0{,}0616\cdot U_{out}+0{,}0186$	$T=14{,}995\cdot U_{out,t}-18{,}280$
34	$Q=0{,}0624\cdot U_{out}+0{,}0181$	$T=14{,}912\cdot U_{out,t}-18{,}069$
35	$Q=0{,}0526\cdot U_{out}+0{,}0265$	$T=14{,}732\cdot U_{out,t}-18{,}958$
36	$Q=0{,}0531\cdot U_{out}+0{,}0258$	$T=14{,}648\cdot U_{out,t}-18{,}642$
37	$Q=0{,}0556\cdot U_{out}+0{,}0324$	$T=15{,}017\cdot U_{out,t}-18{,}225$
38	$Q=0{,}0564\cdot U_{out}+0{,}0327$	$T=15{,}835\cdot U_{out,t}-18{,}832$
40	$Q=0{,}0165\cdot U_{out}+0{,}0172$	$T=15{,}079\cdot U_{out,t}-17{,}167$

Som det fremgår af Tabel A.1, afviger alle målerne fra de to standardformler opgivet i produktkataloget. Afvigelsen er forventelig, da standardformlerne som nævnt tidligere er opnået ved standardiserede forsøg hos producenten og derfor ikke nødvendigvis stemmer overens med de målinger, der foretages i praksis. Dertil ændrer målenøjagtigheden af udstyr sig over tid, hvorfor formlerne præsenteret i Tabel A.1 anvendes i dette projekt for flow og temperatur til databehandling af målinger. Under udførelsen af kalibreringen blev det observeret, at måler nr. 40 målte ca. tre gange så høje spændinger for flowet sammenlignet med de resterende målere. Den højere spænding for flowet er grunden til den større afvigelse af formlen opnået ved kalibrering. Den større afvigelse betyder imidlertid ikke, at flowmåleren ikke kan benyttes, men belyser vigtigheden af kalibreringen, da en større spænding på denne måler skal resultere i det samme flow som de resterende målere. Det skal dog nævnes, at en kontrol af denne måler er at foretrække for at undersøge, hvad afvigelsen skyldes og om denne kan reduceres eller helt undgås.

A.5 Måleusikkerhed

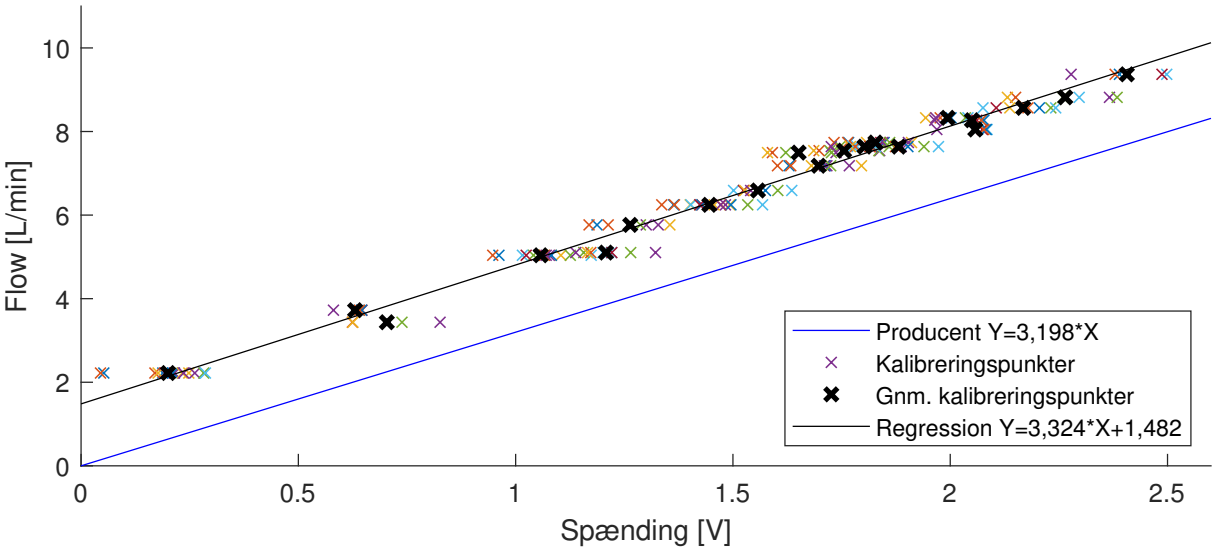
Måleusikkerhed er et vigtigt begreb, når det gælder måleudstyr. Her skal denne være lavest mulig, således nøjagtigheden og derved kvaliteten af de målte data er højest muligt. Haves en for stor usikkerhed, vil dette have betydning for kvaliteten og troværdigheden af de målte data. Derfor er det vigtigt at have et kendskab til måleudstyrets usikkerhed.

Usikkerheden på ethvert måleinstrument bør angives i produktkataloget. For Huba flowmålerne skal der derfor være angivet en usikkerhed for både flow og temperaturmålinger. Jf. produktkataloget er der ingen usikkerhed angivet for flowmålinger, mens der for temperaturmålinger er en usikkerhed på $\pm 0{,}5K \pm 0{,}005\cdot\Delta T$ ift. $T = 0°C$. Usikkerheden på et måleudstyr fastlægges ud fra målenøjagtigheden af dette, og da målenøjagtigheden ændrer sig over tid, vil usikkerheden derfor også ændre sig, hvorfor denne skal fastlægges på ny.

Som nævnt i Afsnit A.3 afhænger nøjagtigheden af kalibreringen bl.a. af, hvor præcist det anvendte udstyr er og ikke kun, hvor nøjagtigt referenceudstyret måler. På trods af antagelsen om at alt det anvendte måleudstyr er kalibrereret og dermed måler nøjagtigt, er der i reelt set også en usikkerhed på det udstyr. Når usikkerheden på flowmålerne fastlægges, inkluderer den derfor ikke kun usikkerheden på flowmålerne alene men også usikkerheden på referenceudstyret, der anvendes til at fastlægge de sande værdier. Igen antages det dog, at usikkerheden på det anvendte måleudstyr er så lav, at denne er uden særlig betydning, hvorfor de fastlagte usikkerheder nedenfor afspejler flowmålernes reelle usikkerhed.

A.5.1 Usikkerhed på flowmålinger

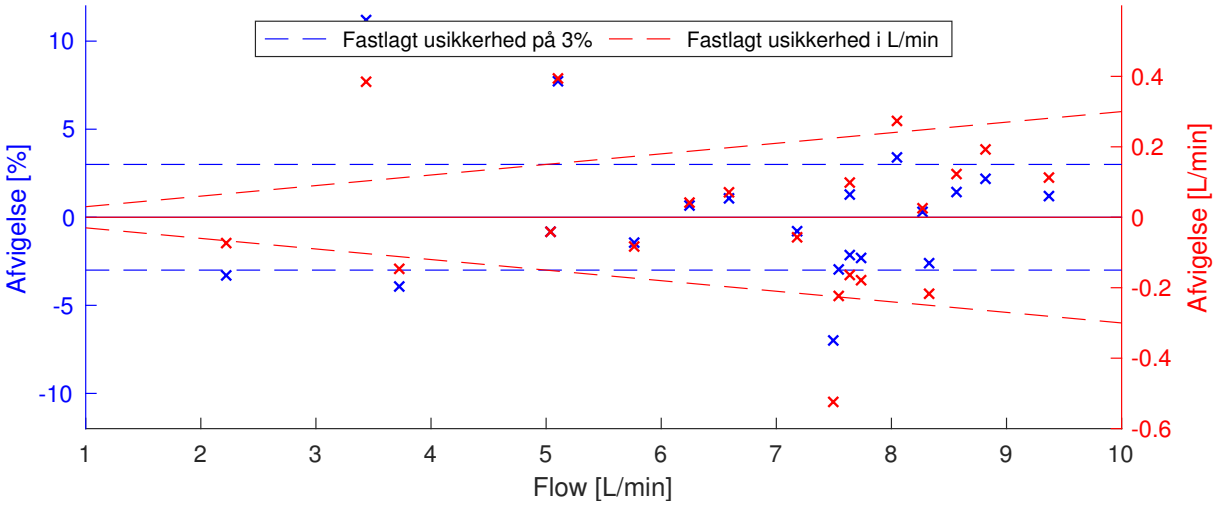
Først undersøges usikkerheden på flowmålinger foretaget ved brug af Huba Flow Sensorerne, hvor de målte værdier fra kalibreringen beskrevet i det forrige afsnit anvendes til analysen. Resultaterne for alle kalibreringer plottes og sammenholdes med den oprindelige regression fra producenten, svarende til det sande flow. Ud fra dette er det muligt både at fastlægge, hvor stor afvigelsen er ift. producentens regression, og hvad den gennemsnitlige usikkerhed er på flowmålingerne. På Figur A.6 er vist resultaterne fra kalibreringen af flowet for alle flowmålere sammen med en gennemsnitlig regression genereret på baggrund af gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne.



Figur A.6: Kalibrering af flow for alle flowmålere, hvor en gennemsnitlig regression er genereret på baggrund af gennemsnitsværdier.

Resultaterne på Figur A.6 viser, at alle flowmålere afviger fra den oprindelige regression og dermed den sande værdi. De måler i gennemsnit 28% lavere end det sande flow og med en størst procentvis forskel på 72% ved et sandt flow på 2,2 L/min. Resultaterne indikerer derfor både, at målenøjagtigheden har ændret sig markant fra producentens regression, og at det er essentielt at foretage ny kalibrering og generere en ny regression, der omregner de målte værdier til et sandt flow, således korrekte resultater opnås. Derfor er der for alle flowmålere genereret en gennemsnitlig regression på baggrund af gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne. Ved brug af gennemsnitsregressionen for alle flowmålere fås mere nøjagtige resultater, idet afvigelsen ift. det sande flow reduceres, og ved at plotte denne afvigelse mellem det beregnede flow fra gennemsnitsregressionen og det sande flow kan en gennemsnitsværdi for usikkerheden fastlægges. Denne kan bruges som en indikator for, hvor nøjagtige resultaterne fra flowmålerne er. Figur A.7 viser afvigelsen mellem det beregnede og det sande flow, mens en fastlagt usikkerhed er indtegnet i både [%] og [L/min].

Ud fra Figur A.7 fremgår det, at størstedelen af alle målingerne har en afvigelse på maksimalt ca. ±0,2 L/min ift. det sande flow, og at regressionsværdierne både ligger for højt og for lavt ift. det sande flow. Resultaterne indikerer heller ikke, at der forekommer nogle særlige tendenser for flowmålerne ift. størrelsen af flowet, da både store og små afvigelser er til stede over hele måleområdet. I gennemsnit afviger regressionsværdierne med ±3% ift. det sande flow, mens den største forskel er på 11% for et flow på 3,5 L/min. Det konkluderes derfor, at der er en usikkerhed

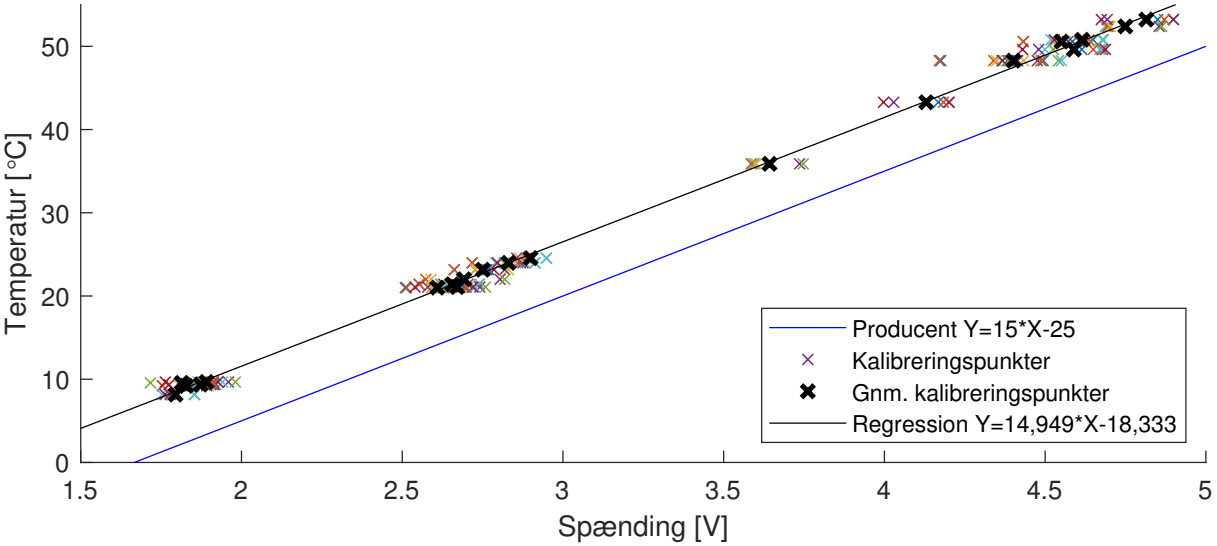


Figur A.7: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle flowmålere og det sande flow. Den fastlagte usikkerhed er angivet i både [%] og [L/min].

på ±3% for flowmålinger foretaget ved brug af Huba Flow Sensorerne, mens det ikke er muligt at fastlægge, om denne usikkerhed ligger inden for en acceptabel grænse, idet producenten ikke selv har angivet nogen usikkerhed på flowmålinger.

A.5.2 Usikkerhed på temperaturmålinger

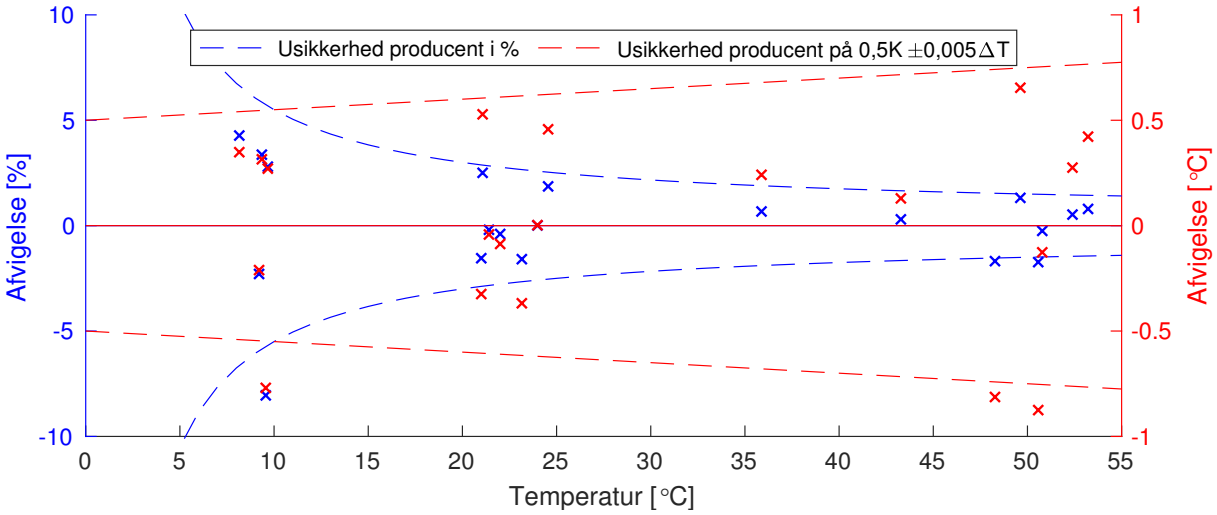
For Huba Flow Sensorerne undersøges usikkerheden på temperaturmålinger på samme måde, som for flowmålinger, ved brug af de målte værdier fra kalibreringen. Først plottes resultaterne for alle kalibreringer, hvor de registrerede værdier sammenholdes med producentens oprindelige regression, svarende til den sande temperatur målt på præcisionstermometeret samt usikkerheden opgivet fra producenten. Ud fra dette er det muligt at fastlægge, hvor stor afvigelsen er ift. den sande temperatur, og om denne ligger inden for producentens grænse. Figur A.8 viser resultaterne for alle temperaturkalibreringer af Huba Flow Sensorerne sammen med en gennemsnitlig regression genereret på baggrund af gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne.



Figur A.8: Kalibrering af temperatur for alle flowmålere, hvor en gennemsnitslig regression er genereret på baggrund af gennemsnitsværdier.

Figur A.8 viser, at kalibreringspunkterne for Huba Flow Sensorerne alle afviger fra den oprindelige regression, svarende til den sande temperatur. Her måler de i gennemsnit en temperatur 33% lavere end den sande værdi, mens den største afvigelse er på 77% ved en temperatur på 9,5°C. Resultaterne afspejler derfor det samme som for flowet, at producentens angivne målenøjagtighed for temperaturmålinger har ændret sig, hvorfor en ny kalibrering er af afgørende betydning for, at der fås korrekt målinger. Grundet denne afvigelse er der genereret en gennemsnitslig regression ud fra gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne.

Ud fra den nye gennemsnitsregression for alle flowmålere fås mere nøjagtige resultater for temperaturen, idet regressionen reducerer afvigelsen mellem den målte og sande værdi. Ved at plotte forskellen mellem den sande og beregnede temperatur ud fra den nye regression, samt indtegne producentens usikkerhed på $\pm 0{,}5\text{K} \pm 0{,}005 \cdot \Delta\text{T}$, kan det fastlægges, om usikkerheden på temperaturmålinger foretaget ved brug af Huba Flow Sensorerne i dag er større end producentens grænse. Resultaterne er vist på Figur A.9, hvor usikkerheden også er angivet i [%].



Figur A.9: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle fire KATflows og det sande flow. Usikkerheden er angivet i både [%] og [L/s].

Resultaterne på Figur A.9 viser, at næsten alle temperaturer fastlagt ved brug af den gennemsnitlige regression ligger indenfor producentens grænse på $\pm 0{,}5\text{K} \pm 0{,}005 \cdot \Delta\text{T}$. I gennemsnit afviger målingerne med 0,3°C, svarende til ca. 2%, og kun tre målinger ligger udenfor usikkerhedsintervallet, idet den beregnede temperatur er lavere end den sande. Her er den største afvigelse på 8% ved en sand temperatur på 9,5°C. Konklusionen for temperaturmålingerne er derfor, at Huba Flow Sensorerne, ved brug af de nye kalibreringsformler, måler temperaturen med en gennemsnitlig usikkerhed på 2%, hvilken stemmer godt overens med producentens angivne usikkerhed på måleudstyret.

Kalibrering af KATflows B

I dette appendiks redegøres for kalibrering af KATflows, hvilke placeres i teknikrummet og anvendes til måling af både koldt og varmt brugsvand samt fjernvarme. Nedenfor følger en beskrivelse af formålet, forsøgsopstillingen, metoden samt resultaterne for kalibreringen af KATflows, der alle kalibreres for flow og temperatur. Afslutningsvist beskrives og analyseres måleusikkerheden på måleudstyret.

B.1 Formål

Som for kalibreringen af flowmålerne beskrevet i Appendiks A er formålet at undersøge nøjagtigheden af KATflow målerne, der anvendes til målinger gennem projektperioden. De anvendte KATflows er alle af typen KATflow 100, en ultralyd flowmåler med to tilhørende PT100 temperatursensorer, der anvendes til måling af både flow og temperatur. Måleområdet for KATflows'ne er jf. produktkataloget 0,01 m/s - 25 m/s for flowmåleren og -50°C - 400°C for temperaturmålinger mens driftsbetingelserne er ved en omgivende lufttemperatur mellem -10°C og 60°C. KATflow'en kan bruges til at måle på et medium med temperaturer i intervallet -30°C -130 °C.

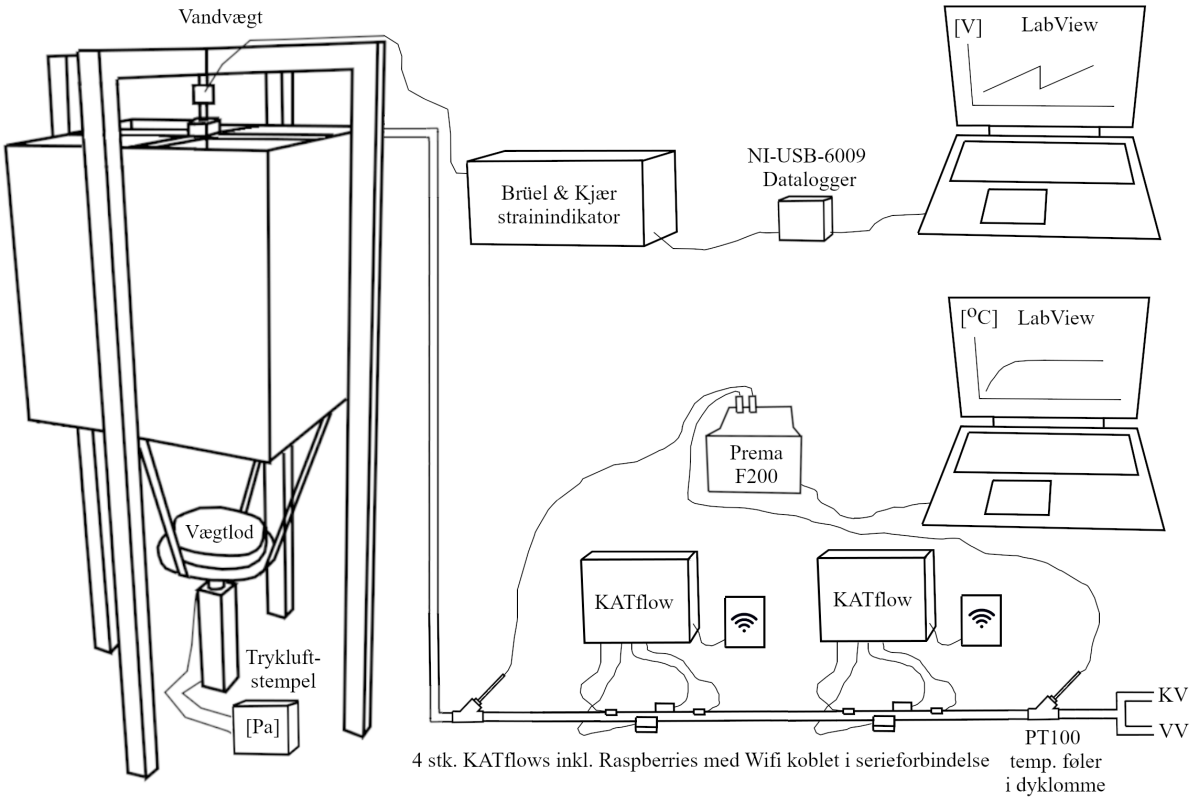
I produktkataloget for KATflow 100 flowmålerne angives ingen standardformel, hvorfor KATflows'ne forventes at måle nøjagtige værdier ($x = y$). Derfor undersøges nøjagtigheden af hver KATflow ved at sammenholde data logget på KATflow-enheden med data logget fra kalibreringsudstyret. Idet måleudstyr ændrer sig over tid, og ingen måleinstrumenter opretholder sin målenøjagtighed ubegrænset, er det essentielt at foretage en ny kalibrering af de enkelte KATflow 100 flowmålere, for derved at opnå nøjagtige resultater ved efterfølgende målinger. Igen har det af praktiske årsager ikke været muligt at foretage en kalibrering både før og efter måleperioden, hvorfor denne kun gennemføres en gang.

B.2 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen for kalibreringen af KATflow-enhederne er tilsvarende den anvendte for flowmålerne og tager udgangspunkt i forsøgsvejledning 1.4.2 "*Kalibrering af vandstrømsmålere*". Det anvendte udstyr til kalibreringen af KATflows er listet nedenfor, mens forsøgsopstillingen er vist på Figur B.1.

- Vandvægt inkl. vægtlodder
- Brüel og Kjær strainindikator nr. 05530
- NI-USB-6009-datalogger
- Stålrør
- 2 stk. dyklommer
- 2 stk. PT100 temperaturfølere

- Prema F200 præcisionstermometer
- Computer med LabView software
- 4 stk. KATflow 100 ultralyd flowmåler med 2 stk. PT100 temperaturfølere



Figur B.1: Forsøgsopstilling for kalibrering af KATflows.

B.3 Metode

I det følgende afsnit redegøres for metoden anvendt ved kaliberingen af KATFlows. Figur B.1 illustrerer, hvordan alle fire KATflows monteres på stålrøret med det formål, at de alle skal kunne registrere samme flow og temperatur. Tilsvarende kalibreringen af flowmålerne tilsluttes stålrøret både koldt og varmt vand gennem et T-stykke, således et større spænd ift. temperaturer kan opnås. Kalibreringen af både flow og temperatur er udført ved brug af samme fremgangsmåde som beskrevet i Afsnit A.3 i Appendix A for flowmålerne.

Som allerede nævnt i kalibreringen af flowmålerne, se Afsnit A.3, er det vigtigt at sikre sig, at det anvendte udstyr er kalibreret og måler præcist, således korrekte værdier opnås med mindst mulig usikkerhed. Da det samme udstyr anvendes til kalibreringen af KATflows'ne, antages samme forudsætning om, at udstyret er kalibreret for nyligt og dermed måler nøjagtigt, hvorfor resultater for kalibreringen regnes som værende nøjagtige.

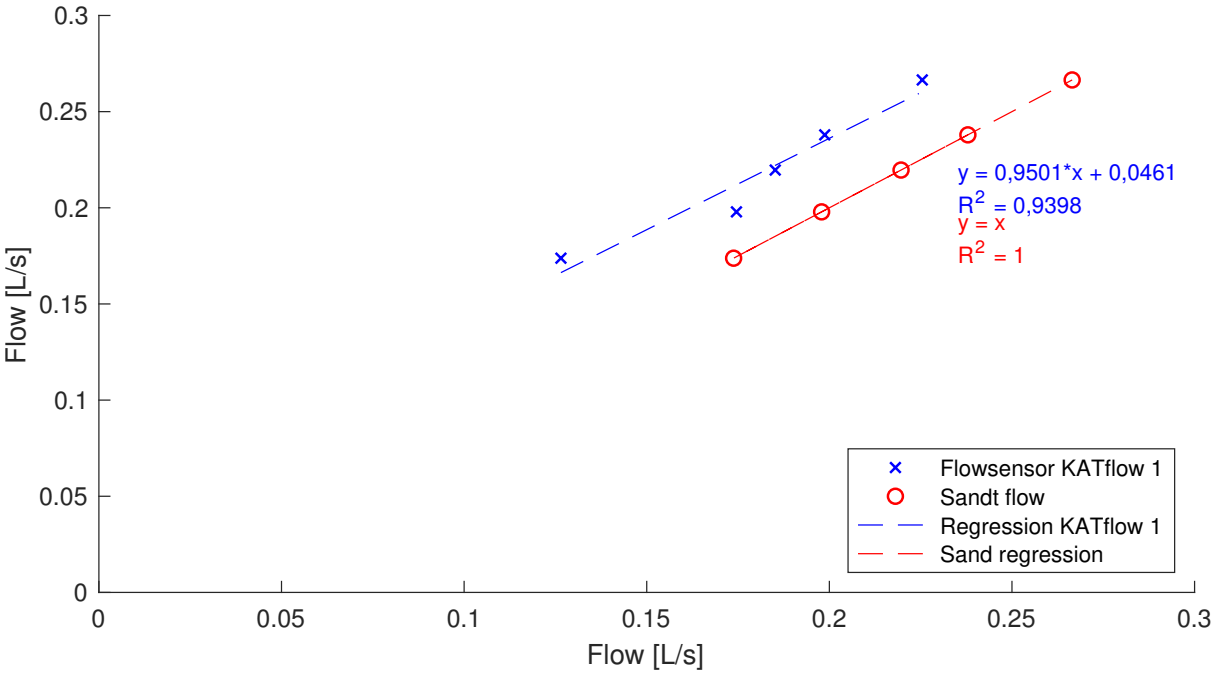
Dertil er det vigtigt at notere, at ultralyd flowmålerne er særligt følsomme, hvilket også angives i produktkataloget. Her skal transducerne monteres meget nøjagtigt på røret for at sikre et optimalt lydsignal, og grundet forskellige rørudformninger og anvendelsesmuligheder findes der jf. produktkataloget ingen standardløsning for montering af flowmålerne. Faktorer som rørdiameter, materiale, foring, tykkelse, mediet i røret samt luftbobler og andre partikler i dette har alle indflydelse på signalet og påvirker derfor det målte flow. Ved montering af KATflows i husstandes

teknikrum kan det derfor være svært at vide, om flowmålerne er monteret korrekt og vil måle rigtigt.

B.4 Resultater

Resultaterne for kalibreringen af KATflows beskrives i det følgende afsnit, hvor formålet er at opstille korrigerede formler for hhv. flow og temperatur for alle fire KATflows. De korrigerede formler anvendes til efterfølgende databehandling af de udførte målinger.

Kalibreringen for flowet udføres ved forskellige flowrater, hvorefter det beregnede flow fra vandvægten plottes som funktion af flowet fra KATflow-enheden. Dette gøres for alle fire KATflows, og ved efterfølgende at udføre en regressionsanalyse genereres en korrigeret formel for flowet. På Figur B.2 er vist et eksempel på regressionen af flowet for KATflow 1.

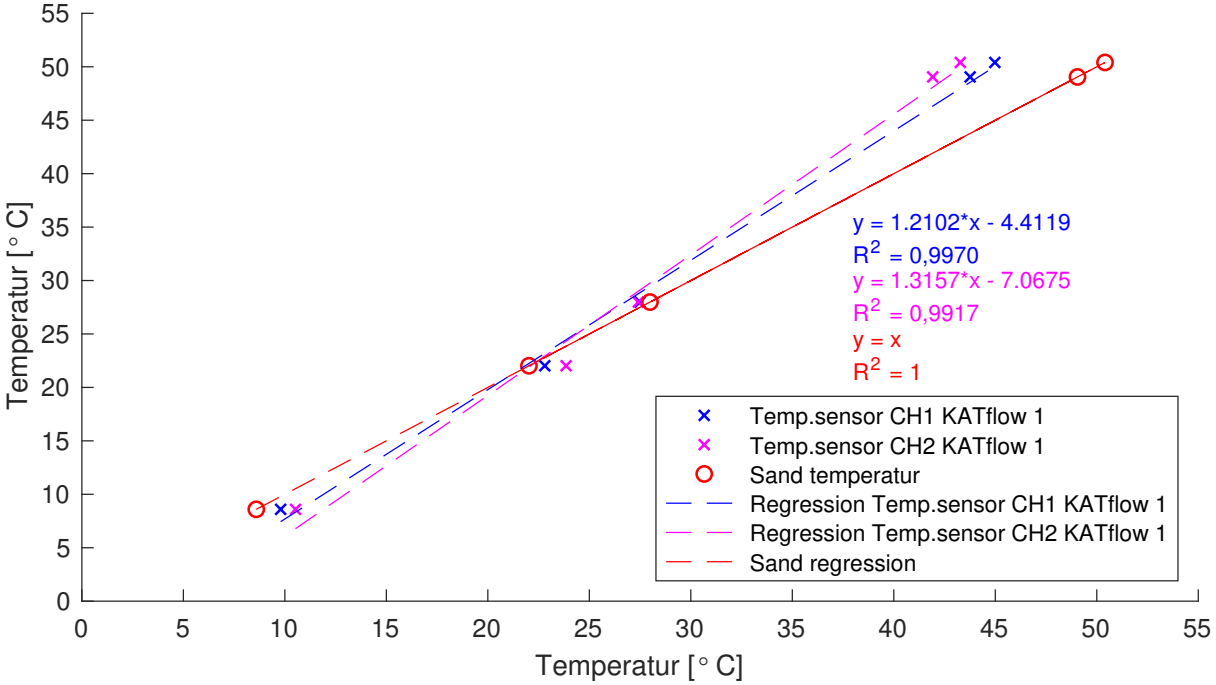


Figur B.2: Eksempel på regression af flow for KATflow 1.

Regressionen for kalibreringen af KATflow 1 vist på Figur B.2 afviger fra den oprindelige regression, hvorfor dette bl.a. indikerer, at udstyret har ændret sig over tid. Afvigelsen skyldes samtidig også følsomheden på udstyret, hvor transducerne ikke er monteret på nøjagtig samme rør med samme placering og under samme forhold som for producentens kalibrering. Den viste regressionsformel skærer ligeledes ikke i (0,0), hvilket indikerer, at der er "baggrundsstøj"på målerne. Resultatet og afvigelsen mellem de to regressionsformler understreger her vigtigheden i at foretage jævnlig kalibrering for fortsat at opretholde målenøjagtigheden af udstyret. Samme resultat gør sig gældende for de resterende tre KATflows, hvor resultaterne er præsenteret i Tabel B.1.

Kalibreringen af de to PT100 temperatursensorer på hver af de fire KATflows foretages ved forskellige temperaturer, og efterfølgende plottes den registrerede værdi fra PT100 præcisions-termometeret som funktion af temperaturen registreret af hver PT100 temperatursensor på KATflow-enheden. Der foretages derved to regressionsanalyser for hver KATflow, en for hver

temperaturføler, hvilket resulterer i to korrigerede formler. Figur B.3 viser et eksempel på regressionsformlerne opnået for hver af de to PT100 temperaturfølere for KATflow 1.



Figur B.3: Eksempel på regressioner af to PT100 temperaturfølere på KATflow 1.

Som tilfældet var med flowet, afviger regressionerne for temperaturen ligeledes fra den oprindelige formel, hvorfor disse formler anvendes til kalibrering af målingerne fremadrettet. Resultaterne for de resterende tre KATflows er præsenteret i Tabel B.1.

Tabel B.1: Resultater for kalibreringskurver af KATflows for hhv. flow og temperatur.

KATflow nr.	Kalibreringskurve flow	Kalibreringskurve Temperatur CH1	Kalibreringskurve Temperatur CH2
1	Q=0,9501·q+0,0461	T_{CH1} =1,2102·t−4,4119	T_{CH2} =1,3157·t−7,0675
2	Q=1,0317·q−0,0031	T_{CH1} =1,1723·t−3,6353	T_{CH2} =1,3027·t−6,4386
3	Q=0,5143·q+0,1241	T_{CH1} =1,1280·t−2,7366	T_{CH2} =1,1081·t−1,9969
4	Q=0,7320·q+0,0920	T_{CH1} =1,1033·t−1,9584	T_{CH2} =1,0883·t−1,7920

Af Tabel B.1 fremgår det, at alle fire KATflows har en regressionsformel for både flow og temperatur, og derfor ikke længere har den samme målenøjagtighed for flow og temperatur som tidligere. Tilsvarende konklusionen for flowmålerne er denne afvigelse forventelig, da KATflow enhederne med al sandsynlighed ikke er kalibreret under samme forhold og ved brug af samme udstyr, som producenten har anvendt. Derfor er brug af ovenstående regressioner nødvendig for fremadrettet at opnå korrekte resultater fra alle KATflows, og regressionsformlerne vil fremadrettet anvendes til databehandling af målinger udført med KATflows.

B.5 Måleusikkerhed

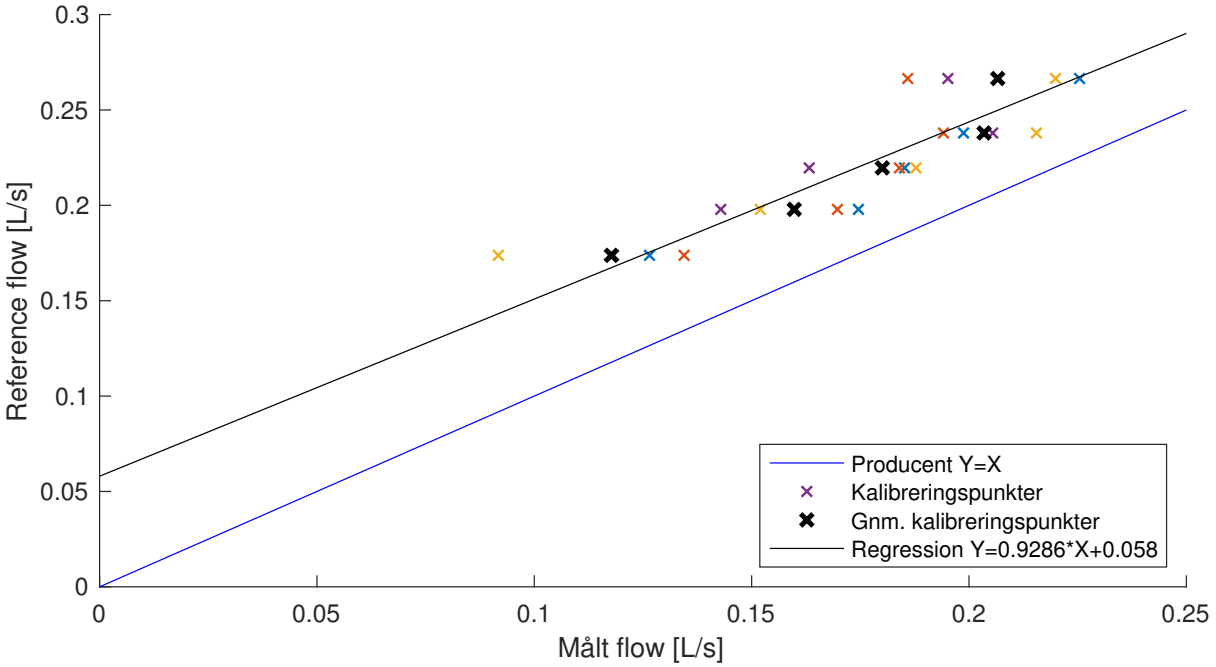
Usikkerheden på et måleudstyr angives ofte i produktkataloget, hvorfor der for KATflow-enhederne skal være angivet en usikkerhed for både ultralyd flowmåleren og PT100 temperatursensorerne,

da der er tale om to forskellige måleinstrumenter. Jf. produktkataloget er der en usikkerhed på ultralyd flowmålerne på ±1-3%, mens der for temperaturfølerne er angivet en usikkerhed på ±0,2 K.

I lighed med flowmålerne vil de fastlagte usikkerheder for KATflows'ne ikke kun afspejle deres egen usikkerhed men også usikkerheden på alt andet anvendt udstyr. Samme antagelse gøres derfor for KATflows'ne om, at usikkerheden på det anvendte måleudstyr er så lav, at denne er uden særlig betydning, hvorfor de fastlagte usikkerheder nedenfor afspejler den reelle usikkerhed på KATflows'ne.

B.5.1 Usikkerhed på ultralyd flowmålere

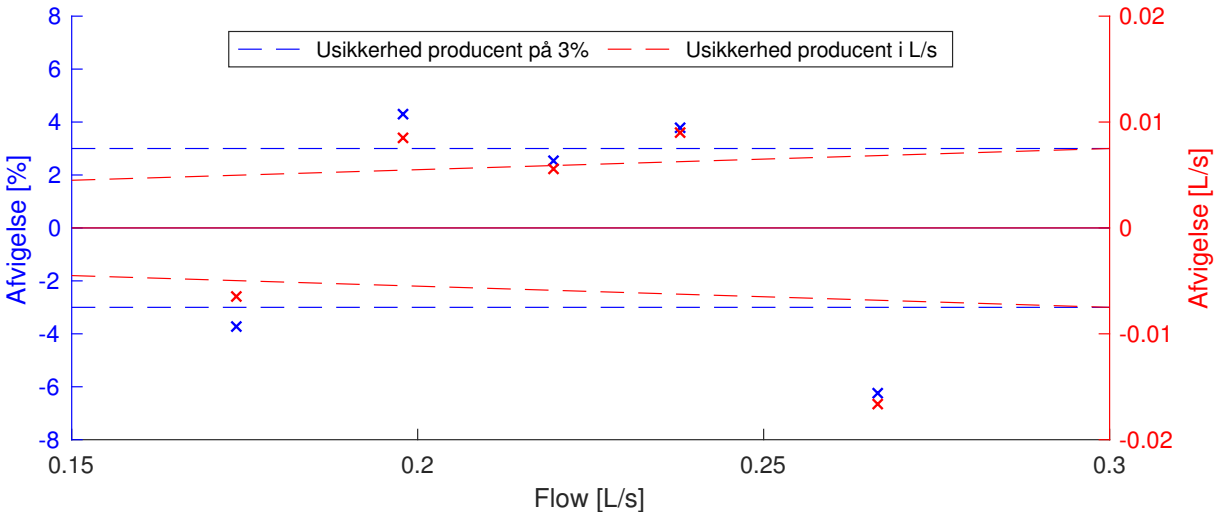
For KATflow-enhederne undersøges først usikkerheden på ultralyd flowmålerne ved brug af de målte værdier fra kalibreringen beskrevet i det forrige afsnit. Ved at plotte resultaterne for alle fire kalibreringer i samme figur og sammenholde disse med det sande flow, samt usikkerheden opgivet fra producenten, er det muligt at fastlægge, om usikkerheden ligger inden for eller overskrider producentens angivne værdi. Til undersøgelsen anvendes en usikkerhed på 3%. Resultaterne for kalibreringen af flowet for alle fire KATflows er vist på Figur B.4 sammen med en gennemsnitlig regression genereret på baggrund af gennemsnitlige kalibreringspunkter.



Figur B.4: Kalibrering af flow for alle fire KATflows, hvor en gennemsnitlig regression er genereret på baggrund af gennemsnitsværdier.

Figur B.4 viser, at de enkelte kalibreringspunkter for de fire KATflows alle afviger fra den sande værdi. I gennemsnit måler de et flow 21% lavere end det sande flow og med en størst procentvis forskel på 32% ved et sandt flow på 0,17 L/s. Denne forskel understreger dermed betydningen i at foretage en kalibrering og generere en regression, der kan anvendes til at omregne de målte værdier til et sandt flow. Samtidig understreger afvigelsen igen følsomheden af udstyret, og at det ikke med sikkerhed kan garanteres, at disse kalibreringsformler vil være gyldige for fremtidige målinger.

Til fastlæggelsen af usikkerheden er der for alle fire KATflows genereret en gennemsnitlig regression på baggrund af gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne. Ved at anvende gennemsnitsregressionen for de fire KATflows reduceres afvigelsen ift. det sande flow, og usikkerheden undersøges derfor på ny. Ved at plotte afvigelsen mellem det beregnede flow fra gennemsnitsregressionen og det sande flow, samt indtegne producentens usikkerhed på ±3%, undersøges det, om usikkerheden fra KATflow-enhederne i gennemsnit afviger med mere eller mindre end ±3% af det sande flow. Resultaterne giver derved en indikation på, om usikkerheden på måleudstyret i dag er større end producentens angivne værdi. Dette er vist på Figur B.5, hvor usikkerheden også er angivet i [L/s].



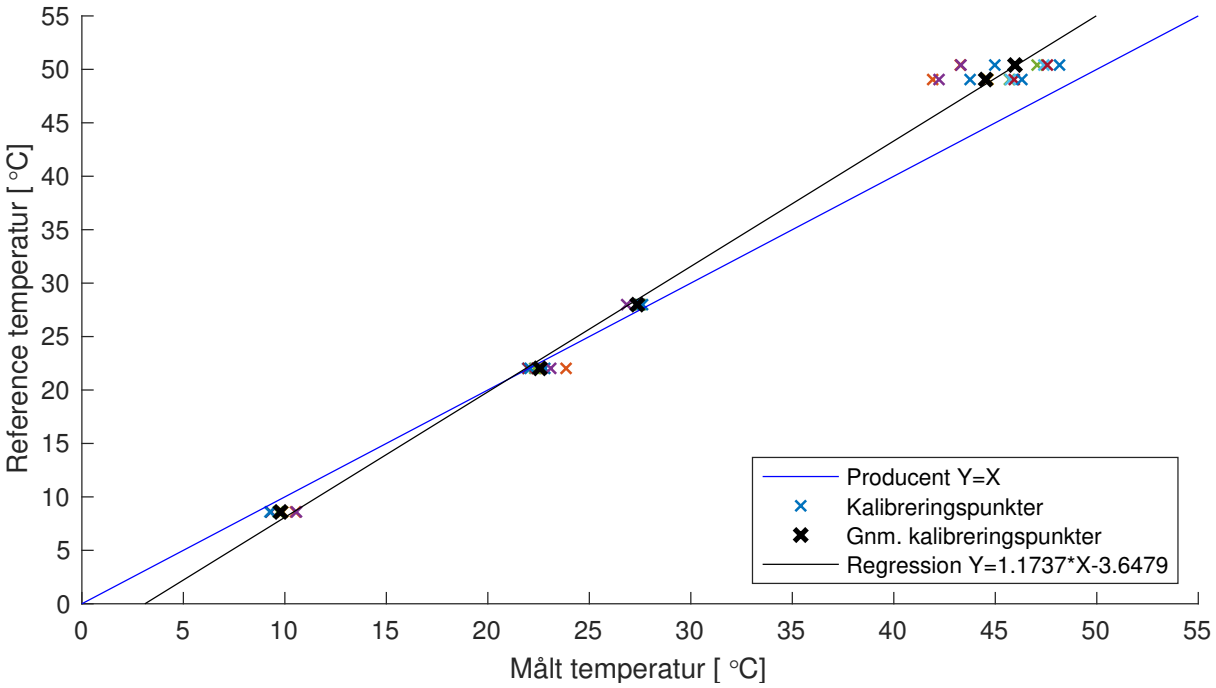
Figur B.5: Afvigelse mellem flow beregnet ud fra en gennemsnitlig flowregression for alle fire KATflows og det sande flow. Usikkerheden er angivet i både [%] og [L/min].

Resultaterne på Figur B.5 viser, at for fire af de fem analyserede flows afviger det beregnede flow med mere end ±3% fra det sande flow. Kun ved et sandt flow på 0,22 L/s er afvigelsen mindre end 3%. I gennemsnit afviger regressionsværdierne med ±4%, mens den største forskel er på over 6% ved et sandt flow på 0,26 L/s. Resultaterne indikerer derfor, at producentens angivne måleusikkerhed for KATflow-enhederne på ±3% er steget til en gennemsnitlig værdi på ±4%, hvorfor det kan konkluderes, at de i dag ikke måler nær så nøjagtigt som angivet i produktkataloget.

Følsomheden af udstyret samt usikkerheden omkring en korrekt montering har også betydning for, om flowregressionerne præsenteret i Tabel B.1 for de enkelte KATflows kan anvendes ved den pågældende måling eller ej. Følsomheden afspejler sig tydeligt i forskellen på de fire KATflows flowregressioner, til trods for at alle fire KATflows ved kalibreringen havde nøjagtig samme setup og angav fuld signalstyrke for ultralyd flowmålerne. Og idet setuppet ved kalibrering ikke er ens med setuppet i de enkelte husstandes teknikrum ved måling, vil der herske usikkerhed omkring flowregressionernes gyldighed og dermed målenøjagtigheden for de enkelte KATflows. Det anbefales derfor at lave en kontrol ved montering, enten ved at foretage en kontrolmåling, eller ved at sammenligne med værdier registreret af Huba Flow Sensorerne på tapstederne. På den måde kan det sikres, at KATflow-enhederne bliver monteret korrekt.

B.5.2 Usikkerhed på PT100 temperaturfølere

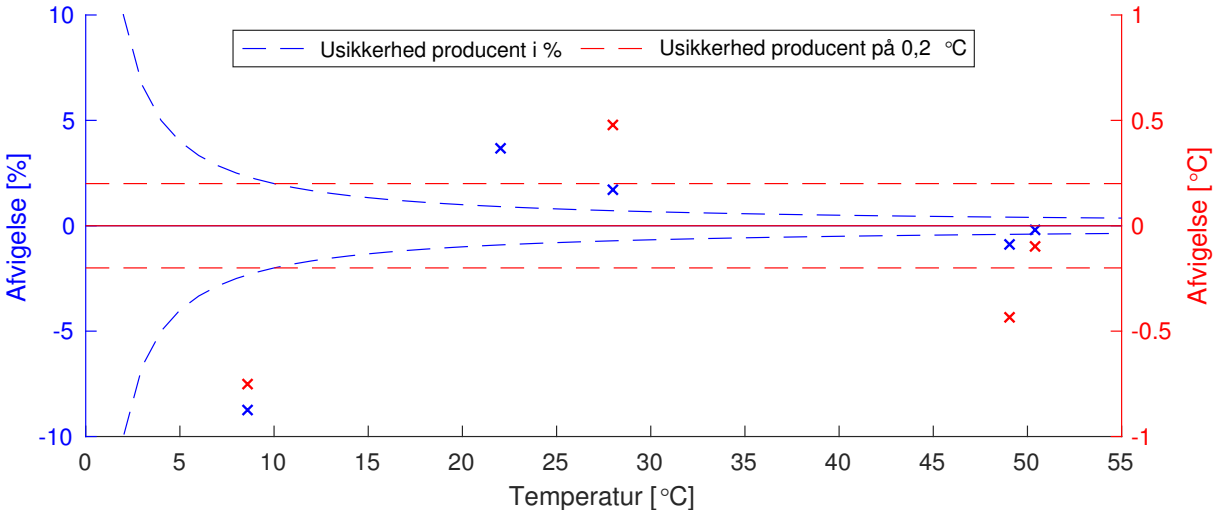
Usikkerheden på de to PT100 temperaturfølere for hver KATflow undersøges på samme måde, som for ultralyd flowmåleren, ved brug af de målte værdier fra kalibreringen. Her plottes resultaterne for alle otte temperaturfølere sammen med den sande temperatur målt på præcisionstermometeret, og der sammenholdes med producentens angivne usikkerhed på 0,2 K. Figur B.6 viser resultaterne for alle otte PT100 temperaturfølere sammen med en gennemsnitlig regression genereret på baggrund af gennemsnitlige kalibreringspunkter.



Figur B.6: Kalibrering af temperatur for alle fire KATflows. En gennemsnitlig regression er genereret på baggrund af gennemsnitsværdier.

Resultaterne på Figur B.6 viser, at der, som det også var tilfældet med flowet, forekommer afvigelser mellem de målte værdier og den sande værdi. Ud fra kalibreringspunkterne for de otte temperaturfølere ses det, at der er større spredning i de målte værdier ved temperaturer over 45°C, mens spredningen er lavere ved temperaturer lavere end 30°C. Dertil fremgår det, at temperaturfølerne ved temperaturer under 25°C måler mellem 0,5°C og 1°C højere end den sande temperatur, hvorimod de ved temperaturer over 25°C måler mellem 0,5°C og 4,5°C lavere end den sande temperatur. Resultaterne understreger dermed igen, hvor vigtig en kalibrering og anvendelsen af en regression er for at opnå en høj målenøjagtighed. Derfor genereres en gennemsnitlig regression for temperaturen baseret på gennemsnitsværdier for kalibreringspunkterne.

Gennemsnitsregressionen reducerer afvigelsen mellem den målte og sande temperatur, hvorfor usikkerheden igen undersøges. Forskellen mellem den beregnede temperatur ud fra gennemsnitsregressionen og den sande temperatur plottes sammen med producentens usikkerhed på ±0,2 K. Derved undersøges det, om usikkerheden for temperaturerne afviger med mere eller mindre end ±0,2 K af den sande værdi. Derved er det muligt at skønne, om måleusikkerheden på måleudstyret i dag er større end producentens angivne værdi. Figur B.7 viser afvigelsen, hvor usikkerheden også er angivet i [%].



Figur B.7: Afvigelse af temperatur beregnet ud fra en gennemsnitlig temperaturregression for alle fire KATflows og den sande temperatur. Usikkerheden er angivet i både [%] og [°C].

Resultaterne på Figur B.7 viser, at kun én værdi ligger inden for det angivne usikkerhedsinterval på 0,2 K, mens de resterende temperaturer alle overskrider. Den største afvigelse haves ved en temperatur på 8,5°C, hvor den målte værdi ligger 0,75°C lavere, svarende til næsten 9%. Den gennemsnitlige afvigelse mellem de beregnede og sande temperaturer lyder på ±0,5°C, svarende til 3%, hvilket indikerer, at måleusikkerheden for KATflow-enhederne er steget fra ±0,2°C til ±0,5°C. Det kan derfor konkluderes, at temperaturfølerne ikke måler nær så nøjagtigt, som producenten har angivet i produktkataloget.

Den samlede konklusion på kalibreringen af KATflows'ne er, at der til databehandlingen af det målte data for Kærhavebakken og Petersborgvej anvendes de fastlagte kalibreringsformler for temperaturfølerne, idet disse følere ikke på samme måde er følsomme i forhold til placeringen på et rør sammenlignet med flowtransducerne. For flowet vurderes det, at følsomheden på transducerne gør, at det ikke er muligt at benytte kalibreringsformler til flowet. Hertil er usikkerheden forbundet med placeringen af transducerne for stor til, at kalibreringsformlerne kan regnes som værende gyldige. Derfor foretages i stedet kontroltjek ved montering af disse, således det vides, at de er monteret korrekt og registrerer et korrekt flow.

Kontroltest af flowmålere C

Dette appendiks beskriver den kontroltest, der er foretaget af flowmålerne anvendt til måling af koldt og varmt brugsvand. Kontroltesten er foretaget for dels at sikre, at kvaliteten af dataene indsamlet gennem flowmålerne er acceptable, dels at undersøge forskellige usikkerheder, opstået ved brug af flowmålerne og efterfølgende databehandling, omkring flowmålernes evner til at registrere forskellige typer af flows. Gennem kontroltesten er tre forskellige usikkerheder undersøgt, hvilke beskrives nedenfor i hvert sit afsnit. I det enkelte afsnit redegøres for formål, forsøgsopstilling, metode og resultater.

C.1 Kontrol af mixflow

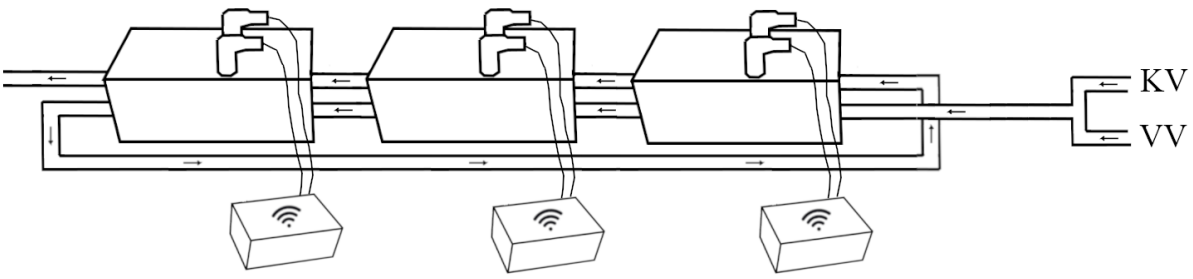
Flowmålerne er parvis tilkoblet et board, kaldet Arduino, der logger de registrerede spændinger fra flowmålerne og uploader dataene på en server. Her er der opstået en usikkerhed omkring boardenes evne til at registrere flow på begge flowmålere samtidigt, også kaldet mixflow. Usikkerheden er opstået som følge af databehandling af de indsamlede data for Kærhavebakken, hvor der kun er observeret få tilfælde af mixflow. I forhold til dokumentationen af vandforbrug i husstande og kvaliteten af de udførte målinger er det essentielt for boardene at kunne observere samtidige flow på begge flowmålere, da der ellers vil opstå manglende data for forbruget af enten koldt eller varmt brugsvand og dermed unøjagtigheder i det samlede målte forbrug af koldt og varmt brugsvand. Derfor kontrolleres det, at alle boards kan registrere mixflow.

C.1.1 Forsøgsopstilling

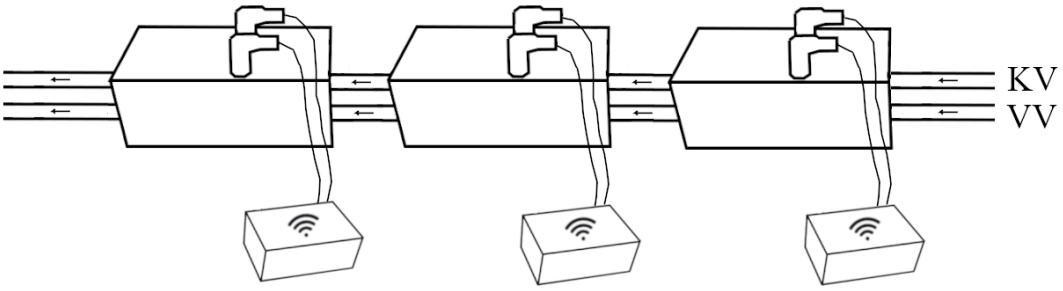
Normalvist skal alle flowmålerne sidde i parallelforbindelse, således den ene måler er tilkoblet varmtvandsledningen og den anden koldtvandsledningen. Idet kontrollen af mixflow er gennemført i forlængelse af kalibreringen beskrevet i Appendix A, er alle flowmålere først koblet sammen i serieforbindelse, hvorfor det er uden betydning, om der tappes koldt eller varmt vand. Efterfølgende kobles alle flowmålerne sammen i parallelforbindelse for at undersøge fire forskellige scenarier for mixflow.

Nedenfor er listet det anvendte udstyr til kontroltesten, mens en forsøgsopstilling er vist på Figur C.1 og Figur C.2

- Computer med adgang til server, hvor data uploades
- Slanger tilsluttet hhv. koldt- og varmtvandsledning
- T-stykke til slangerne
- 34 stk. Huba Flow Sensor 236



Figur C.1: Forsøgsopstilling for kontrol af mixflow. Alle flowmålere er serieforbundet.



Figur C.2: Forsøgsopstilling for kontrol af mixflow. Alle flowmålere er parallelforbundet.

C.1.2 Metode

For at kontrollere at hver flowmåler kan registrere mixflow, kobles de alle først i serieforbindelse og dernæst i parallelforbindelse som vist på Figur C.1 og Figur C.2. Efterfølgende sikres det, at alle boards er tilsluttet strøm og har internetforbindelse, således de uploader data til serveren.

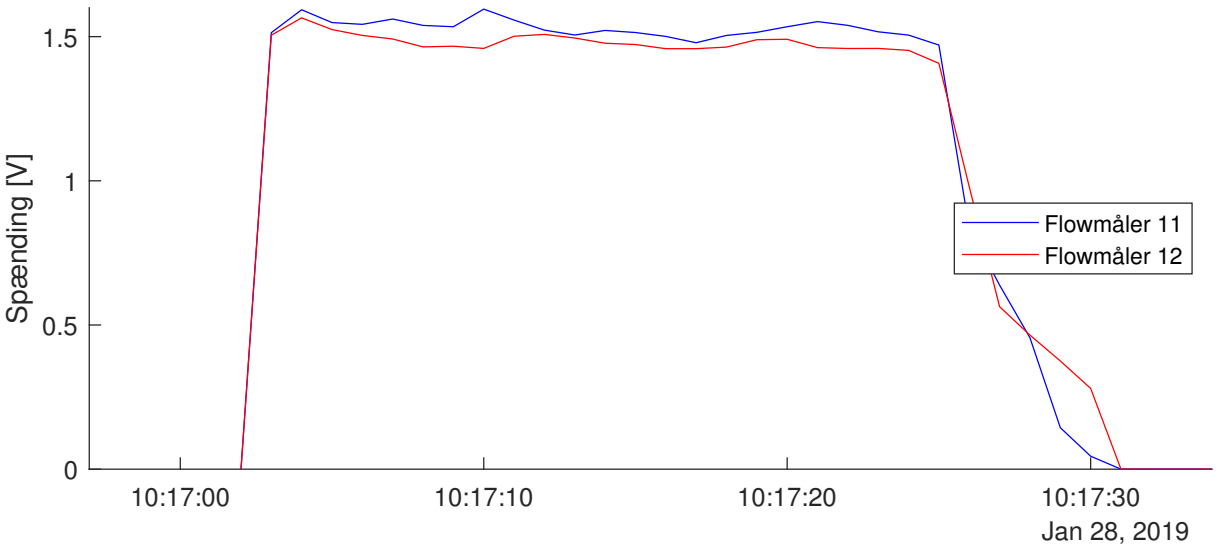
Ved kontrollen undersøges flowmålernes evne til at registrere mixflow ved en serieforbindelse med tilfældigt flow. Efterfølgende undersøges for en parallelforbindelse fire forskellige scenarier for mixflow, alle listet nedenfor. De forskellige scenarier undersøges for at sikre, at alle flowmålerne evner at registrere mixflow opstået på forskellig vis og derved ikke har nogle begrænsninger.

- Mixflow ved åbning af både koldt og varmt vand samtidigt
- Mixflow ved først at åbne for koldt vand og efterfølgende for varmt vand
- Mixflow ved først at åbne for varmt vand og efterfølgende for koldt vand
- Mixflow ved en overgang fra koldt vand og til varmt vand og omvendt

C.1.3 Resultater

I dette afsnit præsenteres resultater for kontrollen af mixflow for serieforbindelse. Idet alle flowmålere har undergået de samme senarier for mixflow, præsenteres resultater kun for ét scenario og kun for to flowmålere (et board).

På Figur C.3 er resultatet for mixflow vist for flowmåler 11 og flowmåler 12.



Figur C.3: Resultat af kontroltest af mixflow for flowmåler 11 og flowmåler 12.

Som vist på Figur C.3 registreres et flow på både flowmåler 11 og flowmåler 12 samtidigt. Det samme var tilfældet med temperaturen, der også blev registreret på begge flowmålere. En tilsvarende databehandling er foretaget for de resterende boards, hvor alle flowmålere er testet for de samme scenarier for både serie- og parallelforbindelse, og her er konklusionen den samme. Det kan dermed konkluderes, at alle flowmålere kan registrere mixflow.

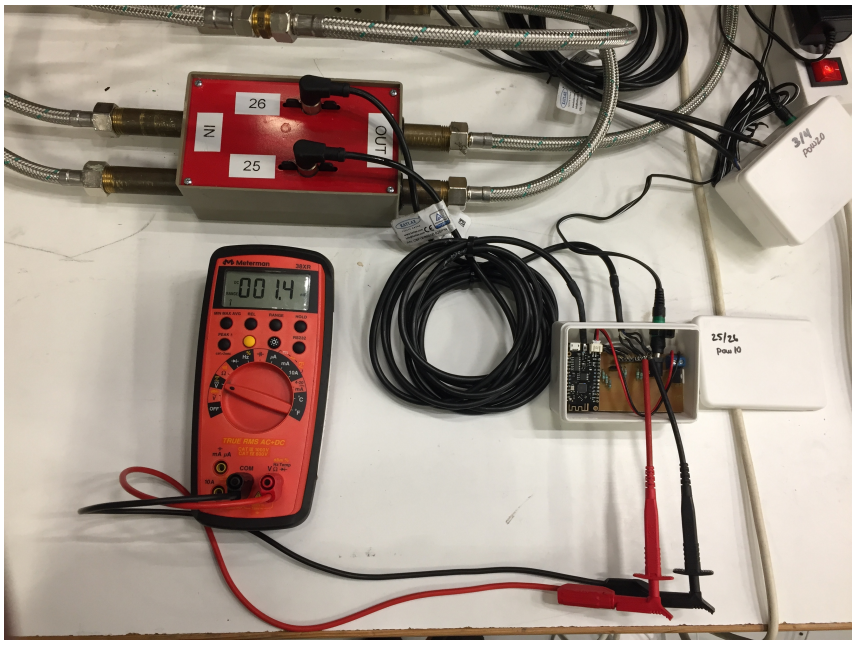
C.2 Kontrol af lav spænding/flow

En anden usikkerhed, der er opstået undervejs, er flowmålernes evne til at registrere spændinger lavere end 0,7V, svarende til flows omkring 2,2 L/min. Jf. produktkataloget for Huba flowmålerne skal den anvendte type kunne registrere flows ned til 1,8 L/min, svarende til en spænding på 0,56V, men ud fra databehandlingen for Kærhavebakken er der ikke registreret nævneværdige flows med en spænding lavere end 0,7V, hverken konstant for en hel tapning eller undervejs i en tapning. Selvom en spænding kun på 0,7V svarer til et flow på ca. 2,2 L/min, hvorfor der er tale om et meget lavt flow, skal flowmålerne kunne registrere disse, således det sikres, at alt forbrug af koldt og varmt brugsvand inden for flowmålernes måleområde bliver opfanget.

Der rettes derfor opmærksomhed mod følsomheden for flowmålerne. Her er alle flowmålere programmeret til først at registrere spændinger, der ligger over en forudindstillet værdi, således baggrundsstøjen fra flowmålerne negligeres og ikke fremgår af data. Den forudindstillede værdi er sat til 0,1V, hvorfor spændinger lavere end 0,7V bør registreres af flowmålerne. Derfor undersøges først baggrundsstøjen for alle flowmålere for at sikre, at denne er lavere end 0,1V. Efterfølgende undersøges alle flowmålernes evne til at registrere små flows.

C.2.1 Forsøgsopstilling

Kontrollen foretages mens alle flowmålere er sat i serieforbindelse, se Figur C.1. Til kontrol af baggrundsstøjen anvendes et multimeter, der tilsluttes hver enkelt måler som vist på Figur C.4.



Figur C.4: Forsøgsopstilling for kontrol af lave spændinger, hvor et multimeter er tilsluttet en flowmåler.

Nedenfor er listet det anvendte udstyr til kontrollen af lave spændinger:

- Computer med adgang til server, hvor data uploades
- Slanger tilsluttet hhv. koldt- og varmtvandsledning
- Huba flow sensor 236
- Wavetek Meterman 38XR Digital Multimeter med kabler

C.2.2 Metode

For at teste hvorvidt flowmålerne kan registrere lave spændinger, kontrolleres først baggrundsstøjen for flowmålerne. Her skal det sikres, at denne ikke overskrider den forudindstillede værdi på 0,1V. Dette testes ved brug af et digitalt multimeter, der måler spændingen. Ved at tilslutte multimeteret hver enkelt board tilhørende en flowmåler, som vist på Figur C.4, kan baggrundsstøjen registreres for både flow- og temperaturmålere. Kontrollen foretages uden flow gennem flowmålerne.

Dernæst kontrolleres alle flowmålernes evne til at registrere små spændinger. Igen sikres det først, at alle flowmålere er tilsluttet strøm, har internetforbindelse og uploader data til serveren. Under kontrollen er alle flowmålere serieforbundet som vist på Figur C.1, og der er gjort brug følgende fremgangsmåde:

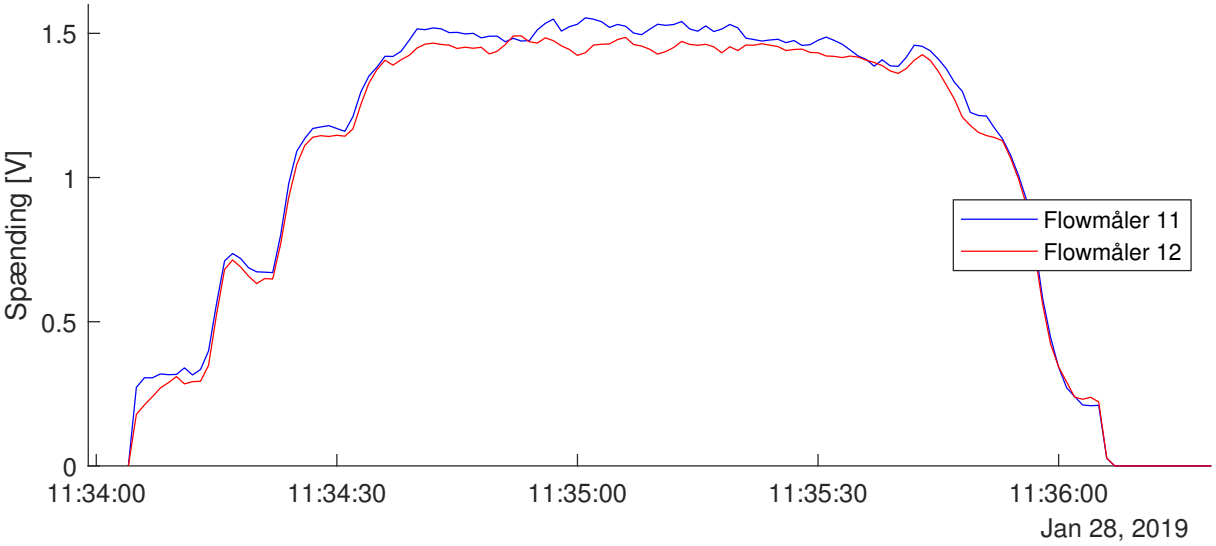
- Varighed af test: 2 minutter
- Der åbnes gradvist for vandet ved brug af ventilen
- Ventilerne reguleres hvert 10. sekund
- Efter 1 min. er ventilen fuldt åbent, hvorefter der lukkes ved brug af samme fremgangsmåde

C.2.3 Resultater

Resultaterne for kontroltesten af lave spændinger præsenteres i det følgende afsnit. Idet alle flowmålere har undergået de samme tests for begge kontrol, præsenteres kun resultater for én

flowmåler.

Først blev baggrundsstøjen for alle flowmålere undersøgt ved brug af et digitalt multimeter. Som det fremgår af Figur C.4, er baggrundsstøjen for flowmåleren målt til 1,4mV for den ene måler. Resultater var tilsvarende på både den anden måler og de resterende flowmålere. Derfor konkluderes det, at baggrundsstøjen er lavere end de 0,1V, hvorfor forudindstillingen for følsomheden er fastsat korrekt under hensyntagen til dette. Resultatet for testen af lave spændinger er vist på Figur C.5 for flowmåler 11 og flowmåler 12.



Figur C.5: Resultat af kontroltest for lave spændinger, hvor flowmåler 11 og flowmåler 12 begge registrerer spændinger lavere end 0,7V.

Af Figur C.5 fremgår det, at flowmålerne har registreret spændinger lavere end 0,7V, både i starten af forsøget, hvor flowet gradvist øges, og igen i slutningen, hvor flowet reduceres igen. Den samme databehandling er foretaget for de resterende målere, og samme konklusion kan igen drages. Alle flowmålere kan derved registrere flows lavere end 0,8V. Forklaringen i manglen på lave spændinger ved Kærhavebakken skal derved findes i, at der kun i meget få tilfælde forekommer så lave flows ved en tapning.

C.3 Kontrol af gentagende flow efter 30 sekunder

Det sidste kontroltjek omhandler en usikkerhed omkring gentagende flow. Idet boardene alle er programmeret til at uploade data til serveren 30 sek. efter en tapning er ophørt, er der opstået en usikkerhed om, hvorvidt de registrerer en tapning, der starter 30 sek. efter ophøret af en tidligere tapning, da boardene begynder at uploade data på det tidspunkt. Det er essentielt for målinger af vandforbruget, at boardene kan registrere gentagende flows med 30 sek. mellemrum, således større mængder af data ikke går tabt, eksempelvis ved to gentagende brusebade. Derfor kontrolleres det gennem denne kontrol, at boardene kan registrere gentagende flows med 30 sek. mellemrum.

C.3.1 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen anvendt til kontroltjekket af gentagende flows er ens med den, der blev anvendt under kontrollen af mixflow, se Figur C.1. Nedenfor er listet det anvendte udstyr til

kontrollen:

- Computer med adgang til server, hvor data uploades
- Slanger tilsluttet hhv. koldt- og varmtvandsledning
- Huba flow sensor 236

C.3.2 Metode

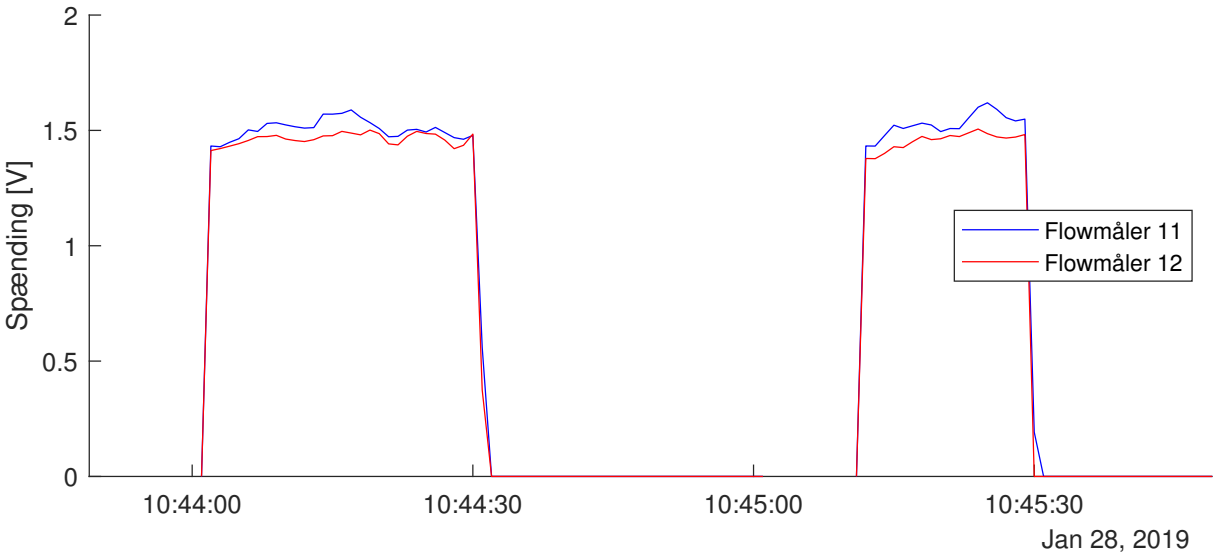
Til at teste hvorvidt boardene kan registrere to gentagende flows med 30 sek. mellemrum, er alle flowmålere sat sammen i serieforbindelse. Dernæst tilsluttes de strøm og det sikres, at flowmålerne har internetforbindelse og uploader data til serveren.

Ved kontrollen af gentagende flows anvendes følgende fremgangsmåde:

- Varighed: 90 sekunder
- Der åbnes for fuldt mixflow i 30 sek.
- Der lukkes for vandet og venter 30 sek.
- Der åbnes igen for fuldt mixflow i 30 sek. og lukkes efterfølgende

C.3.3 Resultater

Nedenfor præsenteres resultaterne for kontroltjekket af to gentagende flows. Igen er alle flowmålere testet på samme måde, hvorfor der kun præsenteres resultater for to flowmålere. Figur C.6 er resultatet for testen af to gentagende flows vist for flowmåler 11 og flowmåler 12.



Figur C.6: Resultat af kontroltest af to gentagende flows for flowmåler 11 og flowmåler 12, hvor de begge har registreret to flows, dog med manglende data for den anden tapning.

Af Figur C.6 fremgår det, at den første tapning ved kontrollen blev startet kl. 10:44:00, hvorefter tapningen stod på i 30 sek. Kl. 10:44:30 lukkes der for vandet, og der går efterfølgende 30 sek., før flowmålerne begynder at uploade dataene til serveren (kl. 10.45:00). I samme sekund startes den anden tapning, og denne stoppes igen efter 30 sek. (10:45:00). Dataene for den anden tapning viser dog først en starttid omkring kl. 10:45:10, hvorfor der mangler data for de første ca. 10 sek. af tapningen.

I perioden på ca. 10 sek., hvor flowmålerne ikke har registreret nogle data, er boardet i gang med at uploade data til serveren, og siden boardet kun har én processor, kan der derfor ikke udføres to handlinger på én gang. Samme resultat gør sig gældende for de resterende flowmålere, efter at have foretaget en tilsvarende databehandling.

Det kan dermed konkluderes, at flowmålerne ikke kan registrere starten på en tapning, der påbegyndes 30 sekunder efter ophøret af en forrig tapning. Dog registrerer den enkelte flowmåler den efterfølgende tapning, når den er færdig med at uploade dataene fra den forrige tapning. Under kontrollen er det observeret, at upload af data tager ca. 10 sek., dog med forbehold for mængden på data fra den forrige tapning, hvorfor der kun vil gå ca. 10 sek. data tabt.

Da denne kontroltest først er foretaget efter målingerne ved Kærhavebakken, kan der derfor forekomme enkelte tilfælde med manglende data for de første sekunder af en tapning, der finder sted netop 30 sek. efter ophøret af en forrig tapning.

Som konsekvens af det konstaterede problem er opsætningen for boards'ne til flowmålerne ændret inden måleperioden på Kildebjerg Søvej. Her er det valgt, at der i stedet skal gå 5 min. fra ophøret af en tapning inden der uploades data til serveren. Dertil er der indlagt en kontrol, hvor boards'ne for hvert 15. minut tjekker, om der er data, der endnu ikke er blevet uploadet til serveren. Dette gøres uafhængigt af tapninger hele døgnet rundt.

Ændringerne i opsætningen er foretaget for at minimere risikoen for to gentagende tapninger med 30 sekunders mellemrum, hvorfor data måtte gå tabt. Her er det vurderet, at risikoen er mindre ved en opsætning på 5 min. Det skal dog noteres, at ændringen i opsætningen ikke er en løsning på problemet. Ønskes problemet helt løst kræves i stedet nye boards med mindst to processorer, således der kan foretages to processer på en gang.

Analyse af brusere ved Kærhavebakken D

I dette appendiks redegøres for databehandlingen af målingerne af flow og temperatur for bruserne ved Kærhavebakken. I modsætning til de resterende tapsteder var flowmålerne på bruserne installeret efter blandingsbatteriet, hvorfor spændingsoutputtet blev logget som et mix af koldt og varmt vand. Til fremadrettet analyse, hvor der er særligt fokus på varmtvandsforbruget, ønskes derfor et tappe- og temperaturprofil for hhv. koldt og varmt vand for alle tapninger på bruserne. I de følgende afsnit redegøres for, hvordan mixflowet og mixtemperaturen ved tapstedet er benyttet sammen med det målte data i teknikrummet til at generere nye tappe- og temperaturprofiler af både koldt og varmt vand for alle bade.

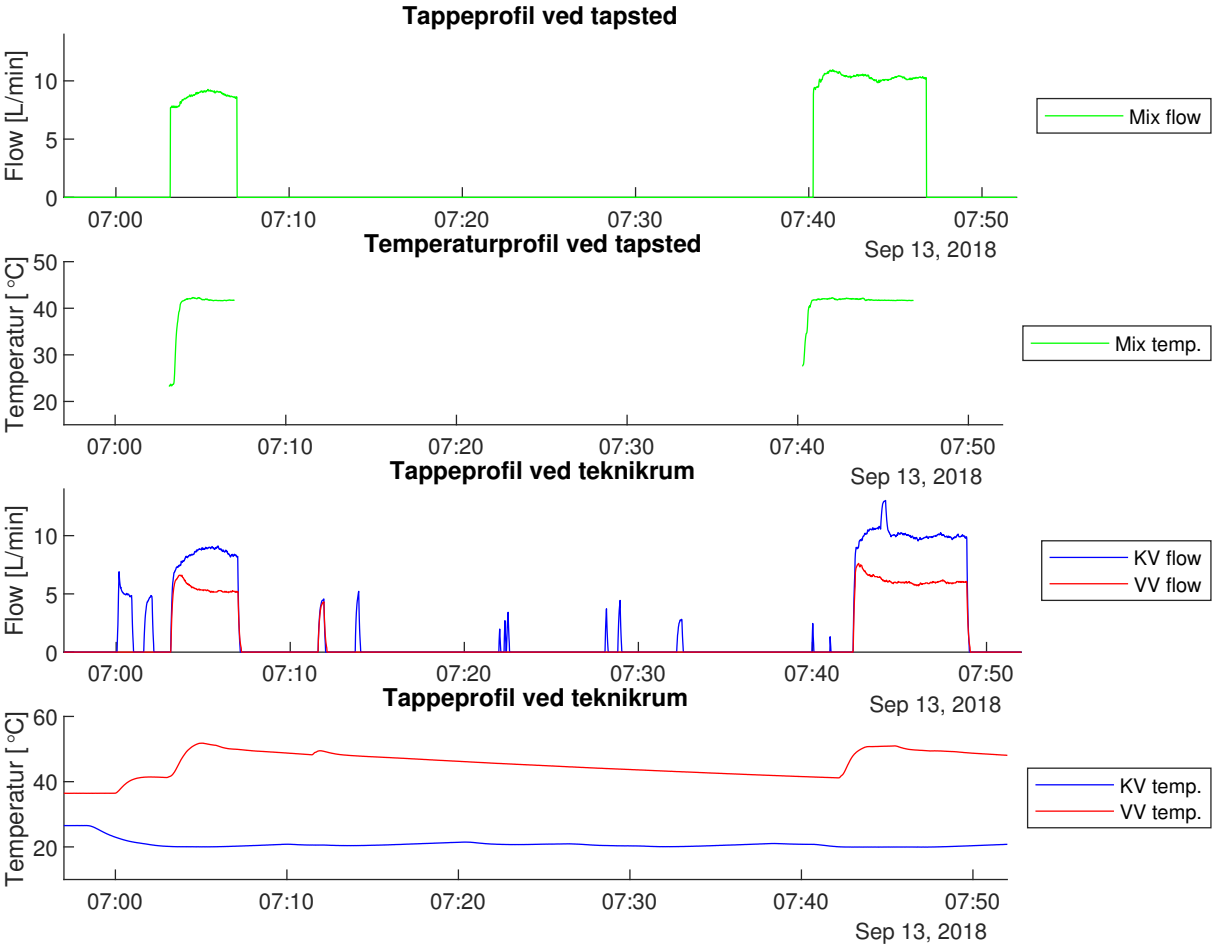
D.1 Oprindelige tappe- og temperaturprofiler

Til undersøgelsen af forholdet mellem det varme og kolde vand ved tapstedet tages der udgangspunkt i de oprindelige tappe- og temperaturprofiler. Ved undersøgelse af tappe- og temperaturprofilerne i teknikrummet, logget med KATflows'ne, er det muligt at bestemme forholdet mellem koldt og varmt vand ved tapstedet. Første step i analysen er derfor at undersøge, hvordan flow og temperatur i teknikrummet stemmer overens med målte mixflows og mixtemperaturer ved tapstedet. Grundet udfordringer med KATflows'ne til målinger i teknikrummet blev der kun registreret tilstrækkeligt data d.13/09, hvorfor denne dag er valgt til analysen. På Figur D.1 fremgår det oprindelige tappe- og temperaturprofil ved tapsted og teknikrum for d.13/09.

Af Figur D.1 fremgår det, at tappe- og temperaturprofilet i teknikrummet tidsmæssigt kun stemmer overens med tapstedet for det første bad kl. 07:03, mens det for det andet bad kl. 07:40 ligger forskudt. Det skyldes, at tiden på KATflows'ne skrider og selvom dataet allerede i dette tilfælde er forskudt, så det passer med det første bad, skrider tiden på KATflows'ne så meget, at det allerede er forskudt igen ved andet bad ca. 35 min. senere. I dette appendiks tages der ikke yderligere højde for forskydelsen af dataet for KATflows'ne, da dette er uden betydning for analysen af koldt-varmtvandsforholdet ved badene. I stedet redegøres der for forskydelsen i Appendiks E, hvor en beskrivelse af den videre håndtering af KATflow data også følger.

På trods af forskydelsen af KATflow data fremgår det af Figur D.1, at det totale koldtvandsforbrug i teknikrummet stemmer overens med det målte mixflow ved tapstedet, idet der måles ca. 9-10 L/min ved begge bade. En enkelt udtagelse er registret omkring kl. 07:43. Her opstår der et peak af koldtvandsforbruget i teknikrummet, hvilket skyldes en tapning på et af de andre tapsteder i boligen. Idet det er det totale koldtvandsforbrug, der logges i teknikrummet, vil alle koldtvandstapninger i boligen, heriblandt toiletskyl, blive registreret og dermed fremgå på tappeprofilet for teknikrummet. I teknikrummet måles ligeledes på forbruget af varmt brugsvand,

dvs. vandforbruget efter veksleren, der er identisk med forbruget af varmt vand ved tapstederne. For de to bade d.13/09 indikerer varmtvandsforbruget i teknikrummet, at der benyttes en større mængde varmt vand i starten af badene, hvor temperaturen ligeledes stiger, før der mixes koldt vand i tapningen og forholdet mellem koldt og varmt vand stabiliseres.



Figur D.1: Oprindeligt tappe- og temperaturprofil ved hhv. tapsted og teknikrum for d.13/09.

Havde målinger af koldt- og varmtvandsforbruget i teknikrummet været stabile over hele måleperioden kunne flowet benyttes til at dokumentere forholdet mellem koldt og varmt vand ved tapstedet. Da målingerne i teknikrummet kun er tilstrækkelige d.13/09, idet der haves målinger af flow og temperatur for både koldt og varmt vand, benyttes temperaturprofilet i teknikrummet for den udvalgte dag til at bestemme forholdet af koldt og varmt vand ved bruserne. I det følgende afsnit dokumenteres, hvordan det oprindelige temperaturprofil i teknikrummet benyttes til beregning af koldt-varmtvandsforholdet for alle badene over hele måleperioden.

D.2 Nyt temperaturprofil i teknikrum

Til at beregne kold-varmtvandsforholdet for alle badene henover hele måleperioden benyttes temperaturprofilet fra teknikrummet d.13/09 til at generere et nyt temperaturprofil, der afspejler temperaturen af det kolde og varme vand i teknikrummet, hver gang et bad finder sted. Det nye temperaturprofil genereres ved at sammensætte flere funktioner, der tilsammen afspejler forholdene d.13/09, således temperaturforløbet efterfølgende kan opskaleres til at passe på alle bade henover hele måleperioden.

Baseret på det oprindelige temperaturprofil for det varme vand i teknikrummet genereres det nye temperaturprofil. Dette er sammensat af i alt fire funktioner, der beskriver følgende fire forløb:

- En temperaturstigning fra badets start til en maksimal temperatur på 52°C opnås
- Et konstant temperaturforløb på 52°C indtil midtvejs i badet
- Et stejlt temperaturfald midtvejs i badet
- Et afkølingsprofil indtil næste bad finder sted eller indtil temperaturen falder til 36,5°C

På baggrund af ovenstående inddelinger af det oprindelige temperaturprofil opsættes de fire funktioner for hvert enkelt forløb. De fire funktioner er fundet gennem analyse af det oprindelige data i Excel, hvor funktionerne er bestemt ved brug af de tendenslinjer, der giver det bedste fit for hvert enkelt forløb og derved den mindste afvigelse. De fire funktioner, der benyttes til at generere det nye temperaturforløb for det varme vand, beskrives ved:

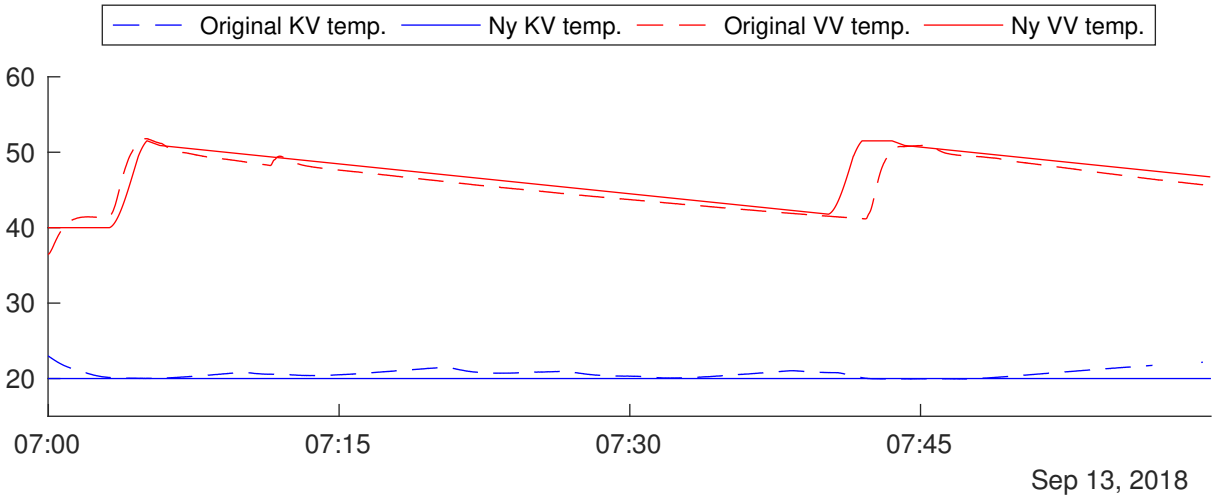
$$y1(x) = -7{,}2633 \cdot 10^{-6}\, x^3 + 0{,}0017\, x^2 + 0{,}0147\, x + 36{,}5 \tag{D.1}$$

$$y2(x) = y1(slut) = 52 \tag{D.2}$$

$$y3(x) = -0{,}0157\, x + y2(slut) \tag{D.3}$$

$$y4(x) = -0{,}0044\, x + y3(slut) \tag{D.4}$$

Ved brug af Formel (D.1) - (D.4) opnås det nye temperaturprofil for det varme vand i teknikrummet. Temperaturprofilet for det kolde vand estimeres ud fra målingerne til at være konstant for de to bade, hvorfor temperaturprofilet fastlægges med en konstant værdi på 20°C. På Figur D.2 fremgår det oprindelige og det nye temperaturprofil i teknikrummet for hhv. koldt og varmt vand d.13/09.



Figur D.2: Oprindeligt og nyt temperaturprofil i teknikrum for hhv. koldt og varmt vand.

Af Figur D.2 fremgår det, at det nye temperaturprofil for både koldt og varmt vand følger det oprindelige temperaturprofils forløb for begge bade og at der samtidig er taget højde for den tidligere nævnte tidsforskydelse på KATflows'ne. Det nye temperaturprofil er styret af, hvornår der er flow ved tapstedet, hvorfor varmtvandstemperaturen stiger ved badets begyndelse. Selvom temperaturprofilet passer i ovenstående tilfælde ligger der forsat en usikkerhed i fremgangsmåden, da der ikke tages højde for eventuelle tapninger før badet. I det udvalgte eksempel for d.13/09 starter varmtvandstemperaturen ved 40°C grundet to varmtvandstapninger

umiddelbart før selve badet, hvorfor varmeveksleren i teknikrummet allerede er varm. Idet badene ofte falder tidligt og før andre varmtvandstapninger ses der bort fra denne usikkerhed og i stedet antages, at varmtvandstemperaturen i teknikrummet altid falder til 36,5°C. Ved opskalering af temperaturprofilet for det varme vand henover hele måleperioden betyder det, at begyndelsestemperaturen for det første bad hver dag er 36,5°C og at temperaturen for det andet bad er styret af varigheden mellem de to bade.

D.3 Nyt tappe- og temperaturprofil ved tapsted

Formålet med det nye temperaturprofil i teknikrummet er at udregne flowet og temperaturforløbet for hhv. koldt og varmt vand i alle badene henover hele måleperioden. Gennem en opskalering af det nye temperaturprofil i teknikrummet for både koldt og varmt vand over hele måleperioden fastlægges først koldt-varmtvandsforholdet ud fra nedenstående to ligninger. Når forholdet mellem koldt og varmt vand er fastlagt kan temperaturerne for det kolde og varme vand ved tapstederne til sidst beregnes. De to ligninger, der løses for hhv. koldt- og varmtvandsflowet, er:

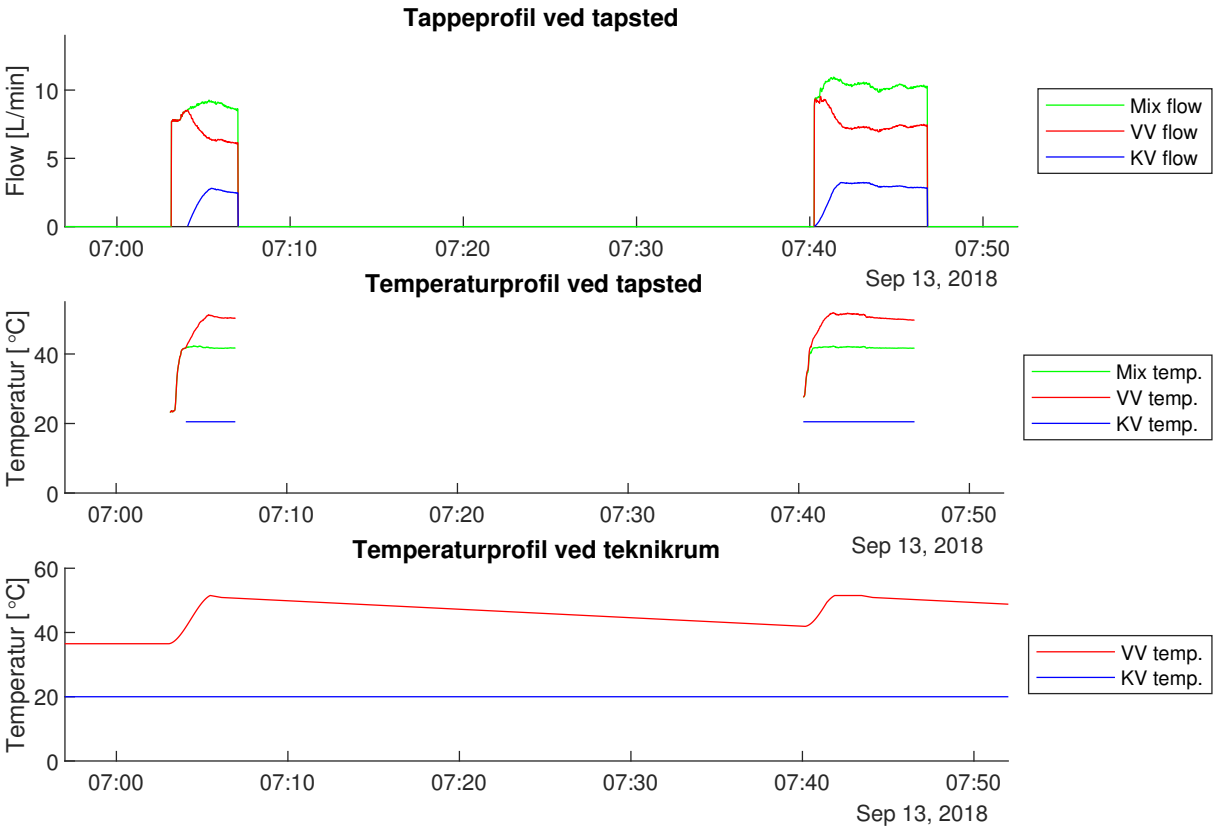
$$m_{mix} = m_{KV} + m_{VV} \tag{D.5}$$

$$t_{mix} = \frac{m_{KV} \cdot c_{p,KV} \cdot t_{KV} + m_{VV} \cdot c_{p,VV} \cdot t_{VV}}{m_{KV} \cdot c_{p,KV} + m_{VV} \cdot c_{p,VV}} \tag{D.6}$$

m	Masse	[kg]
c_p	Specifik varmekapacitet	[kJ/kg °C]
t	Temperatur	[°C]

For ligning (D.5) og ligning (D.6) løses der for de to ubekendte variable, masseflowet for hhv. koldt og varmt vand, $\dot{m}_{KV}$ og $\dot{m}_{VV}$. De to ligninger løses hver gang et bad finder sted, således flowet af både koldt og varmt vand beregnes på sekundbasis henover hele måleperioden.

Til beregning af temperaturprofilet ved tapstedet antages, at koldtvandstemperaturen, t_{KV}, er konstant på 20°C, idet temperaturen i teknikrummet er konstant. Dertil forudsættes det, at der ingen varmeudveksling sker fra teknikrum til tapsted, hvorfor det varme vand ved tapstedet når samme makstemperatur som i teknikrummet. Når flowet af både koldt og varmt vand samt koldtvandstemperaturen ved tapstederne er kendt, beregnes varmtvandstemperaturen ved at isolere t_{VV} i ligning (D.6). Herved kan temperaturprofilet ved tapstedet også beregnes over hele måleperioden for alle badene. På Figur D.3 er vist et eksempel på, hvordan det nye tappe- og temperaturprofil ser ud ved tapstedet for d. 13/09, beregnet på baggrund af det nye temperaturprofil i teknikrummet.



Figur D.3: Nyt tappe- og temperaturprofil ved tapsted, beregnet ved brug af det nye temperaturprofil i teknikrummet.

Som det fremgår af Figur D.3, er koldt-varmtvandsforholdet for både flow og temperatur beregnet ved tapstedet for begge bade. Grundet usikkerheden om, hvorvidt der forekommer varmtvandstapninger før det første bad, tvinges varmtvandsflowet til at følge mixflowet indtil der blandes koldt vand i. Dette afspejles derfor også i nogle af temperaturprofilerne, hvor varmtvandstemperaturen følger mixtemperaturen i længere tid end den reelt burde. Dette er også tilfældet for det første bad d. 13/09 kl. 07:03. Som beskrevet tidligere finder der to varmtvandstapninger sted før det første bad, hvorfor varmtvandstemperaturen ikke stemmer overens med udgangspunktet for temperaturen i teknikrummet på 36,5°C. Det betyder, at temperaturen af det varme vand i enkelte tilfælde flader ud, når den rammer mixtemperaturen før den stiger igen kort tid efter. Dette sker ikke ved det andet bad, idet det varme vand ved tapstedet allerede er varmt ved badets begyndelse, hvorfor der blandes koldt vand i fra badets start. Havde der ikke fundet en varmtvandstapning sted på et af de andre tapsteder før det første bad ville varmtvandstemperaturen have fulgt et mere nøjagtigt temperaturforløb, som tilfældet er det ved det andet bad. Idet det nye temperaturprofil i teknikrummet kun er styret af, hvornår der er tapninger på bruserne, vil der fortsat ligge en usikkerhed i tappe- og temperaturprofilet for tapstedet. Skulle denne usikkerhed være undgået, skulle temperaturprofilet i teknikrummet være baseret på alle tapninger på alle de målte tapsteder, hvilket havde gjort beregningsgangen for temperaturprofilet i teknikrummet mere kompleks. Da formålet med denne analyse er at undersøge forbruget af koldt og varmt vand på bruserne, ses der bort fra usikkerheden om, hvorvidt der er varmtvandstapninger fra andre tapsteder før badene.

Håndtering af KATflow data E

Der er gennem projektet benyttet KATflow ultralyd flowmålere til måling af både koldt og varmt brugsvand samt fjernvarme i to boliger. KATflows'ne måler både flow og temperaturer, således den enkelte boligs samlede brugsvands- og fjernvarmeforbrug kan dokumenteres. Derved er det muligt efterfølgende at fastlægge energiforbruget og effektiviteten af det samlede brugsvandsssystem. I måleperioderne hos Kærhavebakken og Petersborgvej er der for KATflows'ne opstået en række problemer, der har haft betydning for både mængden og kvaliteten af det loggede data. Derfor redegøres der i dette appendiks for, hvordan problemerne med det loggede data fra KATflows'ne efter hver måleperiode er blevet bearbejdet og fejlene udbedret.

E.1 Kærhavebakken

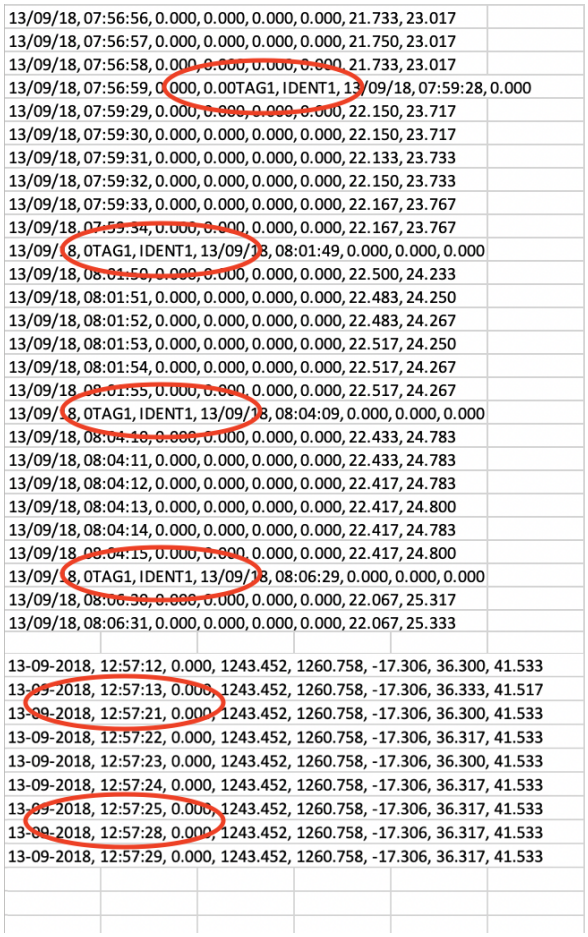
Måleperioden på Kærhavebakken stod på fra d. 10/09-2018 - 22/10-2018. Her var tre KATflows monteret i teknikrummet og registrerede hhv. det samlede vandforbrug, varmtvandsforbrug og fjernvarmeforbrug i husstanden. For alle KATflows opstod der undervejs i måleperioden tekniske problemer, hvilket forårsagede perioder med delvist eller helt manglende data. De tekniske problemer med KATflows'ne blev løst undervejs, men som konsekvens af disse var det nødvendigt at gennemgå det målte data og foretage udbedringer af disse, således dataene blev brugbare til efterfølgende databehandling. Nedenfor beskrives tre af de mest fremtrædende fejl, der opstod med dataene, og hvordan de hver især blev løst.

E.1.1 Fejl i logfiler

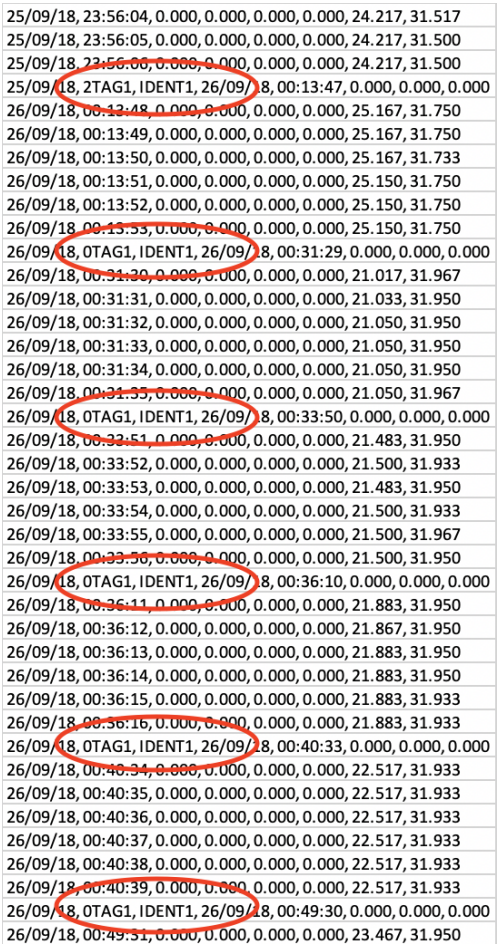
Alle KATflows er tilkoblet et board, kaldet en Raspberry, der uploader det målte data til en online server, hvorfra det efterfølgende kan tilgås. Hver Raspberry er bygget op omkring et script, der samler det registrerede data fra KATflow'en og genererer en logfil for hver dag. I løbet af måleperioden for Kærhavebakken blev der dog konstateret flere fejl i dette script, hvilket resulterede i fejl i logfilerne med de registrerede data. På Figur E.1 og Figur E.2 er vist tre eksempler på fejl registreret i logfilerne.

Øverst på Figur E.1 er vist et eksempel på to fejlkoder fra KATflow 1. Her erstattes det registrerede data af teksterne "TAG1"og "IDENT1", og efterfølgende mangler der data for ca. 2 min. Samme type fejl er opstået gentagende gange i løbet af måleperioden for KATflow 1, og på trods af gentagende forsøg blev der først fundet en løsning på problemet efter måleperiodens ophør. Derfor har det været nødvendigt at gennemgå alle logfiler, søge efter de enkelte fejlkoder, eksempelvis "TAG1"og "IDENT1", og manuelt fjerne disse rækker, før der efterfølgende kunne fyldes data ud for de manglende tidspunkter og dermed påbegynde databehandlingen. I afsnit E.1.2 nedenfor beskrives denne proces nærmere.

Nederst på Figur E.1 er vist et eksempel på en fejl i logfilen for KATflow 3. Dataene ser her korrekt



Figur E.1: Øverst et eksempel på to fejlkoder i logfilen for KATflow 1. Nederst et eksempel på en fejl i logfilen for KATflow 3.



Figur E.2: Et andet eksempel på en fejlkode i logfilen for KATflow 1.

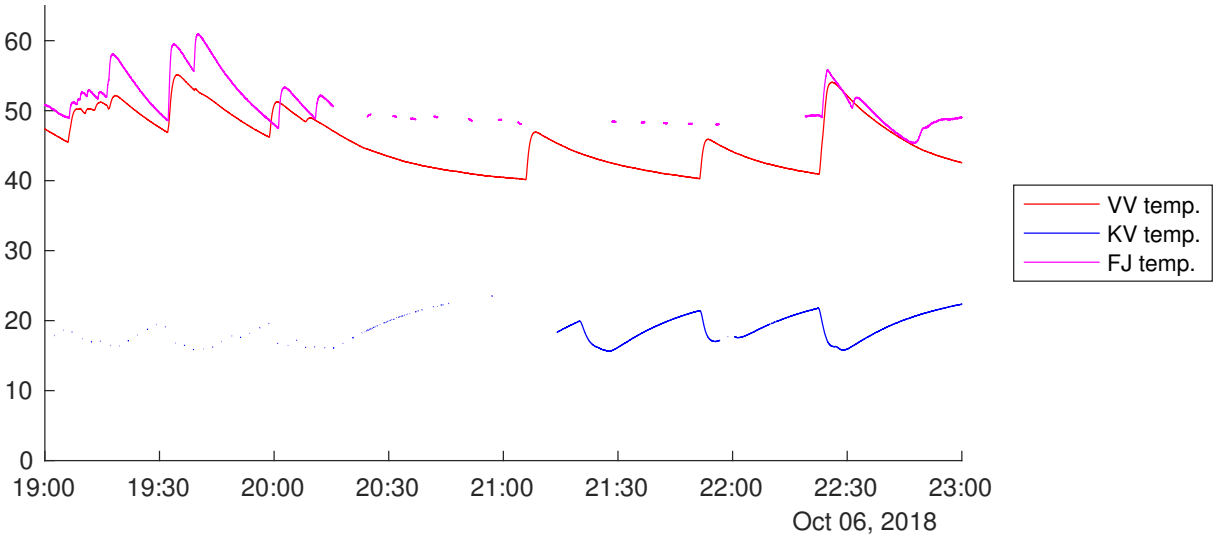
ud, men kigges der nærmere på klokkeslættet bemærkes det, at dette gentagende gange springer flere sekunder, før der igen kommer data. Dette forårsager huller i dataene, som skal fyldes ud for efterfølgende at kunne foretage databehandlingen. Dertil bemærkes det, at KATflow'en grundet en fejl stopper med at logge data fra d. 13/09-2018 kl. 12:57:59. Fejlen i scriptet bliver først fundet og løst igen den 26/09-2018, hvorefter KATflow 3 igen logger data.

På Figur E.2 er vist endnu et eksempel på en fejlkode for KATflow 1, her med et udsnit af dataene fra d. 25/09-2018 kl. 23:56:04 til 26/09-2018 kl. 00:49:31. Det er værd at bemærke, at selvom fejlkoden er ens med den vist øverst på Figur E.1, forårsager fejlen her manglende data i op til 20 min., og dataene vist på figuren dækker næsten 1 time. Igen er denne type fejl opstået gentagende gange i løbet af måleperioden, men i modsætning til fejlen vist øverst på Figur E.1, hvor der "kun"er tale om få sekunder, er der her tale om flere minutter. Derfor vil der, når hullerne fyldes ud, være en stor usikkerhed i de målte data, idet der kan have fundet tapninger sted i perioderne mellem det registrerede data.

E.1.2 Udfyld af manglende data

Efter at have gået alle logfiler fra KATflows'ne igennem for fejlkoder påbegyndes den første del af databehandlingen. Her er der, som følge af fejlene beskrevet i Afsnit E.1.1, huller flere steder

i det målte data, som skal fyldes ud. Derfor genereres først en ny tids- og NaN-matrix for hvert sekund i måleperioden. Herefter indsættes det målte data i NaN-matricen, således der for alle sekunder i måleperioden haves enten en målt værdi eller NaN, og derved ingen tidsmæssige huller. Et eksempel på dette er vist på Figur E.3.



Figur E.3: Temperaturforløb for koldt vand, varmt vand og fjernvarme med huller.

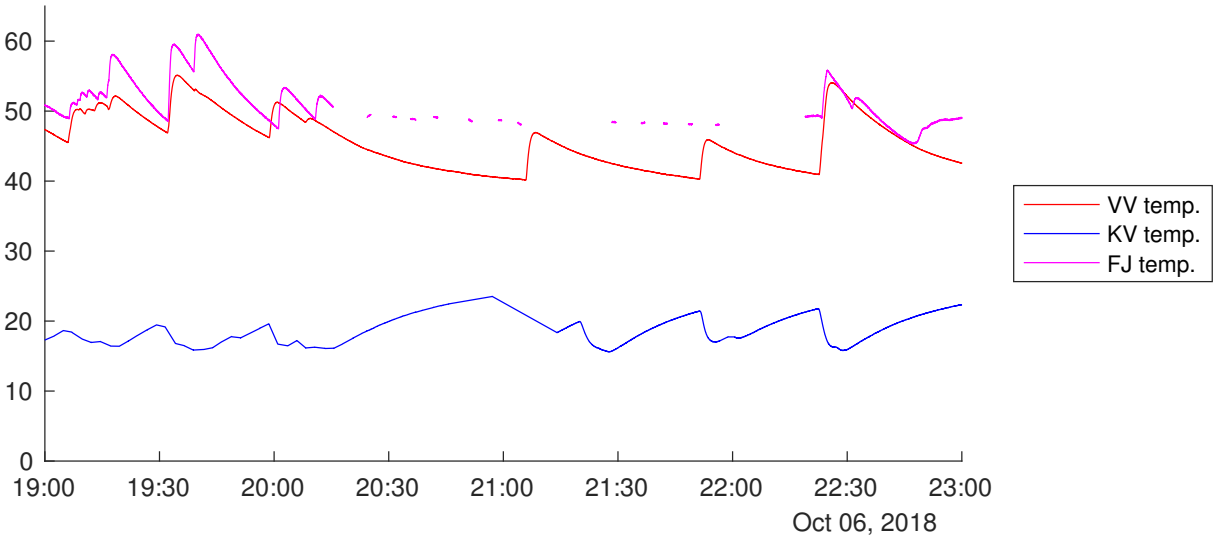
Figur E.3 viser de loggede temperaturværdier den 06. oktober for hhv. koldt vand, varmt vand og fjernvarme. Her fremgår det, at der for to af KATflows'ne er flere steder med huller og usammenhængende datapunkter.

Perioderne med manglende data for koldtvandstemperaturen er alle tilstrækkeligt små til, at disse kan udfyldes uden væsentlig usikkerhed i dataene. Dette gøres ved at opstille en lineær funktion for alle perioder med manglende data:

$$T(i+1,...,n) = a \cdot x(i) + T(i) \tag{E.1}$$

For Formel (E.1) fastlægges hældningskoefficienten, a, som hældningen mellem to loggede datapunkter, T(i) og T(n), før og efter perioden med manglende data. Ud fra værdien i det første punkt, T(i), og afstanden op til T(n), x(i), udfyldes hullerne med temperaturværdier fastlagt ud fra den lineære funktion. Derved forbindes alle punkter med hinanden og der haves sammenhængende data. På Figur E.4 er det nye, sammenhængende temperaturprofil for koldtvandstemperaturen vist.

Figur E.4 viser, hvordan hullerne i koldtvandstemperaturen er fyldt ud, således alt data er sammenhængende. Det fremgår, at der for det nye genererede data haves variationer i temperaturprofilet for det kolde vand, hvor usikkerheden vurderes at være minimal. Af figuren fremgår det også, at der fortsat er huller i fjernvarmetemperaturen. Det er her vurderet, at varigheden af perioderne med manglende data er for stor til, at der kan genereres et realistisk profil, som vil afspejle de reelle forhold. Særligt de manglende datapunkter i perioden mellem kl. 21:00 og 22:00, hvor varmtvandstemperaturen to gange stiger, medfører en for stor usikkerhed i dataene, da det ikke vil være muligt at fastlægge et korrekt forløb for fjernvarmetemperaturen. Derfor er det målte data for fjernvarmen i perioden mellem kl. 20:00 og 22:30 ikke brugbart til videre undersøgelse.



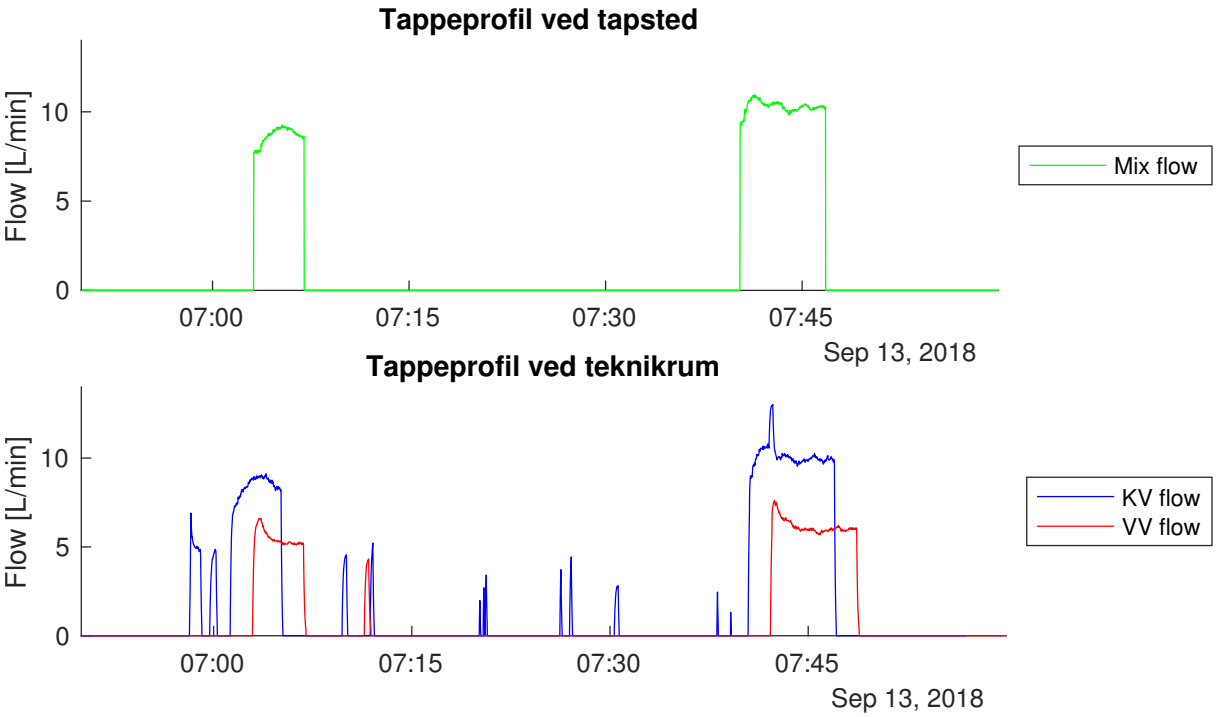
Figur E.4: Temperaturforløb for koldt vand, varmt vand og fjernvarme, her med sammenhængende data for koldtvandstemperaturen og huller i fjernvarmetemperaturen.

Dette er desværre ikke et enkeltstående tilfælde men forekommer gentagende gange gennem måleperioden. For den samlede måleperiode, med en varighed på 43 dage, haves derfor kun samlet fire hele dage med data fra alle tre KATflows på en gang. For de resterende dage er der enten helt eller delvist manglende data for det samlede vandforbrug, varmtvandsforbruget eller fjernvarmeforbruget. Dertil haves for den samlede måleperiode kun en sammenhængende dag med data fra alle flowmålere, der er monteret ved hvert tapsted i boligen, og alle tre KATflows monteret i teknikrummet.

E.1.3 Korrigering af tidsforskydelse

En anden udfordring med dataene fra hver KATflow er den indbyggede tid, som KATflow'en synkroniserer dataene med. Her er det for måleperioden konstateret, at den indbyggede tid skrider forskelligt mellem de enkelte KATflows i forhold til den reelle tid. Derfor opstår der en række udfordringer, når de målte værdier fra KATflows'ne skal sammenholdes med de målte værdier fra Huba-flowmålerne, som kører ud fra normaltiden. Et eksempel på dette er vist på Figur E.5.

På Figur E.5 er vist tappeprofilet den 13. september kl. 06:50 - 08:00 for hhv. et tapsted og for teknikrummet. Det viste tapsted er bruseren på Bad 2, hvor to badeprofiler er vist. For teknikrummet er hhv. det samlede flow og varmtvandsflowet vist, og profiler for begge bade samt andre tapninger i boligen fremgår. Udfordringen er, at KATflows'ne i teknikrummet begge logger værdier til forskellige tidspunkter, mens tapstedet logger til et tredje, korrekt tidspunkt. Dette er tydeligt illustreret på de to badeprofiler, hvor start- og sluttidspunkterne ikke stemmer overens mellem de to KATflows og flowmåleren. Forskydelserne for det første bad er vist i Tabel E.1.



Figur E.5: Tappeprofiler for hhv. tapsted og teknikrum, hvor tidsforskydelser mellem de tre målere fremgår.

Tabel E.1: Tidsforskydelse for badeprofil 1.

Måler ID	Start-tidspunkt	Slut-tidspunkt	Tappe-varighed	Tidsforskydelse ift. start
Flowmåler 3	07:03:09	07:06:59	00:03:50	-
KATflow 1 (KV)	07:01:16	07:05:15	00:03:59	- 00:01:53
KATflow 2 (VV)	07:02:57	07:06:59	00:04:02	- 00:00:12

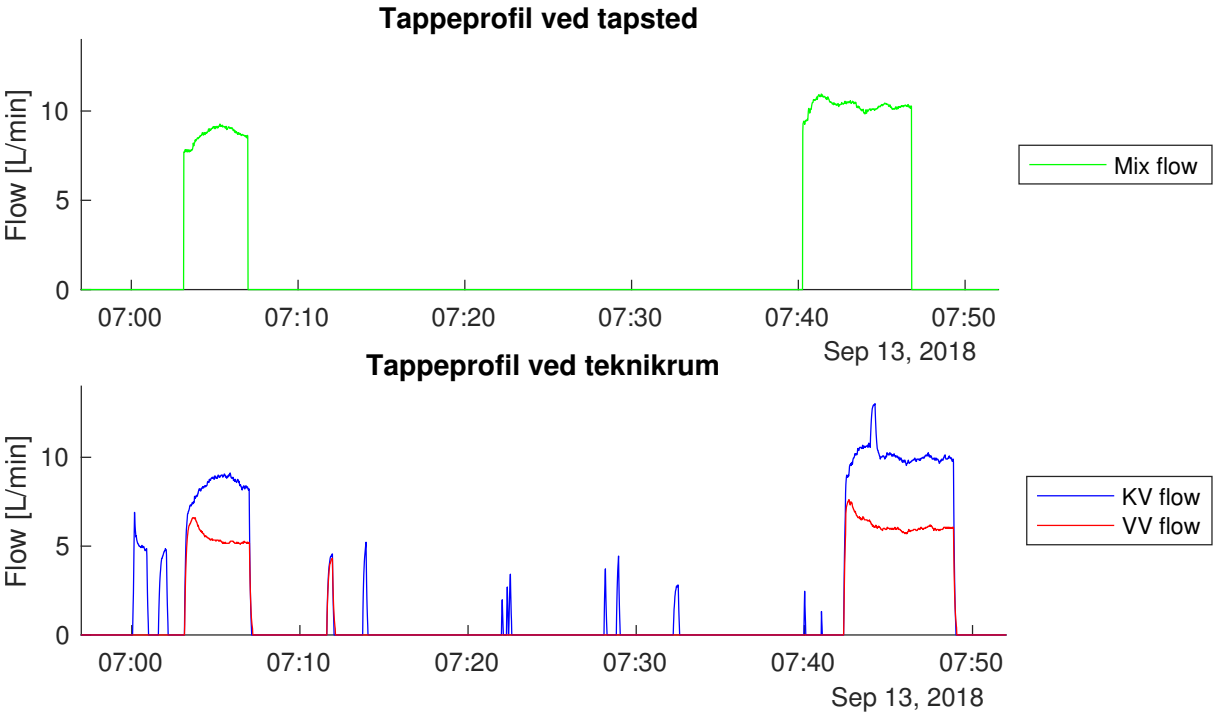
Af Tabel E.1 fremgår det tydeligt, at hverken starttidspunkter eller varigheden er den samme for de tre målere. Det reelle bad varer 3 min. og 50 sek., men begge KATflows registrerer en længere varighed. Dertil er starttidspunkterne forskudt mellem alle tre målere. Det samme er tilfældet for det andet bad, illustreret i Tabel E.2.

Tabel E.2: Tidsforskydelse for badeprofil 1.

Måler ID	Start-tidspunkt	Slut-tidspunkt	Tappe-varighed	Tidsforskydelse ift. start
Flowmåler 3	07:40:16	07:46:48	00:06:32	-
KATflow 1 (KV)	07:40:28	07:47:07	00:06:39	00:00:12
KATflow 2 (VV)	07:42:08	07:48:51	00:06:43	00:01:52

For det andet bad er konklusionen den samme, hvor begge KATflows måler for lang en varighed sammenlignet med flowmåleren mens starttidspunkterne heller ikke passer sammen. Derfor skal der korrigeres for disse forskydelser, før at dataene fra de to KATflows kan anvendes til videre databehandling.

Først korrigeres KATflow-dataene ift. det første bad. Her indsættes forskydelser på hhv. 12 sek. og 113 sek., således starttidspunkterne for alle tre målere bliver ens. Dette er vist på Figur E.6.



Figur E.6: Tappeprofiler for hhv. tapsted og teknikrum, hvor der er korrigeret for tidsforskydelserne mellem de tre målere for det første bad.

Af Figur E.6 fremgår det, at der ikke længere forekommer nogen tidsforskydelse mellem de tre målere for det første bad. Den indlagte forskydelse betyder også, at alle de efterfølgende tapninger registreret af KATflows'ne, inkl. det andet bad, nu også er synkroniseret internt.

For det andet bad er det ikke muligt at lave en ny synkronisering, idet der både forekommer tapninger mellem de to bade samt under det andet bad. En korrigering for dette vil være for omfangsrigt, hvorfor der, som beskrevet i Appendiks D, i stedet genereres et nyt temperaturprofil for koldt- og varmtvandstemperaturen for teknikrummet, som anvendes til den videre analyse af bruseprofilerne.

E.2 Petersborgvej

Måleperioden på Petersborgvej stod på fra d. 06/04-2019 - 16/04-2019. Her var to KATflows monteret i teknikrummet og registrerede varmtvandsforbruget og fjernvarmeforbruget i husstanden. Til målingerne blev de samme KATflows anvendt, som under måleperioden på Kærhavebakken. I mellem de to måleperioder blev der udviklet en ny løsning til problemet med tidssynkroniseringen, hvor KATflows'ne skulle synkronisere dataene med normaltiden og ikke den indbyggede tid. Derved skulle der ikke opstå problemer med tidsforskydelser på data registreret af KATflows'ne. Under måleperioden kunne det dog konstateres, at løsningen med den nye tidssynkronisering ikke fungerede helt som ønsket, og at der alligevel forekom problemer med det loggede data. Dette er beskrevet nærmere i det følgende afsnit, hvor der ligeledes korrigeres for problemer med forkert loggede værdier for flowet.

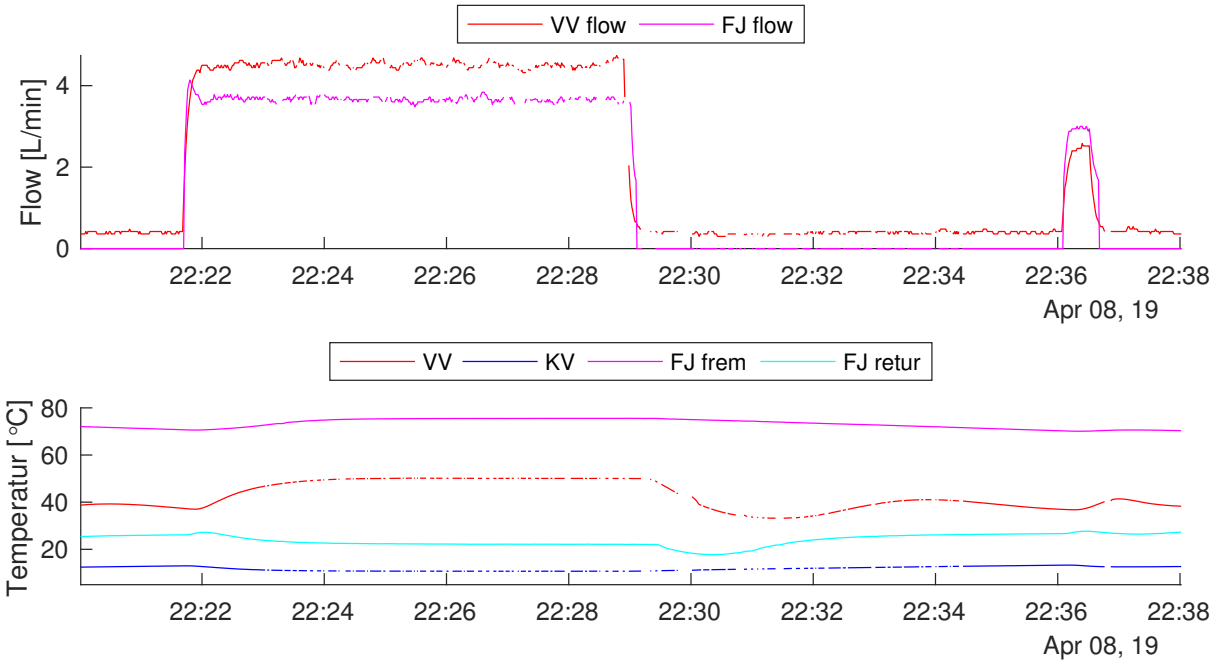
E.2.1 Udfyld og korrigering af data

I databehandlingen af det loggede data for Petersborgvej kunne det konstateres, at den nye tidssynkronisering på de to KATflows ikke fungerede problemfrit. Her opstod der flere tilfælde, hvor tiden ikke ændrede sig for hvert sekund men i stedet fastholdt det forrige sekund. Et eksempel er vist på Figur E.7.

```
08/04/19, 22:24:10, 0.076, 26095.812, 26704.665, -608.853, 46.800, 11.600
08/04/19, 22:24:11, 0.076, 26095.815, 26704.668, -608.853, 46.817, 11.600
08/04/19, 22:24:12, 0.077, 26095.818, 26704.671, -608.853, 46.833, 11.600
08/04/19, 22:24:14, 0.076, 26095.822, 26704.674, -608.853, 46.833, 11.600
08/04/19, 22:24:14, 0.076, 26095.825, 26704.677, -608.853, 46.867, 11.583
08/04/19, 22:24:15, 0.075, 26095.828, 26704.680, -608.853, 46.850, 11.600
08/04/19, 22:24:17, 0.075, 26095.831, 26704.683, -608.853, 46.883, 11.583
08/04/19, 22:24:17, 0.075, 26095.834, 26704.686, -608.853, 46.900, 11.583
08/04/19, 22:24:19, 0.075, 26095.837, 26704.689, -608.853, 46.917, 11.583
08/04/19, 22:24:19, 0.075, 26095.840, 26704.693, -608.853, 46.917, 11.567
08/04/19, 22:24:21, 0.075, 26095.843, 26704.696, -608.853, 46.917, 11.583
08/04/19, 22:24:21, 0.075, 26095.846, 26704.699, -608.853, 46.933, 11.583
08/04/19, 22:24:22, 0.075, 26095.849, 26704.702, -608.853, 46.950, 11.567
08/04/19, 22:24:23, 0.075, 26095.852, 26704.705, -608.853, 46.967, 11.567
08/04/19, 22:24:24, 0.074, 26095.855, 26704.708, -608.853, 46.983, 11.567
08/04/19, 22:24:25, 0.074, 26095.858, 26704.711, -608.853, 46.983, 11.567
08/04/19, 22:24:26, 0.073, 26095.861, 26704.714, -608.853, 47.000, 11.567
```

Figur E.7: Eksempel på problem med tidssynkronisering, hvor sekundværdien ikke ændrer sig.

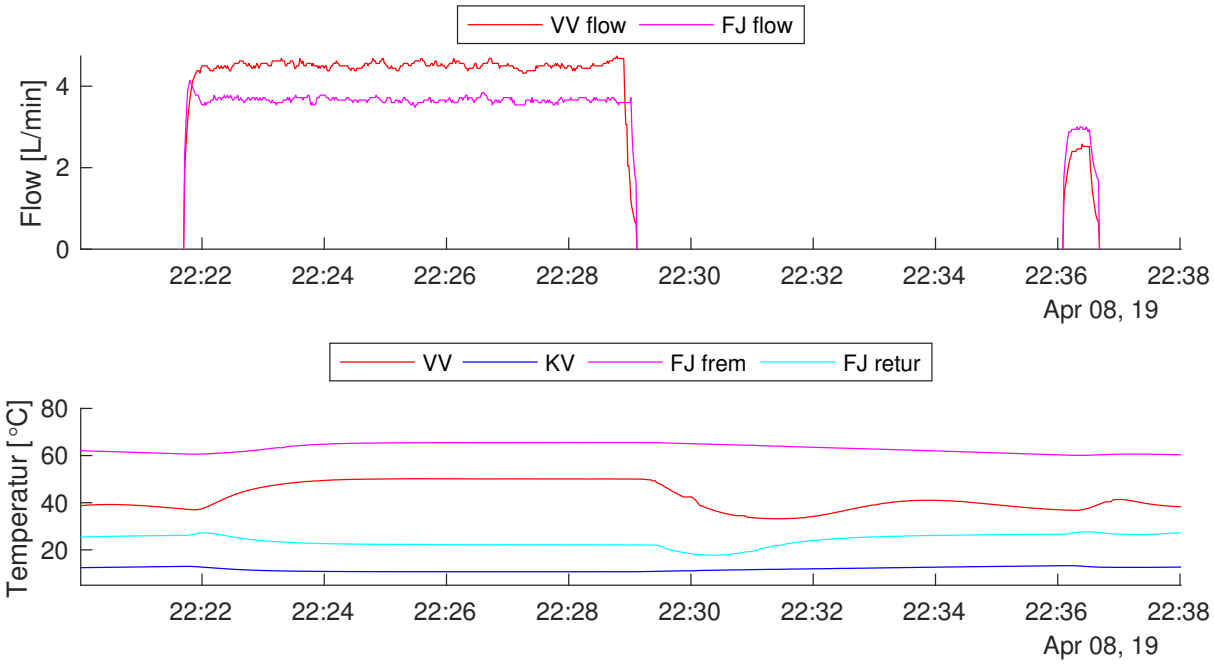
Figuren viser, at der flere gange i logfilen opstår problemer med tiden, hvorfor der logges flere værdier i det samme sekund. Når dataene efterfølgende kalibreres og klargøres til databehandlingen opstår der huller, da der ikke forekommer værdier for hvert sekund i måleperioden. Dette er illustreret på Figur E.8, hvor der er vist huller i dataene for det varme brugsvand og fjernvarmen.



Figur E.8: Eksempel på forkert logget varmtvandsforbrug samt manglende data for det varme brugsvand og fjernvarmen som følge af problemer med tidssynkroniseringen.

Figur E.8 viser flow- og temperaturprofilet for hhv. det varme brugsvand og fjernvarmen i boligen. Perioderne med manglende data forekommer med jævne mellemrum, idet problemet med tidssynkroniseringen gør, at der i enkelte sekunder mangler data. Disse huller skal derfor først fyldes ud, før der kan foretages videre databehandling af dataene. Idet varighederne af perioderne med manglende data er korte, er der ingen nævneværdig usikkerhed forbundet med at fabrikere nye data for flow og temperatur. Ved brug af samme fremgangsmåde som beskrevet i Afsnit E.1.2 for Kærhavebakken anvendes Formel (E.1) til at generere nye, sammenhængende værdier for varmt vand og fjernvarme. Resultatet er vist på Figur E.9.

Ligeledes er der gennem måleperioden observeret en fejl på den KATflow-enhed, der registrerer forbruget af varmt vand. Her logges der i perioder på over 30 min. et konstant flow på 0,4 L/min før denne senere går i 0 L/min. Dette optræder flere gange i løbet af måleperioden, bl.a. mellem de to tapninger vist på Figur E.8. Da det for hele måleperioden med sikkerhed vides, at dette ikke er tapninger af varmt brugsvand, men i stedet en fejl på KATflow'en, sorteres disse målinger også fra, således der anvendes korrekt data til den videre databehandling. Frasorteringen af varmtvandsflowet på 0,4 L/min er ligeledes vist på Figur E.9.



Figur E.9: Varmtvands- og fjernvarmeforbrug vist med sammenhængende data og frasorteret varmtvandsflow på 0,4 L/min.

Figur E.9 viser, hvordan der for samme periode nu haves et korrekt flow- og temperaturprofil for den 08. april uden huller eller fejlværdier i dataene. Ved at korrigere for dette gennem hele perioden kan dataene derfor anvendes til fastlæggelse af varmtvandsforbrug, energiforbrug og effektiviteten af varmeveksleren for Petersborgvej.

Opvaskemaskine og vaskemaskine

F

For Kærhavebakken og Kildebjerg Søvej blev der foretaget målinger af hhv. opvaskemaskinen og vaskemaskinen med det formål at dokumentere forbruget. Begge installationer er tilkoblet koldt vand, hvor der efterfølgende anvendes et eldrevet varmelegeme til opvarmning af vandet. I et forsøg på at undersøge, om der er potentiale for i fremtiden at anvende varmtvandstilslutning fremfor koldtvandstilslutning redegøres i dette appendiks for denne analyse.

F.1 Opvaskemaskine

Begge husstande har en opvaskemaskine og en vaskemaskine tilsluttet, som begge bidrager til koldtvandsforbruget og det samlede forbrug. Her er der gennem hele måleperioden ved Kærhavebakken målt på begge installationer, mens der for Kildebjerg Søvej kun er målt på opvaskemaskinen i den første uge af måleperioden. I de følgende afsnit analyseres derfor opvaskemaskinerne i de to boliger med det formålt at undersøges, om der er potentiale for i fremtiden at anvende varmtvandstilslutning fremfor koldtvandstilslutning.

F.1.1 Kærhavebakken

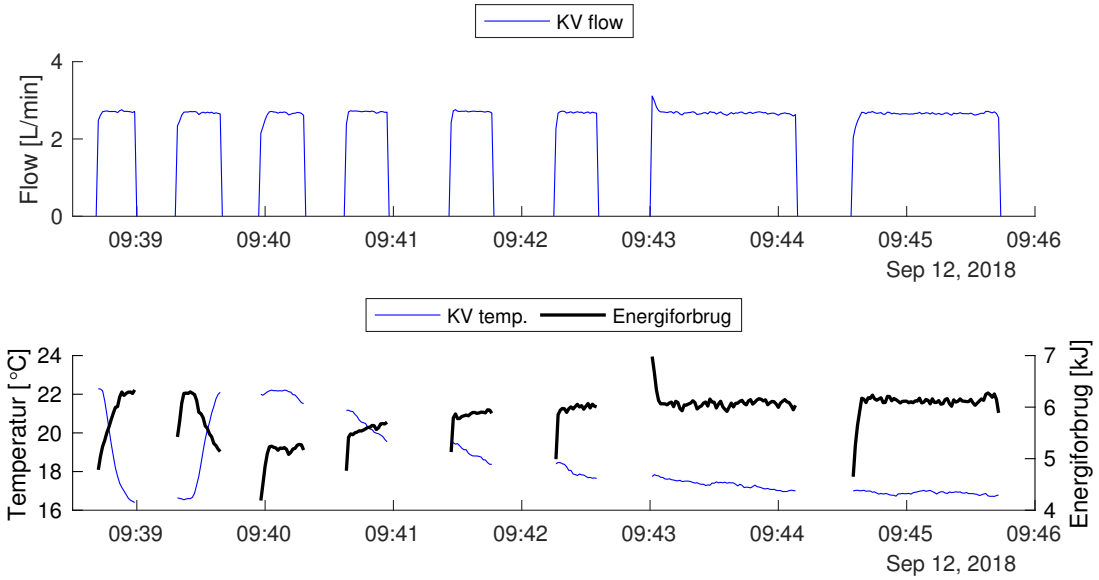
Opvaskemaskinen på Kærhavebakken er i dag tilsluttet koldt vand, mens det indbyggede varmelegeme efterfølgende varmer vandet op. Derved har opvaskemaskinen et energiforbrug til el, når det kolde vand opvarmes til den ønskede temperatur. Her er det af interesse af undersøge, om det er mere rentabelt at anvende en varmtvandstilslutning og bruge fjernvarme fremfor el til at producere det varme vand. Til at undersøge dette regnes energiforbruget ud for hhv. el og varme for hver gang opvaskemaskinen tager vand ind, og efterfølgende sammenlignes de to løsninger med hinanden. I produktkataloget for opvaskemaskinen fremgår det, at temperaturen for økoprogrammet er 50°C, hvorfor denne temperatur anvendes i beregningerne. Ligeledes antages det, at det kolde vand opvarmes i alle tapninger med undtagelse af den sidste, hvor der i stedet anvendes koldt vand til at skylle af med.

Først regnes energiforbruget til el ud for hver tapning i økoprogrammet, hvor det indbyggede varmelegeme anvendes til at varme vandet op. Dette gøres ved brug af Formel (F.1):

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{F.1}$$

Q	Energi	[kJ]
m	Masse	[kg]
c_p	Specifik varmekapacitet	$[\frac{kJ}{kg \cdot K}]$
ΔT	Temperaturforskel	[°C]

På Figur F.1 er en del af det hyppigst anvendte tappeprogram, hvor otte tapninger finder sted mellem 09:38 og 09:46, vist sammen med det beregnede energiforbrug til el.

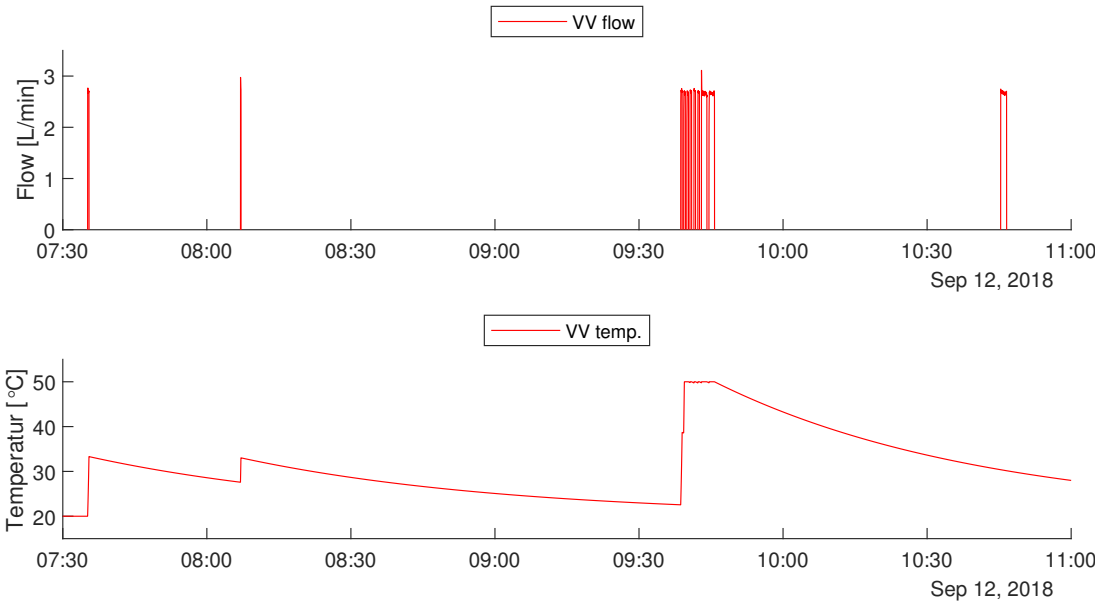


Figur F.1: Energiforbrug ved elopvarmning af koldt vand i opvaskemaskinen ved Kærhavebakken.

Af figuren fremgår det, at koldtvandstemperaturen og varigheden er forskellig for de otte viste tapninger. Dette afspejler sig også i det beregnede energiforbrug til el, når vandet skal opvarmes til 50°C. Her er forbruget, med undtagelse af de første to tapninger, lavere i starten grundet en højere koldtvandstemperatur, mens forbruget stiger ved de sidste tapninger, idet koldtvandstemperaturen er faldet til ca. 17°C. For hele opvaskeprogrammet er der regnet et samlet energiforbrug til el på 1.647 kJ, svarende til 0,46 kWh. Det svarer til det elforbrug, varmelegemet i opvaskemaskinen bruger til at opvarme vandet i løbet tappeprofilet. Det er dermed også det forbrug, der skal bruges til at sammenligne med energiforbruget ved opvarmning af vandet gennem fjernvarme.

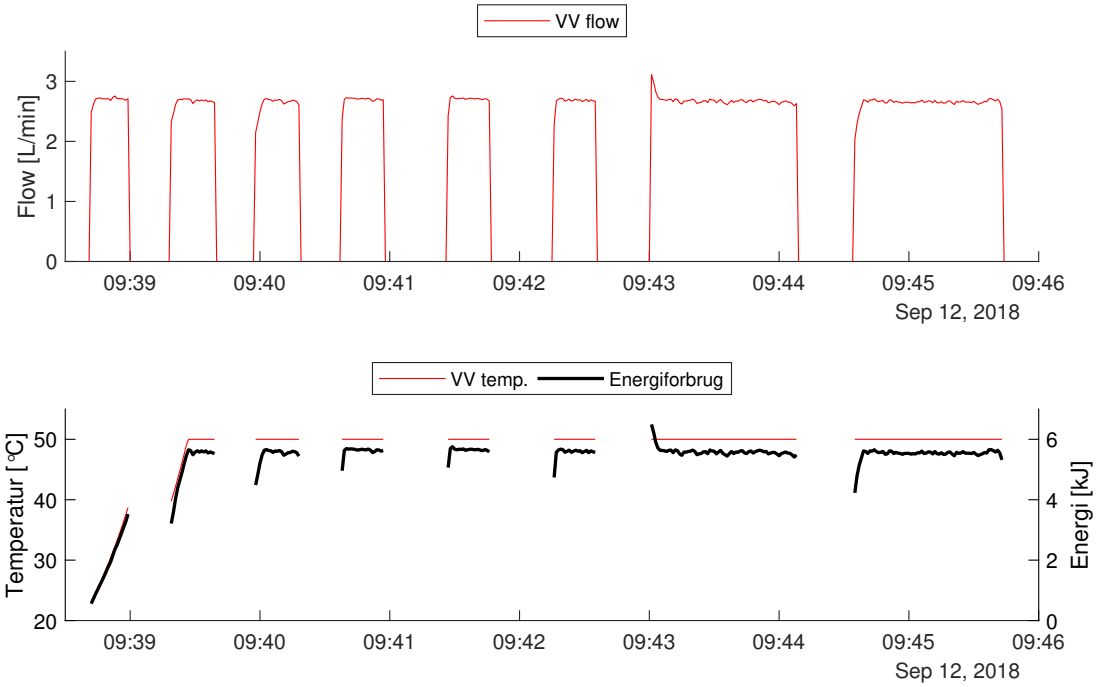
Til at undersøge energiforbruget ved tilkobling til varmt vand bestemmes først temperaturprofilet for det varme vand. Her antages det, at tappeprofilet er identisk med det for koldtvandstilkobling, mens der af praktiske årsager ikke tages højde for ventetid og rørtab mellem opvaskemaskinen og teknikrummet ved fastlæggelsen af temperaturprofilet for det varme vand. Baseret på målingerne ved køkkenvasken genereres en eksponentiel funktion til at estimere forløbet for temperaturstigningen af det kolde vand, der opvarmes af varmeveksleren i teknikrummet, mens Newtons lov om afkøling samt afkølingskonstanten fastlagt for køkkenvasken anvendes til at fastlægge afkølingen mellem tapningerne. Ud fra ovenstående antagelser er temperaturprofilet vist på Figur F.2 genereret for opvaskemaskinen på Kærhavebakken ved tilkobling til varmt vand.

Af Figur F.2 frem det, at ikke alle tapninger når den ønskede varmtvandstemperatur på 50°C. For de tre første tapninger er varigheden for kort til, at varmeveksleren kan nå at varme vandet tilstrækkeligt op, før tapningen igen ophører, og først ved den fjerde tapning kl. 09:39 nås den ønskede varmtvandstemperatur på 50°C.



Figur F.2: Temperaturprofil for opvaskmemaskinen på Kærhavebakken ved varmtvandstilslutning.

Energiforbruget til opvarmningen af vandet bestemmes på samme måde som før, ved brug af Formel (F.1), men denne gang ved at benytte det nye temperaturprofil og antage en koldtvandstemperatur i teknikrummet på 20°C. På Figur F.3 er vist profilet for energiforbruget ved de otte tapninger, der finder sted mellem 09:38 og 09:46.



Figur F.3: Energiforbrug ved tilkobling til varmt vand for opvaskemaskinen på Kærhavebakken.

Af figuren ses det, at energiforbruget er lavere ved den første tapning kl. 09:39, idet varmtvandstemperaturen ikke når op på 50°C, mens den er konstant for de resterende tapninger. Den samlede energiforbrug til varmt vand er fastlagt til 1.388 kJ, svarende til 0,39 kWh. Der anvendes dermed mindre energi end ved tilkobling til koldt vand, idet det varme vand ikke

altid når den ønskede temperatur. Her kunne en løsning være at supplere med elopvarmning, så temperaturen altid når 50°C.

For både koldt- og varmtvandstilslutningen svarer de udregnede energiforbrug til E_{slut}, altså energiforbruget uden primær energi. For at kunne sammenligne løsningerne med hinanden, er det nødvendigt at regne energiforbruget inkl. primær energi for en opvask ved brug af hhv. el og fjernvarme. For koldtvandstilslutningen blev energiforbruget ved tapstedet fastlagt til 0,46 kWh, og ved brug af en primær energifaktor på 2,5 for el fastlægges det totale energiforbrug inkl. primær energi til 1,14 kWh. For varmtvandstilslutningen blev energiforbruget fastlagt til 0,39 kWh ved tapstedet. Det betyder, at der skal anvendes 0,07 kWh el som supplement. Energiforbruget inkl. primær energi regnes særskilt for de to opvarmningsformer. For fjernvarme tages der først højde for energitabet mellem E_{brutto} og E_{slut}. Dette bliver i Kapitel 10 fastlagt til 26%, hvormed der skal tillæges 35% til energiforbruget på 0,39 kWh ved tapstedet for at få energiforbruget ved produktion. Herefter anvendes en primær energifaktor på 0,8 for fjernvarme til at fastlægge det samlede energiforbrug. Endeligt tillægges energiforbruget ved el-supplement den primære energifaktor på 2,5, således det samlede forbrug ved varmtvandstilkobling kan regnes. Resultaterne af de to løsninger er vist i Tabel F.1.

Tabel F.1: Oversigt over energiforbrug til opvaskemaskine på Kærhavebakken ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. tapsted	0,46	0,39	0,07
Energiforbrug v. produktion	0,46	0,52	0,07
Energiforbrug inkl. primær energi	1,14	0,42	0,18

Ud fra resultaterne vist i Tabel F.1 fremgår det, at det samlede energiforbrug inkl. primær energi er 1,14 kWh pr. opvask for koldtvandstilkobling, mens det er 0,60 kWh ved en varmtvandstilkobling. Resultaterne indikerer derfor, at en varmtvandstilkobling med el-supplement, baseret på energiforbruget til opvarmning af vand, er mere rentabel. Ved brug af en pris på 2,4 kr. pr. kWh el inkl. alle omkostninger ([SE Energi og Klima, 2019]) og en pris på 0,375 kr. pr. kWh fjernvarme ([Eniig, 2019]) kan omkostningerne for forbrugeren udregnes for de to løsninger. Resultaterne er vist i Tabel F.2.

Tabel F.2: Omkostninger til opvarmning af vand til opvaskemaskine på Kærhavebakken ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. produktion [kWh]	0,46	0,52	0,07
Pris [kr.]	1,10	0,20	0,17

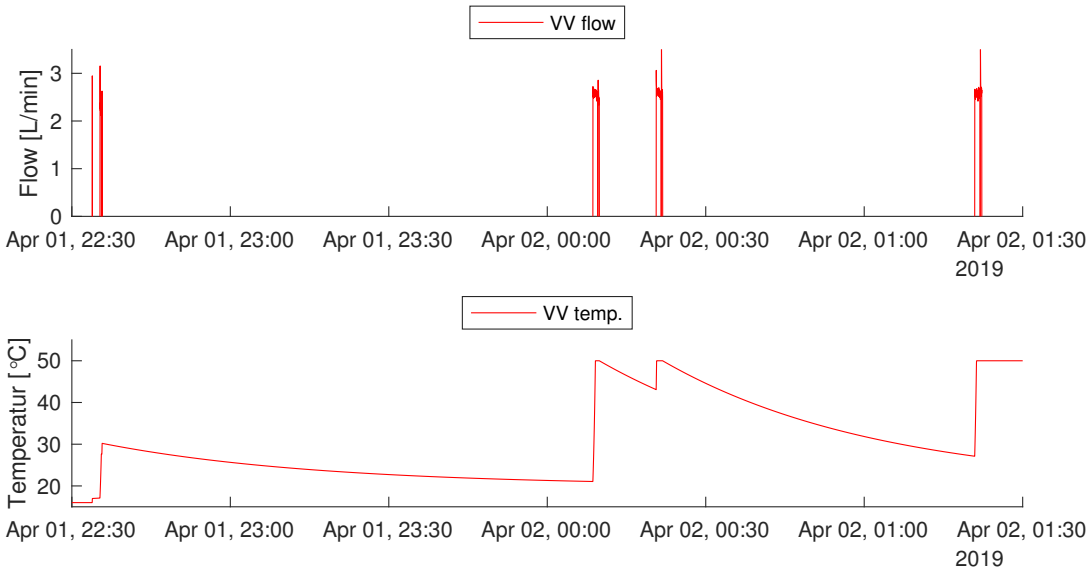
Resultaterne i Tabel F.2 indikerer, at det for en opvask med koldtvandstilkobling koster 1,10 kr. at opvarme vandet, mens det for en varmtvandstilkobling koster 0,37 kr., svarende til ca. 1/3 af prisen ved opvarmning med el. Det indikerer derfor, at der kan være et potentiale i fremtiden for at anvende varmtvandstilkoblinger ved opvaskemaskiner fremfor indbyggede varmelegemer, der opvarmes gennem strøm.

Det skal noteres, at der for varmtvandstilkoblingen ikke blev taget højde for ventetiden ved generering af temperaturprofilet. Dette påvirker derfor beregningerne af energiforbruget, hvor det blev antaget, at det varme vand produceret ved varmeveksleren svarer til det vand, der anvendes i opvaskemaskinen. Ventetiden for køkkenvasken, indtil temperaturen nåede 30°C blev fastlagt til 16 sek., hvorfor denne vil være endnu højere for opvaskemaskinen, idet vandets temperatur skal være 50°C. Størstedelen af tapningerne i opvaskeprogrammet havde en varighed på ca. 20 sek., og dermed vil det varme vand fra varmeveksleren i flere tilfælde kun lige nå ud til opvaskemaskinen, før den ikke længere tager vand ind. For de første tre tapninger, hvor varmtvandstemperaturen end ikke når op på 50°C, vil det betyde, at det vandet muligvis ikke når ind i opvaskemaskinen, men at det i stedet vil være det afkølede vand, som allerede er i røret, der i stedet vil blive brugt, og dermed vil der være et større behov for el-supplement. En anden løsning kunne være, at det varme vand i starten af tapningen skal løbe direkte igennem opvaskemaskinen og ud i afløbet, indtil varmtvandstemperaturen er tilstrækkelig. Herved opnås et større vandspild men i stedet vil el-supplement være unødvendig. Flere undersøgelser af dette er derfor nødvendige for at fastlægge, om det potentielt fortsat vil være rentabelt at anvende varmtvandstilkobling, på trods af et større vandforbrug, sammenlignet med el-supplement.

F.1.2 Kildebjerg Søvej

For Kildebjerg Søvej foretages en tilsvarende analyse af opvaskemaskinen for at fastlægge, om der er potentiale i en varmtvandstilslutning. Ved brug af samme fremgangsmåde som for Kærhavebakken fastlægges strømforbruget ved koldtvandstilslutning, igen med en antagelse om, at det kolde vand skal varmes op til 50°C. Ud fra Formel F.1 fås et samlet energiforbrug til el på 948 kJ, svarende til 0,26 kWh. I BMS-systemet er et samlet strømforbrug på 0,94 kWh registreret, hvorfor det beregnede strømforbrug til opvarmning af vand udgør 28% af dette.

Data for varmtvandstilkobling genereres på samme måde som for Kærhavebakken, hvor logget data fra køkkenvasken bruges til at opstille en eksponentialfunktion for temperaturprofilet, mens afkølingskonstanten for køkkenvasken bruges til at bestemme afkølingen mellem tapningerne. Igen tages der af praktiske årsager ikke hensyn til ventetid og rørtab. Det genererede varmtvandsprofil er vist på Figur F.4, hvor det antages, at koldtvandstemperaturen skal opvarmes fra 16°C.



Figur F.4: Temperaturprofil for opvaskemaskinen på Kildebjerg Søvej ved varmtvandstilslutning.

I lighed med Kærhavebakken er der for det viste varmtvandsprofil flere af tapningerne, hvor varigheden er for kort til, at varmtvandstemperaturen når op på de ønskede 50°C. Ved de første tapninger når varmtvandstemperaturen kun ca. 38°C inden tapningen ophører og vandet begynder at afkøle.

Det nye temperaturprofil for det varme vand benyttes til at regne energiforbruget ud for opvaskemaskinen ved varmtvandstilslutning. Her fås et samlet energiforbrug på 774 kJ, svarende til 0,22 kWh, hvorfor der også her er brug for el-supplement til at varme vandet op til den ønskede temperatur. Idet de beregnede energiforbrug for både koldt- og varmtvandstilslutning igen svarer til E_{slut}, regnes energiforbrugene inkl. primær energi før der foretages en sammenligning af de to løsninger. Grundet brugsvandssystemet opbygning på Kildebjerg Søvej har det ikke været muligt at fastlægge tabet henover varmtvandsbeholderen men kun tabet på rørstrækningen, og derfor haves der intet kendskab til energiforbruget på primærsiden. I mangel på bedre anvendes derfor resultatet for Kærhavebakken, hvorfor der tillæges 35% til energiforbruget på 0,22 kWh. De samlede resultater er vist i Tabel F.3.

Tabel F.3: Oversigt over energiforbrug til opvaskemaskine på Kildebjerg Søvej ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. tapsted	0,26	0,22	0,04
Energiforbrug v. produktion	0,26	0,30	0,04
Energiforbrug inkl. primær energi	0,65	0,24	0,10

Resultaterne i Tabel F.3 indikerer, at energiforbruget inkl. primær energi er på 0,65 kWh pr. opvask ved koldtvandstilslutning og 0,34 kWh pr. opvask for varmtvandstilslutning. Igen lyder konklusionen derfor, at en varmtvandstilslutning med el-supplement, baseret på energiforbruget til opvarmning af vand, er mere rentabel end koldtvandstilslutning. Ved brug af de samme priser på el og fjernvarme regnes besparelsen ud for forbrugeren. Resultaterne er vist i Tabel F.4.

Tabel F.4: Omkostninger til opvarmning af vand til opvaskemaskine på Kærhavebakken ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. produktion [kWh]	0,26	0,30	0,04
Pris [kr.]	0,62	0,11	0,10

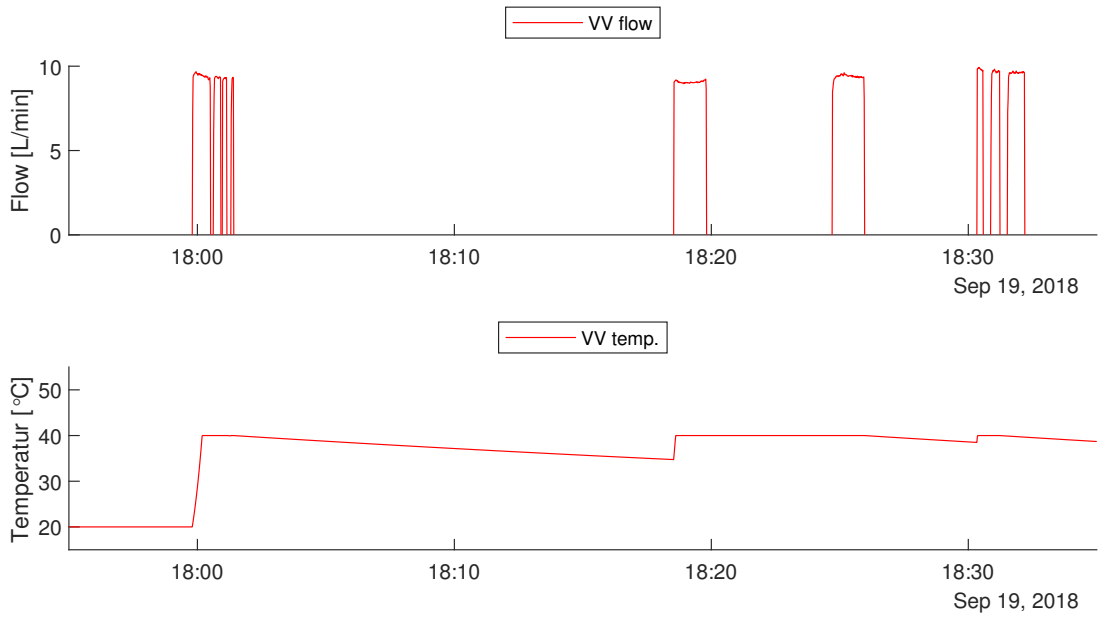
Ud fra Tabel F.4 fremgår det, at det koster 0,62 kr. pr. opvask ved brug af den nuværende koldtvandstilslutning, mens prisen er 0,21 kr. ved en varmtvandstilslutning. Igen er der for beregningerne ved varmtvandstilslutning ikke taget højde for ventetiden, hvorfor der reelt set er behov for mere el-supplement. Konklusionen er derfor den samme som for Kærhavebakken, at der umiddelbart er indikationer på, at varmtvandstilslutning kan være en rentabel løsning. Dog er mere nøjagtige beregninger af forløbet ved en varmtvandstilslutning nødvendige, således et korrekt energiforbrug kan fastlægges.

F.2 Vaskemaskine

Begge husstande har en vaskemaskine installeret, men kun for Kærhavebakken er der foretaget målinger af denne. Derfor foretages analysen kun for dette tapsted, hvor det mest hyppigt anvendte tappeprofil bruges til undersøgelsen af, hvorvidt en varmtvandstilslutning vil være rentabel.

F.2.1 Kærhavebakken

På samme måde som for opvaskemaskinen udregnes energiforbruget til el også for vaskemaskinen på Kærhavebakken. Ved brug af det hyppigst anvendte tappeprogram, Mix 40°C-programmet, er strømforbruget fastlagt til 4.291 kJ, svarende til 1,19 kWh, med en antagelse om at vandet skal opvarmes til 40°C i hver tapning. Efterfølgende genereres ud fra data for bryggersvasken og køkkenvasken hhv. en eksponentialfunktion og afkølingsfunktion for temperaturprofilet, hvis vaskemaskinen i stedet havde været tilkoblet varmt vand. Profilet er vist på Figur F.5.



Figur F.5: Temperaturprofil for vaskemaskinen på Kærhavebakken ved varmtvandstilkobling.

Af temperaturprofilet fremgår det, at det kolde vand når at blive opvarmet til 40°C ved hver tapning, idet varigheden af de første tapninger i hver tappeperiode er længere end for opvaskemaskinerne. Som ved koldtvandstilslutningen betyder det korte vaskeprogram, at varmtvandstemperaturen i røret ikke når at afkøle markant mellem tapningerne og derfor ligger den konstant mellem 35°C og 40°C.

Energiforbruget ved varmtvandstilslutning regnes på samme måde, som ved opvaskemaskinen beskrevet ovenfor, hvor det kolde vand ved vaskemaskinens Mix 40°C skal opvarmes fra 20°C til 40°C. Dette giver et forbrug på 3721 kJ, svarende til 1,03 kWh. Idet forbruget ligger lavere end ved koldtvandstilslutningen, er der igen brug for el-supplement. Ligeledes svarer det beregnede energiforbrug til E_{slut}, hvorfor det gennemsnitlige energitab på 26% mellem teknikrummet og tapstederne, som fastlægges i Kapitel 10, bruges til at fastlægge energiforbruget ved teknikrummet. Det samlede energiforbrug for de to løsninger er vist i Tabel F.5.

Tabel F.5: Oversigt over energiforbrug til vaskemaskine på Kærhavebakken ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. tapsted	1,19	1,03	0,16
Energiforbrug v. produktion	1,19	1,39	0,16
Energiforbrug inkl. primær energi	2,98	1,11	0,40

Resultaterne i Tabel F.5 viser, at der igen er potentiale for at anvende varmtvandstilslutning, idet det samlede energiforbrug ligger lavere end for koldtvandstilslutningen. Ved brug af de tidligere præsenterede priser for el og fjernvarme regnes besparelsen mellem de to løsninger ud for forbrugeren. Disse er vist i Tabel F.6.

Tabel F.6: Omkostninger til opvarmning af vand til opvaskemaskine på Kærhavebakken ved koldt- og varmtvandstilkobling.

	Koldtvandstilkobling	Varmtvandstilkobling	
	Varme [kWh]	Varme [kWh]	El [kWh]
Energiforbrug v. produktion [kWh]	1,19	1,39	0,16
Pris [kr.]	2,86	0,52	0,96

Ud fra priserne vist i Tabel F.6 opnås en besparelse på 1,38 kr. pr. vask for det analyserede Mix 40°C program ved brug af en varmtvandstilslutning og ikke en koldtvandstilslutning. Igen er tilfældet dog det samme, som for opvaskemaskinerne, hvor der ikke er taget højde for ventetiden, og derfor vil der være et større behov for enten el-supplement eller et yderligere forbrug af varmt vand, som skal løbe direkte i afløbet, således temperaturen af det varme vand, der tappes fra vaskemaskinen, er 40°C.

Konklusionen er derfor den samme som for de to analyserede opvaskemaskiner. Der er indikationer på, at en varmtvandstilslutning godt vil kunne svare sig for de analyserede tappeprogrammer, når der ikke tages højde for ventetiden. Mere nøjagtige analyser af forløbet, hvor ventetiden tages i betragtning, er dog nødvendige for at kunne drage en samlet konklusion. Ydermere er der ikke taget højde for ekstra anlægsomkostninger i form af ekstra slange til varmtvandstilkobling, hvis vaskemaskiner og opvaskemaskiner i fremtiden skal være tilsluttet både koldt og varmt vand. Disse udgifter skal også tages i betragtning, før det kan vurderes, om det fortsat vil være rentabelt at anvende varmtvandstilslutning.

Bruser med varmegenvinding G

Som en del af projektet er en bruser med to udskiftelige varmegenvindingssystemer undersøgt med det formål at fastlægge effektiviteten af disse. Først er der foretaget en række tests på begge varmegenvindingssystemer, dette ud fra forskellige forbrugsprofiler for brusebade, og efterfølgende er der for hver test genereret et tilsvarende referencebad uden brug af varmegenvinding. Ved at sammenligne resultaterne med og uden brug af varmegenvinding kan effektiviteten for hvert system fastlægges. I dette appendiks beskrives fremgangsmåden for, hvordan testenene er foretaget på bruseren med varmegenvinding samt hvordan referencebadene efterfølgende er genereret ud fra testresultaterne.

G.1 Formål

Formålet med analysen er at undersøge, hvor effektiv bruseren med de to udskiftelige varmegenvindingssystemer er og derved fastlægge, om der er et fremtidigt potentiale i denne løsning. Princippet ved et varmegenvindingssystem i en brusekabine er, at varmen fra badevandet, der løber ud i afløbet, anvendes til at varme det kolde vand op før det løber ind i blandingsbatteriet. Derved vil koldtvandstemperaturen stige, før det blandes sammen med det varme vand, og dette vil i sidste ende betyde et mindre varmtvandsforbrug. Effektiviteten af de to varmegenvindingssystemer er endnu ikke fastlagt, hvorfor disse ønskes fastlagt.

Til at fastlægge effektiviteten er en række tests udført på brusekabinen med de to udskiftelige varmegenvindingssystemer. De samme tests er foretaget på begge varmegenvindingssystemer, hvor forskellige bade med forskellige varigheder og badetemperaturer er genskabt. For at fastlægge effektiviteten for de to systemer er der for hver test genereret et referencebad. Referencebadet har samme forløb som den oprindelige test ift. varighed og badetemperatur, men her er der ingen varmegenvindingssystem, hvorfor der vil være et større forbrug af varmt vand og tilsvarende mindre forbrug af koldt vand. Ved at sammenligne resultaterne med og uden brug af varmegenvinding for hver enkelt test fastlægges effektiviteten.

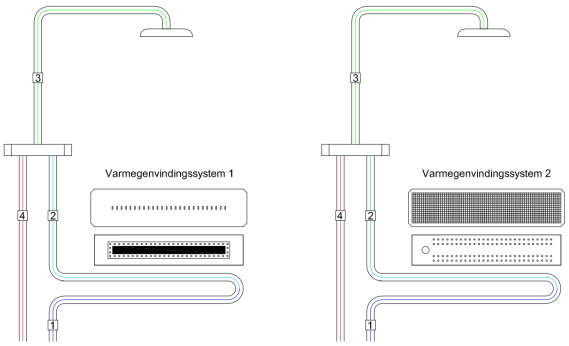
G.2 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen består af en brusekabine med tilhørende brusesystem, der er tilkoblet hhv. koldt og varmt vand. Fire Huba flowmålere er tilkoblet brusesystemet og måler flow og temperatur på hhv. varmt vand, koldt vand før varmegenvindingssystemet, koldt vand efter varmegenvindingssystemet og mixflowet efter blandingsbatteriet. Dette er illustreret på Figur G.1.

Brusekabinen er fremstillet med to aftagelige bundplader, hvorpå hvert af de to varmegenvin-

dingssystemer er monteret. Nedenfor er listet det anvendte udstyr til forsøget, mens brusekabinen og brusesystemet er vist på Figur G.2.

- Computer med adgang til server, hvor data uploades
- Slanger tilsluttet hhv. koldt- og varmtvandsledning
- Brusekabine med brusesystem
- 4 stk. Huba Flow Sensor 236
- Udskiftelige varmegenvindingssystemer



Figur G.1: Oversigt over de to varmegenvindingssystemer samt placering af flowmålere.

Figur G.2: Brusekabine og brusesystem anvendt til analysen af varmegenvindingssystemerne.

Til undersøgelsen anvendes to forskellige varmegenvindingssystemer, der begge er fremstillet i Tyskland. Mens systemerne er godkendte til brug i Tyskland, er ingen af dem lovlige herhjemme, da de begge er konstrueret med skjulte samlinger. Derfor er de ikke installeret i nogle boliger, men må kun anvendes til laboratorieforsøg.

Det første varmegenvindingssystem (VGS 1) er vist på Figur G.3 - Figur G.5. Princippet bag det første varmegenvindingssystem er, at brusevandet løbet ned gennem risten (Figur G.3), hvor det bliver opsamlet i beholderen (Figur G.4). Når denne bliver fyldt op, vil vandet løbe ud over kanten og ned gennem hullerne, hvorfra det rammer koldtvandsrørene (Figur G.5) og derved varmer det kolde vand op. I bunden af pladen er installeret et afløb, hvorfra vandet ledes væk.

Det samme princip gør sig gældende for varmegenvindingssystem 2 (VGS 2), som er vist på Figur G.6 - Figur G.8. Det andet varmegenvindingssystem er opbygget på samme måde, hvor brusevandet løber ned gennem en rist (Figur G.6) og opsamles (Figur G.7). Herfra løber vandet videre gennem de små huller og rammer koldtvandsrørene (Figur G.8). Derved opvarmes koldtvandsrørene og dermed det kolde vand, inden brusevandet når bunden af bundpladen og ledes ud i afløbet. Til forskel fra det første system, indeholder dette system dobbelt så meget rørføring til koldt vand. Her er monteret to sæt koldtvandsledninger, hvorfor det er muligt at anvende enten det ene eller begge sæt, sidstnævnte for at opnå en større effekt. Til analysen var kun det ene sæt af koldtvandsledninger tilsluttet, hvorfor rørlængden er tilsvarende den for det første system.

Figur G.3: VGS 1 med rist og tilslutninger.

Figur G.4: VGS 1 med overløb.

Figur G.5: VGS 1 med koldtvandsrør.

Figur G.6: VGS 2 med rist og tilslutninger.

Figur G.7: VGS 2 med overløb.

Figur G.8: VGS 2 med koldtvandsrør.

G.3 Metode

I det følgende afsnit redegøres for fremgangsmåden til analysen af effektiviteten af de to varmegenvindingssystemer. Hver test er foretaget ved at indstille termostaten på blandingsbatteriet til en ønsket temperatur og herefter opnå fuldt flow. Varigheden af testene er mellem 5 og 7 min., således en stationær balance opnås. Når en test på et varmegenvindingssystem er færdig afmonteres bundpladen og det andet varmegenvindingssystem monteres, således den samme test gentages på begge varmegenvindingssystemer. For at opnå ca. samme forhold mellem de enkelte tests foretages de alle med en times mellemrum mellem hinanden. Hermed kan rørene nå at afkøle, således omtrent det samme forløb haves i alle tests. Det skal bemærkes, at koldtvandstemperaturen ikke er konstant for alle tests, hvorfor mindre afvigelser kan forekomme mellem den samme test foretaget på hver af de to varmegenvindingssystemer.

Effektiviteten af de to systemer fastlægges ud fra tre forskellige tests, hvor der er justeret på setpunktet for temperaturen. En oversigt over de enkelte tests er vist i Tabel G.1.

Tabel G.1: Oversigt over udførte tests på bruser med varmegenvinding. *VGS = varmegenvindingssystem.

Test [−]	VGS* [−]	Varighed [min]	Flow [L/min]	Setpunkt mix temp. [°C]	Tid siden forrige bad [min]
1.1	1	07:01	6,2	38,5	00:00
1.2	2	07:03	6,2	38,5	60:00
2.1	1	07:04	6,2	39,5	60:00
2.2	2	07:05	6,2	39,5	80:00
3.1	1	05:00	6,3	42,5	60:00
3.2	2	05:05	6,2	42,5	60:00
4.0	2	06:00	5,6	38,5	-

Testene er foretaget på begge varmegenvindingssystemer, som angivet i tabellen. Slutteligt er en fjerde test foretaget, hvor betydningen af ventetiden på det varme vand undersøges. Umiddelbart før denne test er der derfor ledt varmt vand igennem brusesystemet, således der i modsætning til de forrige tests ikke haves nogen ventetid på det varme vand.

Efter alle tests er udført foretages en databehandling, hvor de målte spændinger omregnes til flows og temperaturer. Dernæst benyttes dataene for hver test til at generere et tilsvarende referencebad, her uden brug af et varmegenvindingssystem.

Referencebadet genereres ved brug af Formel (G.1) for mixflow, q_{mix}, og Formel (G.2) for mixtemperaturen, t_{mix}.

$$m_{mix} = m_{KV} + m_{VV} \tag{G.1}$$

$$t_{mix} = \frac{m_{KV} \cdot c_{p,KV} \cdot t_{KV} + m_{VV} \cdot c_{p,VV} \cdot t_{VV}}{m_{KV} \cdot c_{p,KV} + m_{VV} \cdot c_{p,VV}} \tag{G.2}$$

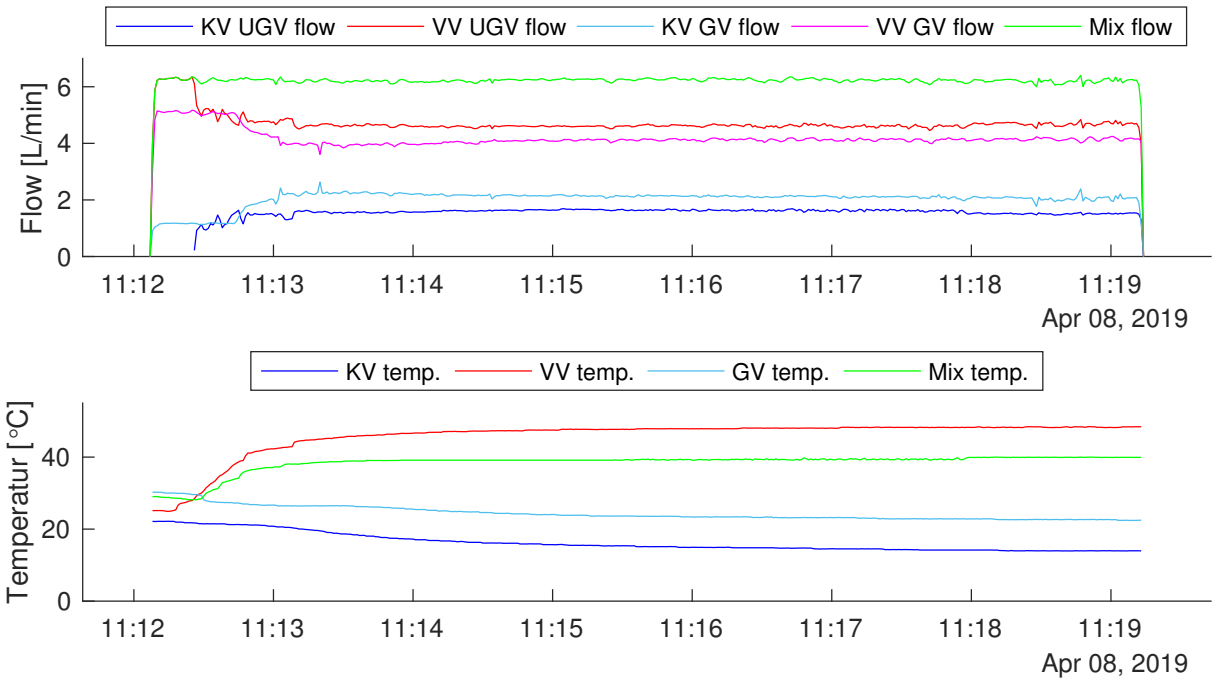
m	Masse	[kg]
c_p	Specifik varmekapacitet	[kJ/kg °C]
t	Temperatur	[°C]

Ud fra de oprindelige tests med genvinding kendes mixflowet, q_{mix}, mixtemperaturen, t_{mix} samt temperaturerne på det varme brugsvand, t_{VV} og det kolde brugsvand, t_{KV}, sidstnævnte både før og efter varmegenvindingssystemet. Og ved at benytte koldtvandstemperaturen før varmegenvindingssystemet, t_{KV}, fremfor temperaturen efter kan der fastlægges nye flows for både det varme og kolde brugsvand, idet der haves to ligninger med to ubekendte. Ved brug af denne fremgangsmåde genereres derfor resultater uden brug af varmegenvinding for hver test. Efterfølgende sammenlignes resultaterne med og uden brug af varmegenvinding, og effektiviteten af varmegenvindingssystemerne fastlægges.

G.4 Resultater

I det følgende afsnit er vist et eksempel på, hvordan forløbene af en test med og uden brug af varmegenvinding ser ud. Der tages udgangspunkt i Test 2.2, hvor varmegenvindingssystem 2 er monteret i brusekabinen.

Som nævnt ovenfor foretages testen på brusekabinen ved brug af varmegenvindingssystemet, mens der efterfølgende genereres et referencebad uden brug af genvinding. Resultaterne af Test 2.2 er begge vist på Figur G.9



Figur G.9: Resultater af Test 2.2 med og uden brug af varmegenvinding.

Resultaterne på Figur G.9 viser, hvordan bruseforløbene er med og uden brug af varmegenvindingssystemet. Fra den oprindelige test med genvinding ses det, at der allerede fra start blandes koldt vand med genvinding sammen med det varme vand, hvormed varmtvandsflowet er reduceret sammenlignet med resultaterne uden brug af genvinding. Her ligger varmtvandstemperaturen under mixtemperaturen, hvorfor der kun anvendes varmt vand de første 20 sek. Herefter er varmtvandstemperaturen højere end mixtemperaturen, hvorfor der ledes koldt vand ind i blandingsbatteriet. En stationær balance opnås i begge tilfælde efter ca. 1 minut, og her fremgår det af resultaterne, at varmtvandsflowet ved brug af varmegenvinding er lavere end varmtvandsflowet uden brug af varmegenvinding, mens der i stedet anvendes mere koldt vand.

Ved at analysere resultaterne af de to tests kan en samlet besparelse og dermed effektivitet af varmegenvindingssystemet fastlægges. I alt blev der for Test 2.2 tappet 44 L, heraf var 3,5 L varmt vand, når der ikke blev gjort brug af varmegenvinding. Med varmegenvinding var forbruget af varmt vand faldet til 29,7 L. Besparelsen og dermed effektiviteten af varmegenvindingssystemet er derfor 11,32%, mens temperaturvirkningsgraden blev fastlagt til 33,65%.

Den samme analyse er foretaget for de resterende tests, og efterfølgende er en gennemsnitlig effektivitet og temperaturvirkningsgrad fastlagt for hver af de to varmegenvindingssystemer. Resultaterne er vist i Tabel G.2.

Tabel G.2: Sammenligning af de to varmegenvindingssystemer.

VGS [−]	Gns. besparelse [%]	Gns. temperatur-virkningsgrad [%]
1	11,20	33,58
2	10,91	33,40

Resultaterne vist i Tabel G.2 viser, at der næsten ingen forskel er mellem de to varmegenvindingssystemer. Besparelsen er ca. 0,29% større ved varmegenvindingssystem 1, mens temperaturvirkningsgraden ligeledes ligger 0,18% højere. Dog skal det noteres, at det for varmegenvindingssystem 2 er muligt at benytte det andet sæt rørføring også, således det kolde vand vil opholde sig længere tid i rørene og derved bliver varmet yderligere op. Yderligere tests er derfor nødvendige for at fastlægge effektiviteten af varmegenvindingssystem 2 med denne opsætning.