Varmt brugsvand i et kollegium

Kandidatspeciale
Civil Engineering
Indoor Environmental and Energy Engineering
Aalborg Universitet
10. juni 2020

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri og Anlæg
Indoor Environmental and Energy Engineering
Aalborg Universitet
Civil Engineering
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst

Titel:

Domestic hot water production – how to do it right!

Projekt:

Master project

Projektperiode:

September 2019 - Juni 2020

Deltagere:

Mia Mølgaard Kristensen
Henriette Ljunggren Nørholm

Vejledere:

Rasmus Lund Jensen
Michal Zbigniew Pomianowski

Antal sider: 184
Appendiks: 61
Afleveret d. 10/06-2020

Synopsis:

Denne rapport tager udgangspunkt i Aalborgkollegiet, som er en dansk kollegiebygning i Aalborg. I projektet er der foretaget dataopsamling i henholdsvis teknikrum og ved tapsteder, med henblik på at opnå øget kendskab til varmtvandsforbrug, samt cirkulationssystemets indvirkning på varmt brugsvandssystemet. Der er foretaget forudgående kalibrering og fejldetektering af det anvendte måleudstyr, for at sikre en tilstrækkelig kvalitet af måledataene.
Der er undersøgt forbrugsprofiler på henholdsvis bygnings- samt tapstedsniveau, hvoraf førstnævnte er sammenholdt med relevant litteratur. Der er udført en statistisk analyse af måledataene på tapstedsniveau, bl.a. med udgangspunkt i parametrene ventetid, tappevarighed og antal tapninger pr. døgn.
Der er foretaget en analyse, visuel inspektion, samt termografisk undersøgelse af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, med henblik på bestemmelse af cirkulationens indvirkning på varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, fjernvarmeafkøling og effektivitet, samt identificering af problematiske rørstrækninger i cirkulationssystemet. Analyser af energiforbrug og -tab er foretaget for udførte tapninger.
Dertil er der fremstillet kunstige forbrugsprofiler, med henblik på simulering af et muligt optimeringsforslag med vekslere, ved anvendelse af simuleringsprogrammet Polysun.

The content of the report is freely available, but publication (with source reference) may only take place in agreement with the authors.

Abstract

This study examines the domestic hot water consumption of a Danish dorm building with 50 residens, located in Aalborg. The aim of the study is to investigate consumption patterns regarding domestic hot water, and to investigate the impact that the circulation system has on the energy consumptions and energy losses in the domestic hot water system. The average, typical domestic hot water consumption was 47,1 L/person/day, equivalent to 419,4 L/m^2/year. In general, the domestic hot water consumption was found to be evenly distributed throughout most of the day, while typical week days also have a morning peak between 07:00 - 09:00.

The circulation system was to found to have a major impact on the efficiency of the domestic hot water system, by consuming between 28,19 - 49,28 % of the district heating delivered to the domestic hot water system. Furthermore, the circulation system leads to a low utilization of the delivered district heating, corresponding to an average temperature difference of 15,38 - 16,08 °C, between the delivered and consumed district heating. The efficiency of the domestic hot water system was estimated to 33,56 - 36,67 %, including energy for circulation losses, while the efficiency of the domestic hot water production alone was estimated to 44,56 - 66,22 %, excluding circulation losses. This shows that circulation systems can have a big impact on the overall efficiency of domestic hot water systems in dwellings such as the examined property.

Forord

Dette afgangsprojekt er udarbejdet af to studerende i perioden mellem d. 1. september 2019 til d. 10. juni 2020 i forbindelse med uddannelsen Indoor Environmental and Energy Engineering på Aalborg Universitet. Projektet omhandler undersøgelse af varmtvandsforbruget og forbrugsmønstre på et kollegium i Aalborg, hvor der tages udgangspunkt i målinger, foretaget i et kollegiums teknikrum samt på udvalgte tapsteder. Projektet har ligeledes fokus på, hvordan et cirkulationssystem kan påvirke energiforbrug og -tab samt ventetid i et undersøgt varmt brugsvandssystem.

Mia Mølgaard Kristensen
<mmkr15@student.aau.dk>

Henriette Ljunggren Nørholm
<Hnorho18@student.aau.dk>

Indholdsfortegnelse

Abstract **v**

Kapitel 1 Indledning **3**
1.1 Litteraturgennemgang 7

Kapitel 2 Problembeskrivelse **15**
2.1 Metode og afgrænsning 15

Kapitel 3 Casebygning og måleplan **17**
3.1 Aalborgkollegiet 17
3.2 Måleplan 20

Kapitel 4 Måleudstyr **27**
4.1 Brunata energimålere 27
4.2 Huba flowmålere 32

Kapitel 5 Fejldetektering **41**

Kapitel 6 Forbrugsprofiler på Aalborgkollegiet **49**
6.1 Varmtvandsforbrug i litteraturen 50
6.2 Forbrugsprofiler på bygningsniveau 51
6.3 Sammenligning af udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet 57
6.4 Opsummering 59

Kapitel 7 Statistisk analyse for Aalborgkollegiet **61**
7.1 Tappevarighed 62
7.2 Tappetidspunkt 64
7.3 Antal tapninger pr. døgn 64
7.4 Tid mellem hver tapning 65
7.5 Opsummering 70

Kapitel 8 Cirkulation **73**
8.1 Cirkulationsflowets udvikling 73
8.2 Cirkulationstab 74
8.3 Cirkulationssystemets regulering 76
8.4 Optimeringsforslag 80
8.5 Opsummering 82

Kapitel 9 Effektivitet **83**
9.1 Påvirkning af effektiviteten 83
9.2 Effektivitetens udvikling mellem de tre måleperioder 85
9.3 Opsummering 88

Kapitel 10 Energitab under tapninger **91**
10.1 Metode og forudsætninger . . . 92
10.2 Energiforbrug og -tab for tapninger i køkken 2.1 og 3.2 . . . 95
10.3 Tømningstider for udvalgte rørstrækninger . . . 102
10.4 Gennemsnitlige tapninger . . . 103

Kapitel 11 Effektiv veksler **105**
11.1 Opbygning af Polysun-model . . . 105
11.2 Kunstige forbrugsprofiler til simulering . . . 107
11.3 Verificering . . . 111
11.4 Optimeringsforslag vedrørende veksler . . . 112

Kapitel 12 Diskussion **115**

Kapitel 13 Konklusion **117**

Litteratur **121**

Appendiks A Casebygning og Måleplan **123**

Appendiks B Principdiagram - Aalborgkollegiets brugsvandssystem **125**

Appendiks C Forbrugerundersøgelse **127**

Appendiks D Kalibrering **135**
D.1 Brunata energimålere . . . 135
D.2 Huba flowmålere . . . 140

Appendiks E Verificering af flowmålere **145**
E.1 Udstyr og opstilling . . . 145
E.2 Metode og databehandling . . . 146

Appendiks F Integrations- og summeringstider **151**

Appendiks G Forbrugsprofiler **157**
G.1 Varmtvandsforbrug . . . 157
G.2 Metode til identificering af tapninger . . . 158
G.3 Analyse af forbrugsmønstre for udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet . . . 159
G.4 Tappeprofiler - Køkkener . . . 160

Appendiks H Cirkulation **169**

Appendiks I Effektivitet **171**

Appendiks J Energiforbrug og -tab, tapning 5 **175**

Appendiks K Polysun **177**

Appendiks L Begrænsninger i Polysun **183**

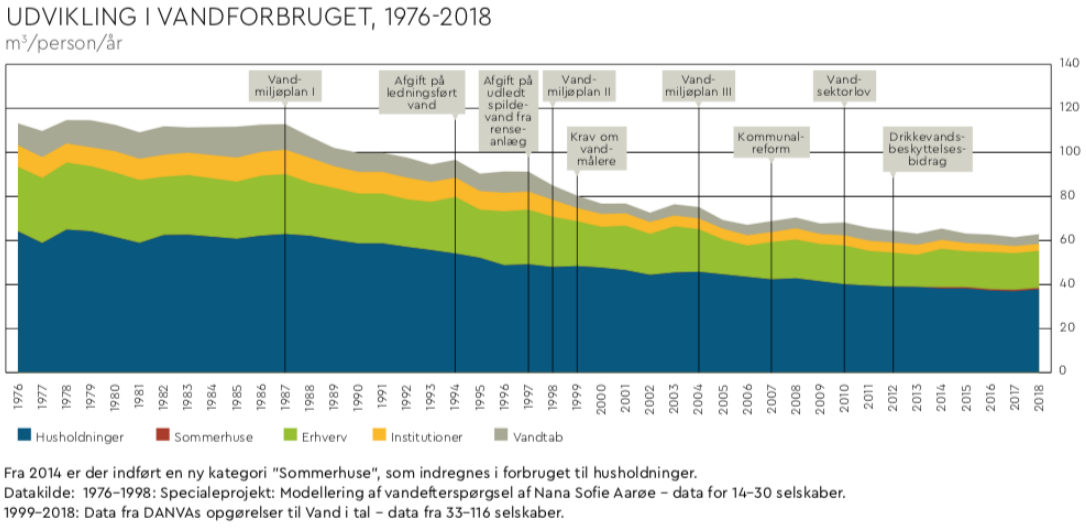
Symboler og terminologi

BR	Bygninsreglement
DN	Udvendig rørdiameter
FV	Fjernvarme
FVF	Fjernvarme, fremløb
FVR	Fjernvarme, returløb
CBV	Brugsvand, cirkulation
KBV	Koldt brugsvand
VBV	Varmt brugsvand
FM	Flowmåler

Indledning 1

Vand er en essentiel naturkilde for opretholdelsen af stort set alt liv på Jorden. Det findes i alle verdensdele og dækker omkring 70 % af Jordens overflade. På trods af den store forekomst, er det dog kun 3 % af alt vand, som er grundvand og sikkert for mennesker at indtage. Heraf er de 2,6 % opmagasineret i form af gletchere, sne og dybe grundvandsmagasiner, som er utilgængelige eller meget ressourcekrævende for mennesker at tilgå. Dette efterlader blot ca. 0,4 % til deling for hele den menneskelige befolkning. [Castelo, 2019] Danmarks undergrund har dog tilstrækkelige mængder grundvand, der benyttes til forsyning af koldt- og varmt brugsvand i bygninger.

På trods af, at Danmark ikke oplever mangler på grundvand, har Danmarks totale vandforbrug ændret sig markant de seneste årtier, hvilket skyldes indførelse af regler, samt nationale planer og reformer, der alle har medvirket til et øget fokus på vandmiljøet og resulteret i vandbesparelser. I figur 1.1 ses udviklingen i vandforbruget samt hvornår de forskellige regler, planer og reformer er blevet indført fra år 1976 til 2018.



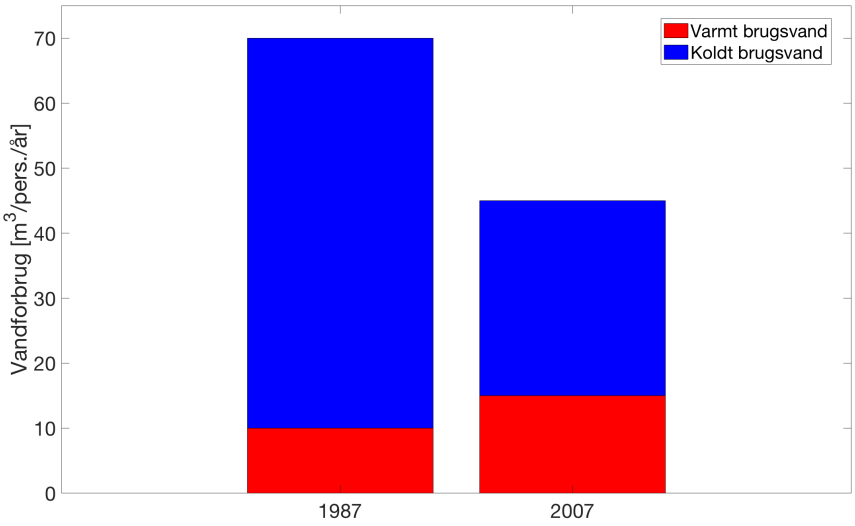
Figur 1.1. Udvikling i Danmarks vandforbrug i perioden 1976 - 2018, med markering af hvornår regler, samt nationale planer og reformer er blevet indført. [DANVA, 2019]

Figur 1.1 viser, at vandforbruget var forholdsvist stabilt før indførelsen af den første plan. Ved indførsel af Vandmiljøplan I blev forbrugerne mere miljøbevidste, hvilket gav en væsentlig reduktion i vandforbruget. Vandmiljøplan I skulle reducere udledningen af næringsstoffer, hvilket krævede en større ændring i de etablerede renseanlæg, og en prisstigning på spildevandstakten for forbrugerne var derfor nødvendig. Efterfølgende kom der blandt andet afgift på ledningsført vand og spildevand fra renseanlæg, samt

krav om vandmålere i alle boliger, der alle medvirkede til en endnu større bevidstved blandt forbrugerne vedrørende vandforbrug, hvilket afspejles i det faldene vandforbrug. Det ses, at vandforbruget for husholdninger i perioden fra 1986 til 2018 er faldet fra 63 til 38 m^3/pers./år, hvilket er et fald på 40 %. [DANVA, 2019]

Udover det ovenstående, har den teknologiske udvikling også haft stor indflydelse på det faldende vandforbrug, hvor der blandt andet er blevet introduceret tiltag som vandbesparende brusehoveder og vandhaner, hvoraf brusehovederne kan halvere vandforbruget ved tilsætning af luftbobler. [Gregersen, 2019]

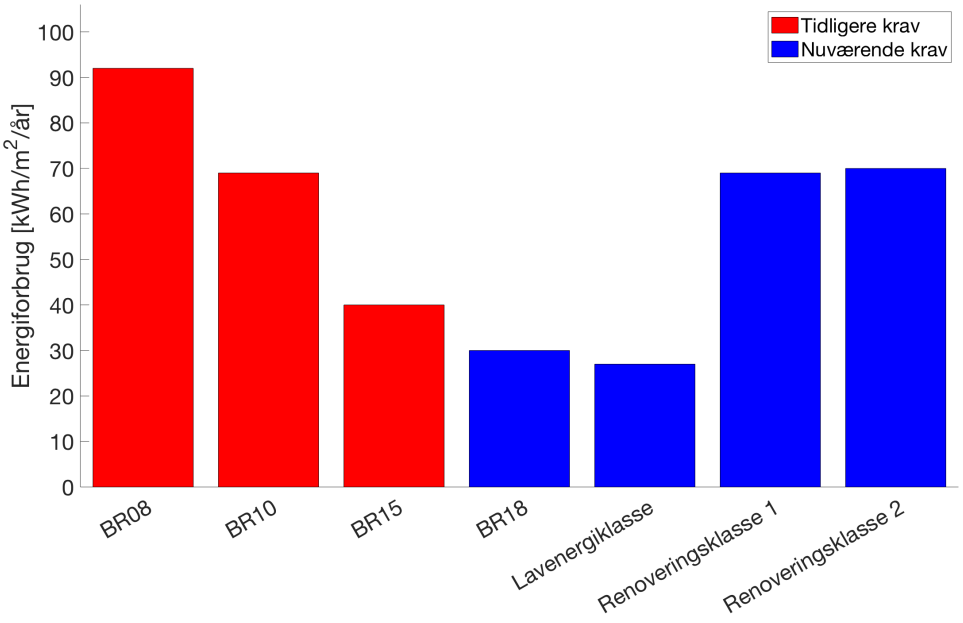
Ligesom der er sket en udvikling i vandforbruget, som vist på figur 1.1, er der ligeledes sket en udvikling i fordelingen mellem forbruget af koldt og varmt brugsvand. Udviklingen i fordelingen er observeret som en stigning i varmtvandsforbruget, hvilket kan ses i figur 1.2, som viser fordelingen for år 1987 og 2007. [Bøhm, 2009]



Figur 1.2. Udvikling i fordelingen af koldt- og varmtvandsforbrug for årene 1987 og 2007. [Bøhm [2009], Redigeret]

Figur 1.2 viser, at varmtvandsforbruget er steget fra 10 til 15 m^3/pers./år i perioden 1987-2007, hvilket har resulteret i et større energiforbrug til produktion og fordeling at varmt brugsvand i bygninger. Ved et større energiforbrug vokser udfordringen samt konsekvensen af den globale opvarmning ligeledes, hvilket er forårsaget af udledning af flere drivhusgasser til atmosfæren end der kan optages igen. En af de største årsager til global opvarmning er brugen af fossile brændsler, som olie og kul, til produktion af energi i form af elektricitet og varme. I kampen mod den globale opvarmning, vedtog Danmarks regering i 2019 en bindende klimalov, med målet om at reducere Danmarks drivhusgasudledning med 70 % i 2030 i forhold til niveauet i år 1990. Det stigende varmtvandsforbrug kræver derfor, at der bliver udviklet energioptimale løsninger, som reducerer udledningen af drivhusgasser til det minimale. Dette kan blandt andet være at reducere varmetabet, øge systemets effektivitet samt reducere varmtvandsforbruget, og dermed reducere energiforbruget til varmt brugsvandsproduktion.

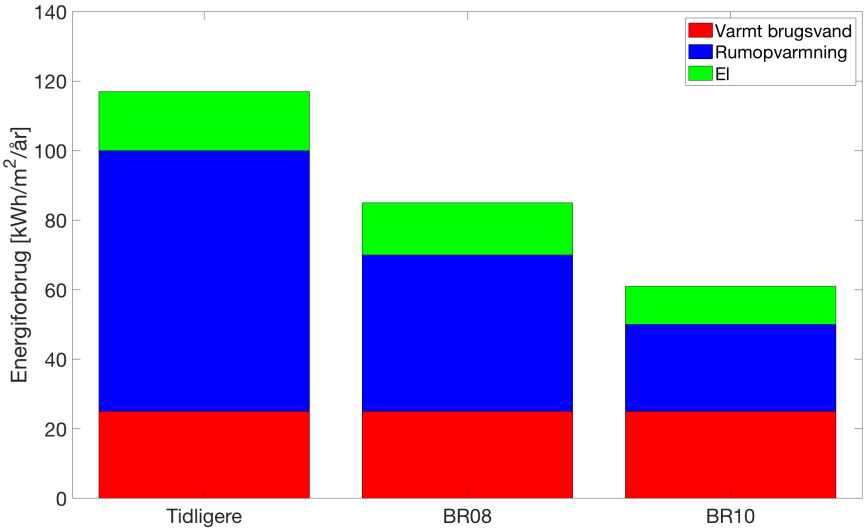
En energioptimal løsning har også en væsentlig betydning for, om en bygning kan overholde bygningsreglementets stadigt stigende krav til bygningens maksimalt tilladelige energiforbrug. Estimering af en bygnings årlige energiforbrug foretages ved en energirammeberegning, som sammenholdes med kravet til energiforbrug i det gældende bygningsreglement. Figur 1.3 viser udviklingen i krav til energirammen for boliger, kollegier, hoteller og lignende, fra det nuværende samt tidligere bygningsreglementer. Figuren afspejler energirammen for en bygning på $100\,\mathrm{m}^2$. [Bygningsreglementet, 2018] [Bygningsreglementet, 2015] [Bygningsreglementet, 2010] [Bygningsreglementet, 2008]



Figur 1.3. Udviklingen i energirammen for boliger, kollegier, hoteller og lignende for en bygning på $100\,\mathrm{m}^2$.

Af figur 1.3 fremgår en tydelig reduktion i det tilladelige energiforbrug for nye bygninger fra bygningsreglement BR08 i 2008 til BR18 i 2018. Fokusset, de seneste mange år, har været at reducere energiforbruget til rumopvarmmning samt el, hvorfor energiforbruget til varmt brugsvand, udgør en stigende andel af den samlede energiramme.

Figur 1.4 viser udvikling og fordeling af energiforbruget i danske husstande, inddelt i kategorierne varmt brugsvand, rumopvarmning og el, fra BR10, BR08 samt tidligere end BR08. [Anna Marszal-Pomianowska et al., 2019]



Figur 1.4. Udviklingen i det årlige energiforbrug til henholdsvis varmt brugsvand, rumopvarmning samt el. [Anna Marszal-Pomianowska et al. [2019], Redigeret]

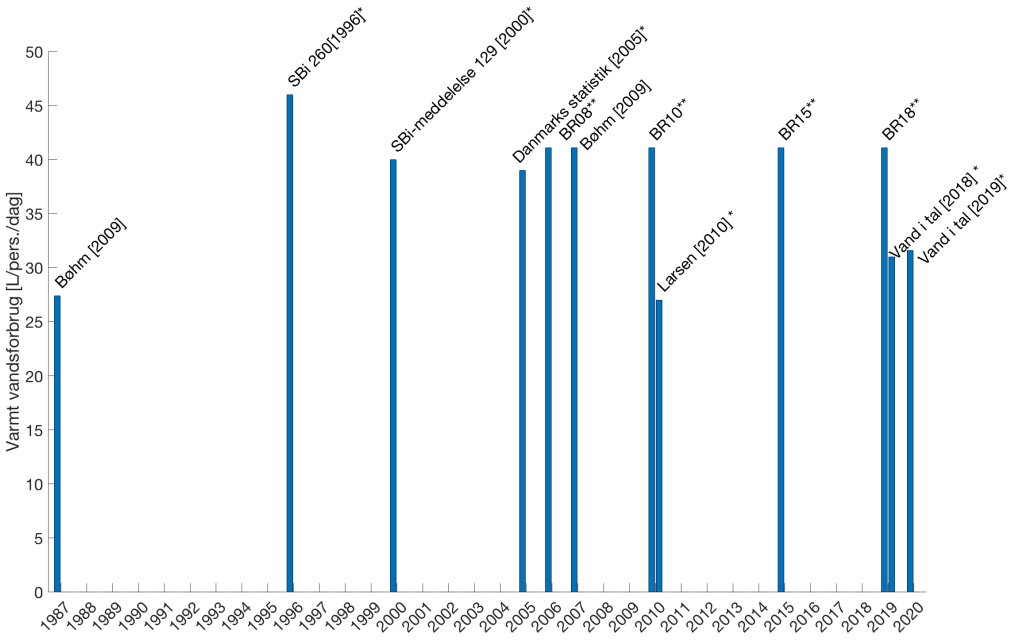
Figur 1.4 understreger, hvor fokusset for energioptimeringer af bygninger har været de seneste mange år. Energiforbruget til rumopvarmning er den parameter, der har udviklet sig mest med en reduktion fra 75 til 25 $\mathrm{kWh/m^2/år}$ i BR10. Energiforbruget til el er ligeledes reduceret fra 17 til 11 $\mathrm{kWh/m^2/år}$ i BR10. Det ses dog, at energiforbruget til varmt brugsvand er uændret med 25 $\mathrm{kWh/m^2/år}$, hvorfor den procentmæssige andel af det totale energiforbrug har ændret sig markant med en stigning fra 21 til 41 %. Det kan derfor konkluderes, at et øget fokus på reducering af energiforbruget til produktion og fordeling af det varme brugsvand er væsentligt, for at kunne reducere energiforbruget yderligere i fremtiden.

Udover metoden til produktion og fordeling af det varme brugsvand i bygninger, kan det være nødvendigt at foretage en revurdering af den nuværende standardværdi for det årlige varmtvandsforbrug, der benyttes til estimering af en bygnings energiforbrug. Det mulige behov for revurdering skyldes, at der, som tidligere nævnt, har været en stigning i andelen at varmt brugsvands. For boliger har standardværdien for varmtvandsforbrug på 250 $\mathrm{L/m^2}$ opvarmet etageareal pr. år været anvendt siden 2006, hvilket kan medføre at værdien ikke er repræsentativ for nuværende bygninger, hvorfor en korrigering kan være nødvendig. [Bøhm, 2009]

Med et uændret energiforbrug til varmt brugsvand, er der begrænsninger for, hvor meget det totale energiforbrug til en bygning kan reduceres. Denne reduktion besværliggøres ligeledes af manglende undersøgelser omhandlende forbruget af varmt brugsvand. Derfor er nye og omfattende studier af forskellige bygningstypers varmtvandsforbrug essentiel, for at kunne opnå en yderligere reduktion i energiforbruget til produktion og fordeling af varmt brugsvand.

1.1 Litteraturgennemgang

Som det fremgår af indledningen, har det primære fokus, for energibesparelser i danske bygninger, været en optimering af energiforbruget til rumopvarmning og el. Det manglende fokus på energiforbrug til varmt brugsvand har medført, at kravene dertil er forblevet uændrede. Derudover benyttes der samme standardværdi til estimering af boligers varmtvandsforbrug i energirammeberegninger som i år 2006, uden validering af, om den stadig er repræsentativ, hvilket kan ses på figur 1.5. [Bøhm, 2009]



Figur 1.5. Tidslinje for målte og estimerede varmtvandsforbrug, samt krav hertil, i Danmark. *: Disse studier er ikke beskrevet i litteraturgennemgangen. **: Angivet i [Aggerholm, 2018] til energirammeberegning.

Som det fremgår af figur 1.5, er der langt imellem større undersøgelser af danskernes varmtvandsforbrug, hvilket har medvirket til, at standardværdien i [Aggerholm, 2018], for de seneste fire bygningsreglementer, ikke er blevet valideret løbende, på trods af, at undersøgelser har vist, at varmtvandsforbruget har ændret sig med årene.

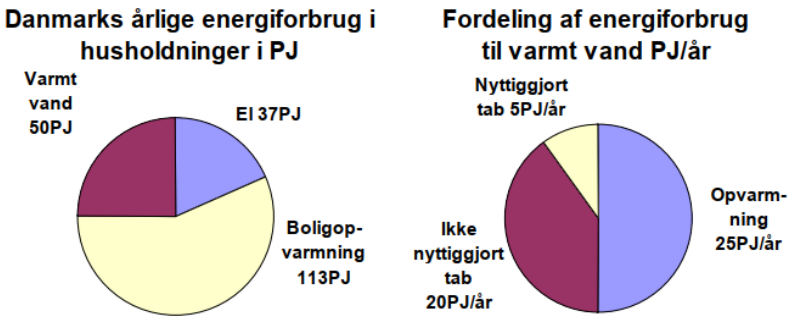
Som nævnt i forrige afsnit, er anddelen af varmtvandsforbruget vokset på nationalt plan, hvilket gør, at der er et øget behov for at udvikle energibesparende løsninger for varmt brugsvandssystemer, hvis ønsket om at reducere fremtidige bygningers samlede energiforbrug skal indfries. For at kunne afhjælpe nogle af disse problemstillinger, er der lavet en litteraturgennemgang for at undersøge, hvad tidligere studier har fundet frem til i forhold til varmtvandsforbrug, forbrugsmønstre og energitab relateret til cirkulationssystemer.

Det har ikke været muligt at finde studier omhandlende varmtvandsforbrug i kollegier. Studierne, som er beskrevet i litteraturstudiet omhandler derfor boligejendomme og enfamiliehuse i europæiske og nordamerikanske lande, som er tilnærmelsesvist sammenlignelige med Danmark. Studierne handler i stor grad om at afdække forbrugsmønstre og faktorer,

som påvirker forbruget af varmt brugsvand.

[Aggerholm, 2018], beskriver standardværdier til beregning af energirammer for danske bygninger, baseret på [Bygningsreglementet, 2018]. For boliger skal der antages et årligt varmtvandsforbrug på 250 L/m^2 opvarmet etageareal pr. år, dog maksimalt 60 m^3/år pr. bolig svarende til 4 personer. Selv hvis det kan dokumenteres, at varmtvandsforbruget vil være lavere end standardværdien, belønnes dette ikke, idet standardværdien stadig skal benyttes. Varmt og koldt brugsvand antages normalvist at have en temperatur på henholdvis 55 °C og 10 °C, hvilket giver en konstant temperaturforskel på 45 °C ved produktion af varmt brugsvand. Standardværdier kan være gode, når noget skal gøres ensartet og samligneligt, som det er tilfældet med energirammer. Til gengæld kan standardværdier også være lidt for unuancerede og skjule gode eller dårlige løsninger, særligt hvis de ikke er opdaterede i forhold til de aktuelle forbrugsmønstre. Dermed kan de uændrede standardværdier føre til manglende motivation til at investere i bedre varmt brugsvandsløsninger end nødvendigt i henhold til energirammeberegningen.

Et dansk studie fra 2009, beskrevet i SBi-rapporten [Bøhm, 2009] samt artiklen [Bøhm, 2012], foretog målinger for 24 eksisterende varmt brugsvandssystemer i danske bygninger, herunder 13 boligejendomme med 5-234 lejligheder, i perioden september 2006 til november 2007. Motivationen bag studiet var Energistyrelsens årlige energistatistik i 2007, [Energistyrelsen, 2007], som viste, at ca. 50 % af Danmarks samlede energiforbrug til varmt brugsvand går tabt til rør og vandvarmere, hvoraf kun en femtedel af dette tab kunne nyttiggøres til rumopvarmning, da varmetabene oftest sker i rum med udsugning. Dette kan ses på figur 1.6.



Figur 1.6. Fordeling af energiforbrug i husholdninger, hvor det samlede forbrug er 200 PJ/år, og fordeling af energiforbrug til varmt brugsvand. [Bøhm, 2009]

Studiets undersøgelser viste, at danskeres varmtvandsforbrug var 1,4-4,3 m^3/lejlighed/måned, og udgjorde mellem 28 og 34 % af de undersøgte boligers samlede energiforbrug. Heraf blev det forventet, at en del skyldes anvendelsen af cirkulationssystemer. De typiske cirkulationstab, som studiet fandt for forskellige bygningskategorier, er vist i tabel 1.1.

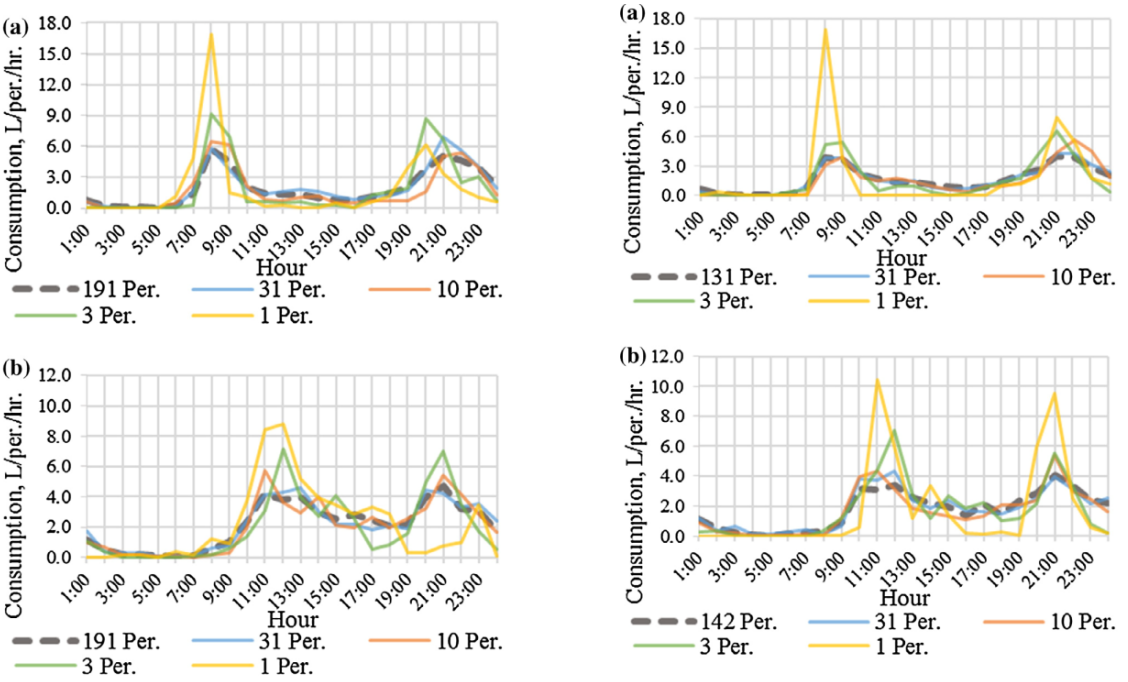
Bygningskategori		**Typiske cirkulationstab**
Enfamiliehuse	Småhuse	0 - 60 %
Boligejendomme	Etageblokke	30 - 75 %
Erhvervsejendomme	Ejendomme med andet end boliger	50 - 90 %

Tabel 1.1. Typiske cirkulationstab for forskellige bygningstyper. [Bøhm, 2009]

Derudover viste resultaterne, at cirkulationssystemer fører til en dårligere afkøling af varmeforsyningen. Her blev der målt en afkøling mellem 19 og 45 °C for etageboliger samt 11 og 24 °C for kontorbygninger. En lav afkøling er et tegn på dårlig udnyttelse af energien i varmeforsyningen og afspejler et varmt brugsvandssystem med et ineffektivt cirkulationssystem. For boligejendomme kunne [Bøhm, 2009] ikke påvise nogen væsentlig forskel mellem en trebenet vekslerløsning og en fembenet løsning med varmtvandsbeholder, da varmetabene fra de to systemtyper opvejer hinanden. For kontorbygninger med lavt varmtvandsforbrug viste det sig at være en fordel med decentral, el-baseret varmt brugsvandsproduktion direkte ved tapstedet, da energibesparelsen ved at undgå varmetab fra varmt brugsvands- og cirkulationsrør er større end merudgiften til el, på trods af primærenergifaktoren på 2,5 for el. Grundet primæreenergifaktoren for el er det dog nødvendigt med detaljerede beregninger for, hvorvidt eltracing er rentabelt sammenlignet med et traditionelt cirkulationssystem.

I 2006 færdiggjorde [Toode, 2006] et studie omhandlende tendenser i estiske boligejendomme på baggrund af måledata fra perioden 1974 - 2004, med henblik på at sammenligne faktiske maksimum forbrug af varmt brugsvand med standardværdier. Heraf blev varmtvandsforbruget for 2004 fastlagt til 44 L/pers./døgn. Studiet viste, at varmtvandsforbruget er faldet med årene, fra gennemsnitligt 2,8 L/m^2/døgn i 1999 til 2,0 L/m^2/døgn i 2004, og at de faktiske, målte varmtvandsforbrug er væsentligt mindre end de standardværdier, som var gældende på daværende tidspunkt.

I 2015 foretog [Kaiser Ahmed, 2015] et finsk studie, hvor det daglige varmtvandsforbrug blev målt for 182 lejligheder med 379 beboere, fordelt på fire boligejendomme, i perioden januar 2012 til juni 2014. Studiet viste, at varmtvandsforbrugets fordeling er afhængigt af antal beboere, hvor størstedelen af forbrugene var mellem 20-70 L/person/døgn, med et gennemsnit på 43 L/person/døgn for hele året. Studiet påviste, at der forekommer sæsonvariationer, hvor varmtvansforbruget er lavest om sommeren, med et gennemsnit på 35 L/pers./døgn i juli, og højest om vinteren, med et gennemsnit på 48 L/pers./døgn i november. I 2016 foretog Kaiser Ahmed [2016] endnu et finsk studie, hvor varmtvandsforbruget blev målt på timebasis for 86 lejligheder med i alt 191 beboere, i perioden maj 2014 til februar 2015. Ud fra en sammenligning med måleresultaterne fra det tidligere studie Kaiser Ahmed [2015], kunne det konkluderes, at det daglige varmtvandsforbrug kun var forandret med maksimum 6 %. På baggrund af måledataene blev der udviklet timelige forbrugsprofiler for fem forskellige størrelsesgrupper på henholdsvis 1, 3, 10, 31 og over 50 personer. Profilerne blev desuden inddelt i hverdage og weekender. Figur 1.7 viser de foreslåede forbrugsprofiler.



Figur 1.7. Foreslåede forbrugsprofiler for varmt brugsvand. *a* er for hverdage og *b* er for weekender. Profilerne til venstre og højre er for henholdsvis november og august. [Kaiser Ahmed, 2016]

Formålet med profilerne, som kan ses på figur 1.7, var at kunne estimere det timevise og daglige varmtvandsforbrug ud fra antallet af beboere. Ved at sammenligne profilerne for de forskellige persongrupper, kan det ses, at der er større udsving for grupper med få personer, hvorimod forbruget er mere stabilt for grupper med mange personer. Ud fra måledataene blev der desuden fundet to spidsbelastningsperioder, morgen og aften, hvilke ligeledes kan ses på figur 1.7. I hverdagene lå spidsbelastningerne mellem kl. 7-9 og kl. 20-22, med et gennemsnitligt varmtvandsforbrug på henholdsvis 4,1 og 1,1 L/pers./time i og udenfor spidsbelastningsperioderne. I weekenderne forekom morgenspidsbelastningerne omkring 2-3 timer senere end i hverdagene, hvorimod aftenspidsbelastningen forekom i samme tidsperiode som for hverdage. Her var det gennemsnitlige varmtvandsforbrug henholdsvis 3,6 og 1,4 L/pers./time i og udenfor spidsbelastningsperioderne. Konklusionen er derfor, at der er stor forskel på forbruget i og udenfor perioder med spidsbelastning, hvorfor det er vigtigt at tage højde for disse ved dimensionering af varmt brugsvandssystemer.

I 2018 foretog [E. Fuentes, 2017] en gennemgang af nyere studier og internationale tekniske standarder, som viste, at der er stor variation i varmtvandsforbruget alt efter, hvilket land der er tale om, samt socioøkonomiske faktorer såsom brugernes alder, køn, uddannelsesniveau og indkomst. Dog er studierne enige om, at der forekommer betydelige sæsonvariationer, hvoraf der generelt er et større varmtvandsforbrug mellem november og februar, samt et lavere forbrug mellem maj og august. Derudover er de enige om, at størstedelen af varmtvandsforbrug i boliger går til bade, helt op til ca. 70 % ifølge både et britisk og et amerikansk studie. Konklusionen var, at der mangler studier til at validere de tekniske standarder, særligt med henblik på udviklingen, som medfører faldende vandforbrug. Derudover mangler der i høj grad målinger af varmtvandsforbruget i andre bygningstyper end boliger, hvor der tages højde for sæsonvariationer og socioøkonomiske

faktorer.

En måde at reducere det overordnede varmetab og dermed øge effektiviteten, kan være ved at indføre lavtemperaturfjernvarme, LTFV. I 2014 udarbejdede det danske studie [Peter Kaarup Olsen et. al., 2014] nogle retningslinjer for LTFV, som er defineret ved at have en fremløbstemperatur på ned til 50 °C, og en returtemperatur ned til 20 °C. Retningslinjerne blev lavet på baggrund af målinger fra danske enfamiliehuse og lejlighedsbyggerier, som er foretaget i perioden 2008-2013. Konklusionen var, at en fremløbstemperatur på 50 °C er tilstrækkelig til at producere varmt brugsvand på 45 °C uden behov for øvrige foranstaltninger, hvis der benyttes en højeffektiv veksler med eller uden fjernvarmebeholder for enfamiliehuse. For lejlighedsbyggerier anbefales samme løsning, hvor hver lejlighed har sin egen separate veksler. Ved at bruge vekslere uden at have cirkulation, undgås legionella helt automatisk. Desuden blev det konkluderet, at et skift fra traditionel fjernvarme til LTFV både vil reducere varmetab fra rørnettet og risiko for lækager, minimere vedligeholdelsesomkostrninger af rør, samt muliggøre en bedre udnyttelse af alternative energikilder, såsom jordvarme og varmepumper, og give en bedre effektivitet hos forbrugeren.

I 2019 færdiggjorde Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen [2019] et studie omhandlende varmtvandsforbrug i tre danske enfamiliehuse. Ud fra målingerne kunne det konstateres, at to af de tre boligers største varmtvandsforbrug forekom i bruserne længst væk fra teknikrummene, hvilket medførte betydelige vandspild på grund af lang ventetid. Derudover blev der observeret korte tapninger ved køkkenvaske og håndvaske, som stoppede inden det varme brugsvand nåede frem, hvilket medførte unødvendigt energiforbrug til produktion af varmt brugsvand. De daglige og årlige varmtvandsforbrug blev fastlagt til følgende, vist i tabel 1.2.

Bolig nr.	**[L/bolig/døgn]**	**[L/person/døgn]**	**[L/m^2/år]**
1	88	22	166
2	44	22	101
3	183	46	525

Tabel 1.2. Varmtvandsforbrug for tre enfamiliehuse. [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019]

Bolig 3, som er den ældste af de tre boliger, havde også det største varmtvandsforbrug, hvilket forventes at skyldes forbrugsmønstre og gamle brugsvandsinstallationer. Da standardværdien for årligt varmtvandsforbrug, beskrevet i [Aggerholm, 2018], afviger væsentligt fra resultaterne, blev der argumenteret imod at fastlægge boligers årlige varmtvandsforbrug ud fra arealet alene, men i stedet inddrage faktorer som antal personer eller tapsteder. Studiets undersøgelser viste, at benyttelse af mere retvisende, årlige varmtvandsforbrug i energirammeberegningerne gav væsentlige forbedringer af energirammenerne, sammenlignet med anvendelse af standardværdien på 250 L/m^2/år i [Aggerholm, 2018].

1.1.1 Diskussion

De forskellige, omtalte kilder tager alle udgangspunkt i varmt brugsvand, men har forskellige indgangsvinkler, hvilket påvirker længden af de anvendte måleperioder, hvormed der er varierende usikkerhed for deres konklusioner.

En sammenligning af de udenlandske og det danske studie angående boligejendomme viste en afvigelse i de målte, gennemsnitlige varmtvandsforbrug, hvilket fremgår af figur 1.8. Ved sammenligning af måleperioderne for [Bøhm, 2009] og [Kaiser Ahmed, 2015], hvilke er henholdsvis 14 og 18 måneder, er det vurderet, at afvigelsen mellem de fundne varmtvandsforbrug ikke skyldes måleperiodernes længde. Afvigelserne mellem de føromtalte studier kan derimod skyldes nationale forskelle, samt forskelle i beboersammensætningerne, som omtalt i studiet [E. Fuentes, 2017].

Af de studier, som foretager målinger selv, har både [Toode, 2006], [Bøhm, 2009], [Kaiser Ahmed, 2015] og [Kaiser Ahmed, 2016] en stor datagruppe, hvilket øger resultaternes troværdighed. I kontrast til dette, har studiet [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019] en meget lille datagruppe, hvor flere undersøgelser er nødvendige for at kunne validere resultaterne, før der kan laves en generalisering.

Manglen på studier, angående varmtvandsforbruget i forskellige, danske boligtyper, herunder kollegier, understreger behovet for at foretage flere målinger af danskernes varmtvandsforbrug, for at få et realistisk billede af det nuværende varmtvandsforbrug. Desuden understreger den observerede udvikling i varmtvandsforbruget vigtigheden af at foretage nye målinger løbende, så varmt brugsvandsløsningerne kan tilpasses de faktiske behov og forbrugsmønstre. En oversigt over de gennemgåede studier kan ses i figur 1.8 på modstående side.

1.1.2 Opsummering

Konklusionen er, at der er sket en udvikling i varmtvandsforbruget i Danmark gennem årene, hvilket kan ses ved, at forbruget af varmt brugsvand er steget, hvormed det udgør en stigende andel af det totale vandforbrug for husholdninger. [Bøhm, 2009] viste desuden, at cirkulation spiller en væsentlig rolle i forhold til brugsvandssystemets samlede effektivitet og varmetab, hvilket understreger vigtigheden af at have fokus på at undgå cirkulation så vidt som muligt, ved design af brugsvandssystemer. På baggrund af udviklingen og antallet af målinger, som er foretaget gennem de seneste årtier, kan det konkluderes, at der er behov for at foretage flere og mere detaljerede målinger af danskernes nuværende varmtvandsforbrug for at få et troværdigt billede af det faktiske forbrug. Derudover er der behov for detaljerede målinger fra flere forskellige bygningstyper, da langt størstedelen af målinger er foretaget for boliger.

Studie	Boligtype	Varighed	Måleopløsning	Geografisk placering	Varmtvandsforbrug	Øvrige resultater
SBi 213, Aggerholm [2006, 2010, 2015, 2018]				Danmark	250 L/m^2/år, dog max 60 m^3/bolig/år.	
Kõiv og Toode [2006]	Flere boligejendomme	1974 til 2004	1 måling pr. uge	Estland	44 L/pers./døgn i år 2004, svarende til 2,0 L/m^2/døgn.	
Bøhm [2009] og Bøhm [2012]	24 bygninger af forskellig type, herunder boligejendomme, kontorer, skoler, m.fl.	14 måneder	1 måling pr. 5. minut	Danmark	1,4-4,3 m^3/lejlighed/måned	Cirkulationstab udgør følgende andele af energiforbrug til varmt brugsvandssystemer: - 0-60 % af for enfamiliehuse, - 30-75 % for boligejendomme - 50-90 % for erhvervsejendomme. Afkøling af fjernvarme er: - 19-45 °C for boligejendomme - 11-24 °C for erhvervsejendomme.
Ahmed [2015]	182 lejligheder i 4 boligejendomme med 379 beboere	Januar 2012 til juni 2014	1 måling pr. time	Finland	20-70 L/pers./døgn Gennemsnit på 43 L/person/døgn	Varmtvandsforbrug udgør 35-41 % af totalt vandforbrug med et gennemsnit på 39 %. Der blev observeret sæsonvariationer.
Ahmed [2016]	86 lejligheder med 191 beboere	Maj 2014 til februar 2015	1 måling pr. time	Finland	0-20 L/pers./time for 90 % af måledata	
Olsen et. al [2014]				Danmark		LTFV er tilstrækkelig til at opfylde krav til sikkerhed og komfort.
Jørgensen & Knudsen [2019]	3 enfamiliehuse	2-3 uger	8 målinger pr. sekund	Danmark	44-183 L/bolig/døgn 22-46 L/pers./døgn 101-525 L/m^2/år	

Figur 1.8. Oversigt over de gennemgåede studier.

Problembeskrivelse 2

Som beskrevet i kapitel 1, har der i en længere årrække været et stort fokus på energioptimering af danske bygningers energiforbrug til rumopvarmning og el, imens energiforbruget til produktion og distribution af varmt brugsvand har været ignoreret og derfor er forblevet nogenlunde konstant. Samtidig er der sket en andelsmæssig stigning i varmtvandsforbruget, hvilket har medført, at energiforbruget til varmt brugsvandssystemer udgør en stadigt stigende anddel af danske bygningers samlede energiforbrug. For at muliggøre yderligere energioptimeringer af danske byggerier i fremtiden, er det derfor nødvendigt at opnå et øget kendskab til varmt brugsvandssystemers effektivitet og energiforbrug, med henblik på at identificere potentielle energibesparelser.

Ydermere er det blevet påvist, at cirkulationssystemer kan udgøre væsentlige andele af varmt brugsvandssystemers energiforbrug, hvorfor det er vigtigt at undersøge løsninger til optimering af energiforbruget i forbindelse med cirkulationssystemer.

Udover det manglende fokus på varmt brugsvandssystemers energiforbrug, er der ligeledes kun udført et begrænset antal studier af danskernes varmtvandsforbrug og dertilhørende forbrugsmønstre. Det manglende kendskab til retvisende varmtvandsforbrug besværliggør fastsættelse af nye, skærpede krav til bygningers varmtvandsforbrug. De undersøgte boligtyper udgør primært boligejendomme og enfamiliehuse, hvorfor forbrugsmønstre for andre boligtyper, såsom kollegier, fortsat er forholdsvist ukendte. Derfor er der fortsat et behov for udførelse af nye studier, med henblik på fastsættelse af aktuelle varmtvandsforbrug.

2.0.1 Problemformulering

Dette projekt er udført med fokus på besvarelse af nedenstående problemstillinger:

1. Hvordan forholder varmtvandsforbruget og dertilhørende forbrugsmønstre sig på et kollegium, sammenholdt med andre boligtyper?

2. Hvilken indflydelse har cirkulationssystemet på energiforbrug og -tab i undersøgte varmt brugsvandssystem med henblik på opnåelse af ubesværet ventetid?

2.1 Metode og afgrænsning

Til besvarelse af problemformuleringen, er der i projektperioden foretaget målinger af henholdsvis varmt brugsvand, fjernvarme og cirkulation for et varmt brugsvandssystem i et dansk kollegium. Grundet at der kun er udført målinger for én kollegiebygning, og at

der ikke tidligere er udført målinger af denne type for kollegiebygninger, kan resultaterne ikke generaliseres efterfølgende.

Forud for målingerne er der foretaget en kalibrering af det anvendte måleudstyrs målenøjagtighed, med henblik på at kvalitetssikre de foretagede målinger i den efterfølgende databehandling. Der er foretaget en detaljeret dataopsamling og analyse af den undersøgte kollegiebygnings varmt brugsvandssystem, ved at montere måleudstyr med en måleopløsning på 1 minut på vekslerens primær- og sekundærside, det vil sige fjernvarme, varmt brugsvand og cirkulation. På baggrund af den opsamlede måledata er varmt brugsvandssystemets effektivitet og fjernvarmeudnyttelse, samt andelen af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, som går til dækning af cirkulationstab, bestemt.

Dertil er der foretaget dataopsamling med en måleopløsning på 8/sekund for seks udvalgte tapsteder. Grundet tekniske udfordringer, er disse dataopsamlinger ikke anvendelige til estimering af reelle varmtvandsforbrug, dog er de pålidelige på alle øvrige parametre. I kombination med den øvrige dataopsamling, er der foretaget en detaljeret analyse af varmt brugsvandssystemets energiforhold i forbindelse med tapninger, hvor ventetider, rørtab, vekslertab og vandspild er fastlagt. Derudover er beboernes forbrugsmønstre undersøgt på bygningsniveau og for udvalgte tapsteder. Dertil er der udført simuleringer af en simplificeret udgave at kollegiets varmt brugsvandssystem, hvor optimeringsforslag er undersøgt i forhold til at fremtiddsikre kollegiebygningens varmt brugsvandsproduktion i henhold til gældende standarder for komfort og sikkerhed.

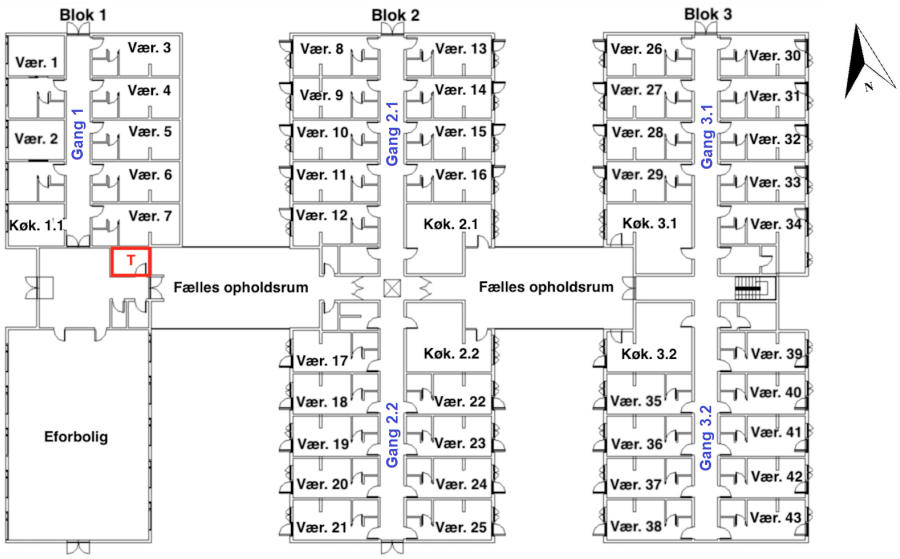
Casebygning og måleplan 3

Dette kapitel redegør for den udvalgte casebygning, Aalborgkollegiet, herunder planløsning og det eksisterende varmt brugsvandssystems opbygning. Dertil beskrives placering af måleudstyr og formålet med de foretagede målinger på Aalborgkollegiet, som danner grundlag for de foretagede analyser i rapportens øvrige afsnit.

Dataopsamlingen på Aalborgkollegiet er inddelt i tre måleperioder og er udført på både bygnings- og tapstedsniveau, med henholdsvis Brunata energimålere og Huba flowmålere. Ovennævnte skal sikre, at måledataene afspejler formålene med analyserne beskrevet i rapportens øvrige kapitler.

3.1 Aalborgkollegiet

Aalborgkollegiet er en beboelsesbygning til studerende, som blev opført i 1968 og ligger på Scoresbysundvej i Aalborg SØ, Danmark. Bygningen har et opvarmet etageareal på 2048,6 m^2 og består af tre blokke, som er forbundet af to fælles opholdsrum, hvilket kan ses på figur 3.1. Alle blokke består af en stueetage, hvoraf blok 3 desuden indeholder en kælderetage, som er vist i Appendiks A.0.2. Aalborgkollegiet indeholder en eforbolig og 48 kollegieværelser, hvor der bor én beboer pr. kollegieværelse. Af de 48 kollegieværelser, er 46 stk. 1-værelses- og to stk. er 2-værelsers.



Figur 3.1. Plantegning for stueetagen på Aalborgkollegiet. Det røde T viser placeringen af Aalborgkollegiets teknikrum.

Kollegieværelserne er fordelt på seks gange. Hver gang har eget fælleskøkken, hvoraf de fire fælleskøkkener i stueetagen i blok 2 og 3 har to køkkenvaske pr. køkken, imens fælleskøkkenerne i gang 1 og kælder har én køkkenvask pr. køkken. Kollegieværelserne blev oprindeligt opført med egen håndvask, hvilke ved en renovering i 1993 blev erstattet med badeværelser. Udover kollegieværelser og et fælleskøkken, indeholder kælderen diverse fællesrum og depotrum.

3.1.1 Varmt brugsvandsinstallationer

Aalborgkollegiets produktion af varmt brugsvand sker via en veksler tilsluttet fjernvarme, som er placeret i teknikrummet vist på figur 3.1 markeret med rød tekst. Veksleren er af ældre dato og forventes at være fra opførselsåret, hvorfor eforen får den afsyret med ukendt hyppighed. Aalborgkollegiets cirkulationssystem drives af en Grundfos Alpha2 25-60 180-pumpe, der er placeret i teknikrummet med de øvrige tekniske komponenter. Figur 3.2 og 3.3 viser henholdsvis Aalborgkollegiets teknikrum samt veksleren til produktion af varmt brugsvand set uden isolering.

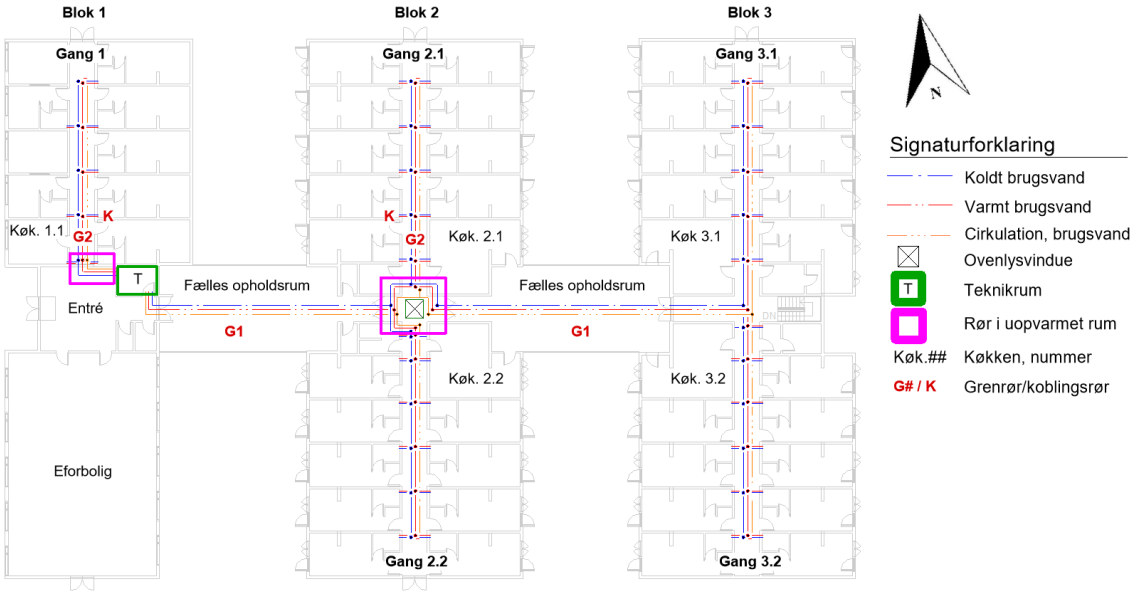
Figur 3.2. Teknikrummet på Aalborgkollegiet.

Figur 3.3. Aalborgkollegiets veksler til produktion at varmt brugsvand set oppefra, uden isolering.

Fra teknikrummet deler vandrørene sig i tre rørsæt, som hver består af henholdsvis koldt og varmt brugsvand samt cirkulation. De tre rørsæt fordeler sig som følgende:

1. Forsyning af gang 1
2. Forsyning af blok 2 og 3
3. Forsyning af eforboligen

Figur 3.4 viser rørføringen for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem i stueplan, med undtagelse af rørføring til eforboligen og tilslutning til kælder, da disse føringsveje er ukendte.



Figur 3.4. Oversigt over rørføring i stueplan.

På baggrund af en visuel inspektion er det vurderet, at rørsæt 1 og 2 primært føres i nedhængt loft, med undtagelse af to steder, hvor rørene føres i uopvarmet tagrum, hvilket er markeret med lilla omrids på figur 3.4. Ud fra en inspektion af rørisoleringen er det vurderet, at rørene i nedhængt loft, samt på kollegieværelsernes badeværelser, er fra renoveringen i 1993, imens de resterende rør er vurderet til at være fra opførselsåret i 1968.

Rørstrækningerne er inddelt i tre kategorier, afhængig af deres funktion, hvilket er listet nedenfor og ligeledes fremgår af figur 3.4.

- Hovedrør, H: Rør i teknikrummet inden afgreninger
- Grenrør: Fordeler brugsvandet fra hovedrør til koblingsrør. Heraf er der to typer:

  Langsgående, G1: Fordeler brugsvandet fra hovedrør til tværgående grenrør i blok 2 og 3.

  Tværgående, G2: Forsyner koblingsrørene på hver separat gang
- Koblingsrør, K: Bindeled mellem grenrør og tapsteder

Fremadrettet i rapporten, refereres der til ovennævnte kategorier.

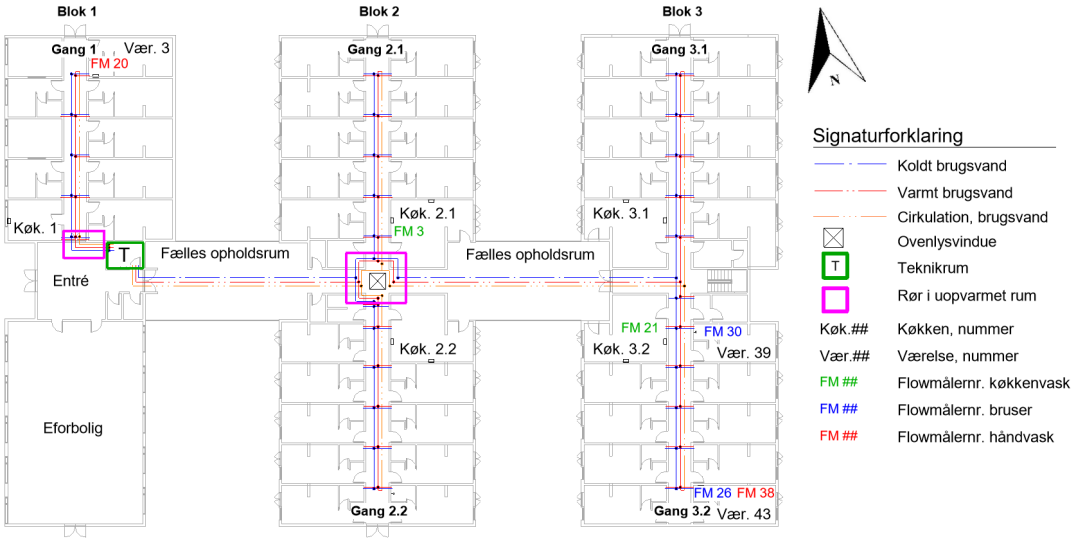
3.2 Måleplan

Dette afsnit redegør for placeringen af måleudstyr, samt inddelingen af måleperioder, i forbindelse med dataopsamling på Aalborgkollegiet. Redegørelsen danner grundlag for analyserne af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem samt forbrugsmønstre. Målingerne er foretaget med Brunata energimålere og Huba flowmålere, som er beskrevet nærmere i kapitel 4.

Brunata energimålerne er monteret på rørtilslutningerne til veksleren i teknikrummet, for at foretage dataopsamling for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, med henblik

på at bestemme og undersøge parametre, såsom bygningens samlede varmtvandsforbrug, cirkulationstab og varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug. Huba flowmålerne er monteret ved specifikke tapsteder, og foretager dataopsamling for udvalgte håndvaske og brusere i kollegieværelsernes badeværelser, samt for køkkenvaske i udvalgte fælleskøkkener, som anvendes til at undersøge forbrugsmønstre for et kollegium.

Figur 3.5 viser placeringen af det anvendte måleudstyr. Brunata energimålerne er monteret i teknikrum, hvor Huba flowmålerne er monteret i udvalgte rum. Baggrunden for placeringen af Brunata energimålerne og Huba flowmålerne, er beskrevet nærmere i afsnit 3.2.2 og 3.2.3.



Figur 3.5. Oversigt over placering af måleudstyr på Aalborgkollegiet. Brunata energimålerne er placeret i teknikrummet.

3.2.1 Måleperioder

Dataopsamlingen er inddelt i tre forskellige måleperioder, som vist i tabel 3.1. Formålet med inddelingen i måleperioder er at tage højde for begivenheder med signifikant indflydelse på måledataene, i de foretagede analyser.

Nr.	Måleperiode	Udstyr	Nøgleord
1	2/11-2019 - 12/3-2020	Brunata energimålere	Typiske forbrugsmønstre
2	13/3-2020 - 24/3-2020	Brunata energimålere Huba flowmålere	Ny cirkulationsindstilling, Coronanedlukning Forbrugsmønstre ved tapsteder, Coronanedlukning
3	27/3-2020 - 19/04-2020	Brunata energimålere	Afsyring af veksler, Coronanedlukning

Tabel 3.1. Oversigt over tidsperiode, anvendt måleudstyr og nøgleord for hver af de tre måleperioder.

I måleperiode 1 opsamles data for Aalborgkollegiets eksisterende varmt brugsvandssystem, med det formål at have en reference ved undersøgelse af effekten af foretagede ændringer i varmt brugsvandssystemet.

I måleperiode 2 er der foretaget en ændring af Aalborgkollegiets cirkulationspumpe fra variabelt til konstant cirkulationsflow. Formålet med ændringen er at undersøge cirkulationspumpens betydning for fjernvarmeforbruget, samt hvorledes ventetiden for

varmt brugsvand påvirkes. Grundet tekniske problemer, var det kun muligt at foretage dataopsamling med Huba flowmålerne i måleperiode 2, hvorfor der i denne periode er foretaget målinger på tapstedsniveau for udvalgte tapsteder.

Under måleperiode 2 og 3 er Danmark ramt af en verdensomspændende pandemi med Coronavirussen SARS-CoV-2. Som følge af pandemien, har den danske regering lukket offentlige institutioner og påbudt studerende at arbejde hjemmefra, hvilket påvirker Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug og forbrugsmønstre, som beskrevet i kapitel 6. Som følge af Coronanedlukningens påvirkning af beboernes varmtvandsforbrug, er der derfor foretaget en forbrugerundersøgelse med fokus på beboernes badevaner og tilstedeværelse på Aalborgkollegiet i Coronanedlukningen. Besvarelserne er efterfølgende anvendt til vurdering af, hvor repræsentative måledataene for tapsteder er. Resultaterne af forbrugerundersøgelsen er beskrevet i Appendiks C.

I måleperiode 3 er Aalborgkollegiets veksler blevet afsyret, hvoraf dennes effekt på varmt brugsvandssystemets effektivitet er undersøgt nærmere i kapitel 9.

De følgende afsnit giver en mere dybdegående beskrivelse af måleopsætningen for henholdsvis teknikrum og tapsteder.

3.2.2 Bygningsniveau

For at kunne måle Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, er tre Brunata energimålere, benævnt nr. 29, 30 og 44, anvendt. Brunata energimålerne er monteret på rørtilslutningerne for henholdsvis koldt brugsvand, cirkulation og fjernvarme til veksleren i Aalborgkollegiets teknikrum, vis placering fremgår af figur 3.5. Hver Brunata energimåler registrerer en frem- og returløbstemperatur, volumen samt flow, hvoraf et energiforbrug kan beregnes. Dette er ligeledes beskrevet i kapitel 4 omhandlende måleudstyr. For at lagre Brunata energimålernes måledata, er de tilsluttet en DCU, hvorfra måledataene kan tilgås med en computer, hvilket fremgår som "Elektronisk udstyr" på figur 3.6.

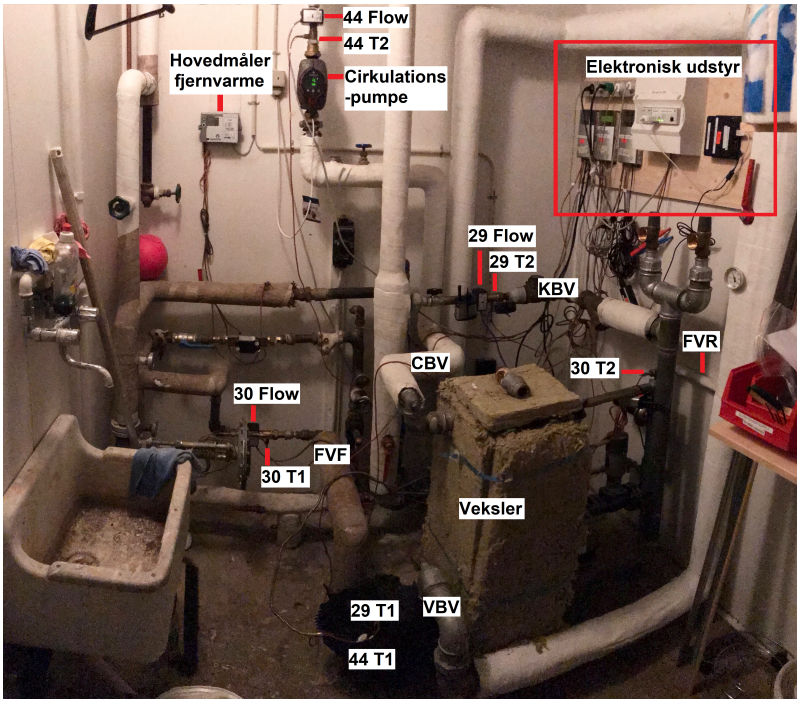
Tabel 3.2 viser en oversigt over de tre Brunata energimålere, med tilhørende sensornavne og -placeringer, samt tilknytning til varmt brugsvandsssystemet.

Brunata energimåler	**Sensor**	**Placering**	**Tilknytning til VBV-system**
29	29 Flow	Koldt brugsvand, KBV	Varmt brugsvand
	29 T1	Varmt brugsvand, VBV	
	29 T2	Koldt brugsvand, KBV	
30	30 Flow	Fjernvarme fremløb, FVF	Fjernvarme
	30 T1	Fjernvarme fremløb, FVF	
	30 T2	Fjernvarme returløb, FVR	
44	44 Flow	Cirkulation, CBV	Cirkulation
	44 T1	Varmt brugsvand, VBV	
	44 T2	Cirkulation, CBV	

Tabel 3.2. Tilknytning og placering af Brunata energimålernes sensorer. Alle sensorer er placeret på rørtilslutninger til veksleren. Flow står for flowsensor, og T1 og T2 står for temperatursensor.

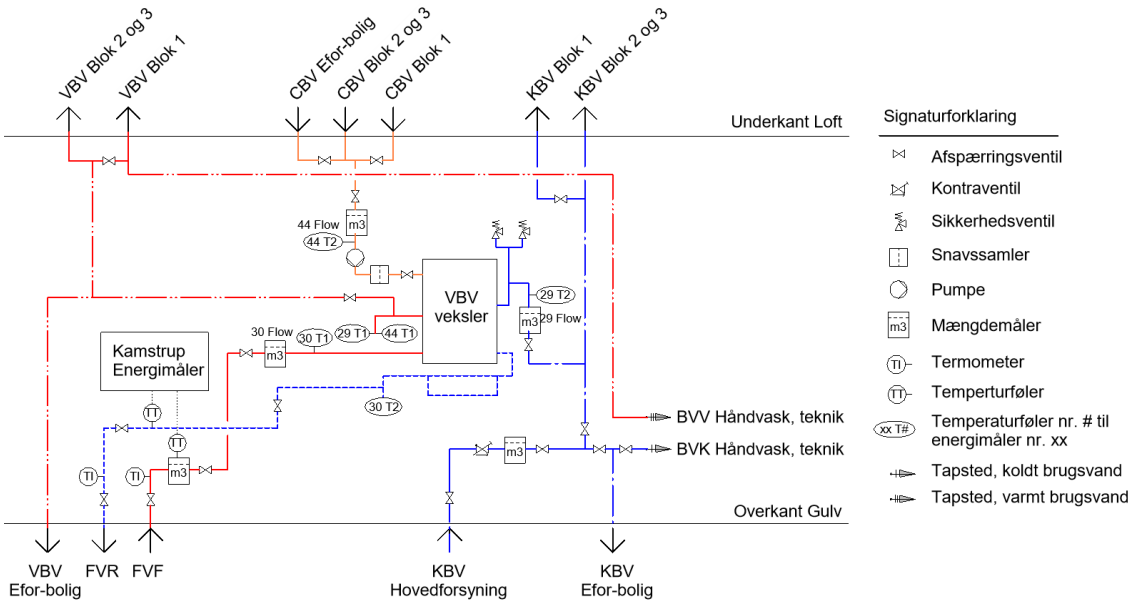
Som det fremgår af tabel 3.2, er de tre Brunata energimålere tilknyttet hver sin del af varmt brugsvandssystemet, som benyttes i de forskellige analyser af parametre

såsom varmtvandsforbrug samt energiforbrug og -tab i varmt brugsvandssystemet. Brunata energimålernumrene er anvendt gennem hele rapporten, hvorimod de tilhørende sensornavne er anvendt i dette kapitel samt kapitel 5, hvor der refereres til specifikke sensorer. Sensorerne, præsenteret i tabel 3.2, og deres placering i teknikrummet fremgår af figur 3.6.



Figur 3.6. Aalborgkollegiets teknikrum med dertilhørende varmt brugsvandsinstallationer og placering af Brunata energimålerne. Placering af 29 T1 og 44 T1 er vist med nærbillede i Appendiks A.0.2.

Af hensyn til overskueligheden, er der lavet et principdiagram over de primære elementer i Aalborgkollegiets brugsvandsinstallationer, samt placeringen af energimålernes sensorer heri, hvilket fremgår af figur 3.7.



Figur 3.7. Simplificeret principdiagram over Aalborgkollegiets brugsvandssystem samt Brunata energimålernes sensorplaceringer. Se stor udgave i Appendiks B.

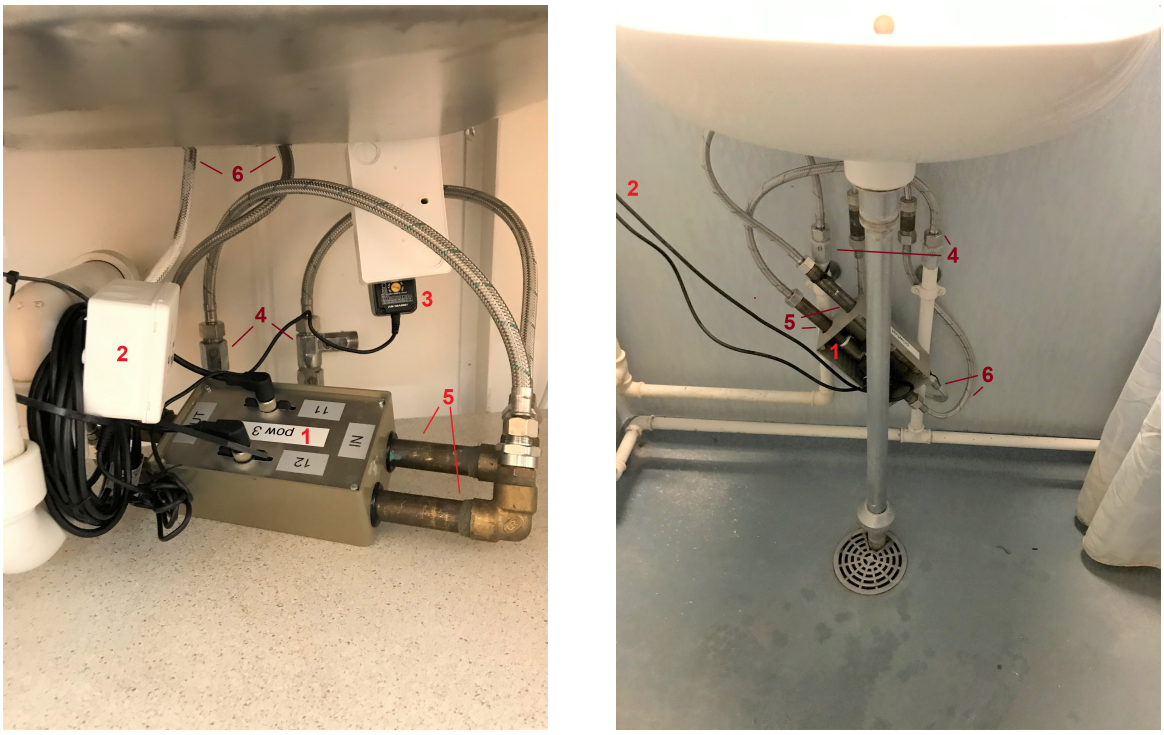
3.2.3 Tapstedsniveau

På Aalborgkollegiet er der foretaget målinger af varmtvandsforbruget for to håndvaske, to brusere og to køkkenvaske, som vist på figur 3.5. Formålet med dataopsamlingen for forskellige typer tapsteder er at undersøge nogle af de forbrugsmønstre, som kan forekomme på et kollegium.

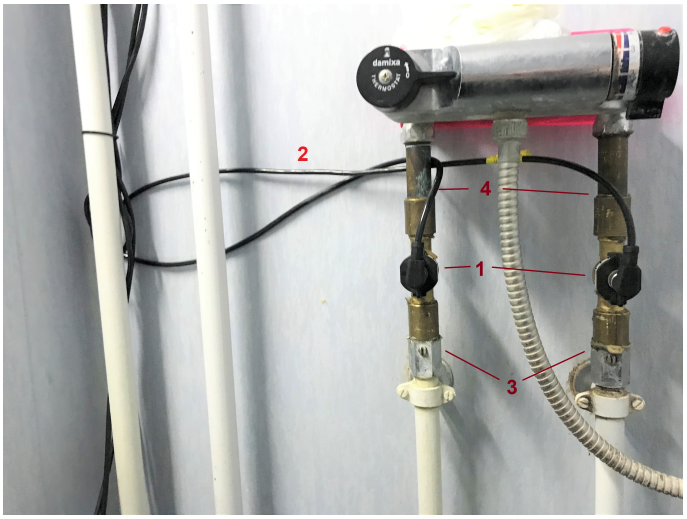
Den oprindelige plan var at anvende Huba flowmålere ved 14 tapsteder, hvorfor disse blev monteret på Aalborgkollegiet. Grundet tekniske problemer var det kun muligt at måle på seks tapsteder på samme tid, hvorfor det blev valgt at måle på to af hver type tapsted, for at kunne sammenligne de forskellige tapstedstyper med hinanden. De tekniske problemer er vurderet til at skyldes løse forbindelser i de berørte arduinoers strømforsyninger, som er monteret ved tapstederne, hvilket er registreret ved testning med et multimeter. Arduinoerne er beskrevet nærmere i kapitel 4.

For køkkenerne var det tiltænkt at opsamle data for begge køkkenvaske i henholdsvis køkken 2.1 og køkken 3.2, men i henhold til ovenstående, var dette ikke muligt. Derfor blev det valgt at måle for én køkkenvask i hvert af de førnævnte køkkener, for at kunne sammenligne forbrugsmønstrene, da det er formodet, at begge køkkenvaske i de pågældende køkkener er i brug under perioder med spidsbelastning.

Figur 3.8 og 3.9 viser opsætningen af Huba flowmålerne og de dertilhørende arduinoer på de tre forskellige typer tapsteder. Figur 3.8 viser opsætningen ved en køkkenvask og en håndvask, hvor figur 3.9 viser opsætningen ved en bruser.



Figur 3.8. Måleudstyr ved tapsteder. Venstre: Køkkenvask, højre: Håndvask. 1: Huba flowmålere, 2: Arduino og ledninger til denne, 3: Strømforsyning til arduino, 4-5: Eksisterende vandrør tilsluttet flowmålere, 6: Huba flowmåleres tilslutning til tapsteder.



Figur 3.9. Måleudstyr ved bruser. 1: Huba flowmålere, 2: Ledninger til arduino, 3: Eksisterende vandrør tilsluttet flowmålere, 4: Huba flowmålers tilslutning til blandingsbatteri.

Som det fremgår af figur 3.8 og 3.9, er Huba flowmålerne tilsluttet imellem de eksisterende brugsvandsrør og tilslutningerne til tapstederne. Ved køkken- og håndvaske er Huba flowmålerne tilsluttet via flexrør, hvor de ved brusere er tilsluttet i direkte forlængelse af de eksisterende koblingsrør. Alle elektroniske dele er beskyttet mod fugt i nødvendigt omfang.

Måleudstyr 4

Som beskrevet i afsnit 3.2, er der anvendt Brunata energimålere og Huba flowmålere til dataopsamling på Aalborgkollegiet. I dette kapitel redegøres der for de to typer måleudstyrs tekniske informationer, for at sikre en korrekt montering og anvendelse. Derudover dokumenteres den udførte kalibrering af måleudstyret, samt verificering af den udførte kalibrering for Huba flowmålernes flowsensorer grundet observerede, systematiske kalibreringsfejl.

4.1 Brunata energimålere

I henhold til afsnit 3.2, er der anvendt tre Brunata energimålere af typen HGQ, hvoraf Brunata energimåler nr. 29 og 30 er model HGQ3-R3-184/1B0M24 og Brunata energimåler nr. 44 er model HGQ1-R0-184/1B0M24. Forskellen på de to Brunata energimålere er deres måleinterval vedrørende flow. Alle tekniske informationer om Brunata energimålerne er baseret på det dertilhørende datablad. [Brunata, 2006] Figur 4.1 viser Brunata energimålermodel HGQ1-R0-184/1B0M24.

Figur 4.1. Brunata energimåler, type HGQ1.

Den valgte type energimåler, HGQ, er designet til at beregne energiforbruget i [kWh] i vandbårne varmesystemer ud fra en integreret beregner. Energiforbruget beregnes ud fra måling af følgende parametre:

- Flow [L/min]
- volumen [L]
- Temperatur for det varmeste rør T1 [°C]

- Temperatur for det koldeste rør T2 [°C]

Brunata energimålerne har en tidsopløsning på et minut, og måler flow og temperaturer med en flowsensor og to PT500 temperatursensorer, hvoraf sidstnævnte har et måleinterval mellem 0 og 150 °C. Temperatursensorerne registrerer medietemperaturen hvert 4, 8 sek. og benytter et gennemsnit af de forudgående 10 minutters målinger til at fastsætte medietemperaturen pr. minut.

Brunata energimålerne kan monteres i en vilkårlig retning, så længe at det tilsluttede rør er fyldt med vand. Der er ingen krav til lige rørstykker før eller efter energimålerne, dog anbefales det at montere flowsensoren på det koldeste rør.

Flowsensoren skal monteres som en integreret del af rørsystemet, da flowsensoreren registrerer en spænding ud fra bevægelser i rørmediet, som Brunata energimåleren omregner til et flow. Måleintervallet for de to Brunata energimålermodellers flowsensorer, fremgår af tabel 4.1.

Brunata energimålermodel	**Måleinterval for flow**	
	[L/min.]	[m^3/time]
HGQ1-R0-184/1B0M24	0,08 - 25	0,0048 - 1,5
HGQ3-R3-184/1B0M24	0,20 - 60	0,012 - 3,6

Tabel 4.1. Måleintervallerne for Brunata energimålernes flowsensorer.

Værdierne i tabel 4.1 er henholdsvis minimum og maksimum flow for hver af de to målemodeller, hvor flowsensoren skal fungere i en kortere periode uden af overskride producentens maksimalt tilladelige fejl. Dette kan forkortes til MPE fra den engelske betegnelse *Maximum Permissible Errors*. Den samlede MPE for Brunata energimålernes flowsensorer beregnes som summen af fejl fra flowsensorerne og den integrerede beregner i Brunata energimålerne, som bestemmes i henhold til formlen (4.1) og (4.2).

$$E_f = \pm \left(\frac{2 + 0,02\ q_p}{q} \right), \text{ maks. } \pm 5\% \tag{4.1}$$

$$E_c = \pm \left(0,5 + \frac{\Delta\theta_{min}}{\Delta\theta} \right) \tag{4.2}$$

E_f	Maksimal tilladelig fejl for flowet	[%]
E_c	Maksimal tilladelig fejl for beregneren i energimåleren	[%]
q_p	Det højeste flow, hvor energimåleren skal virke kontinuerligt uden at overskride MPE	[m^3/h]
q	Nuværende flow	[m^3/h]
$\Delta\theta_{min}$	Laveste grænse for temperaturforskellen, hvor energimåleren skal virke	[°C]
$\Delta\theta$	Absolutte temperaturforskel for frem- og returløb	[°C]

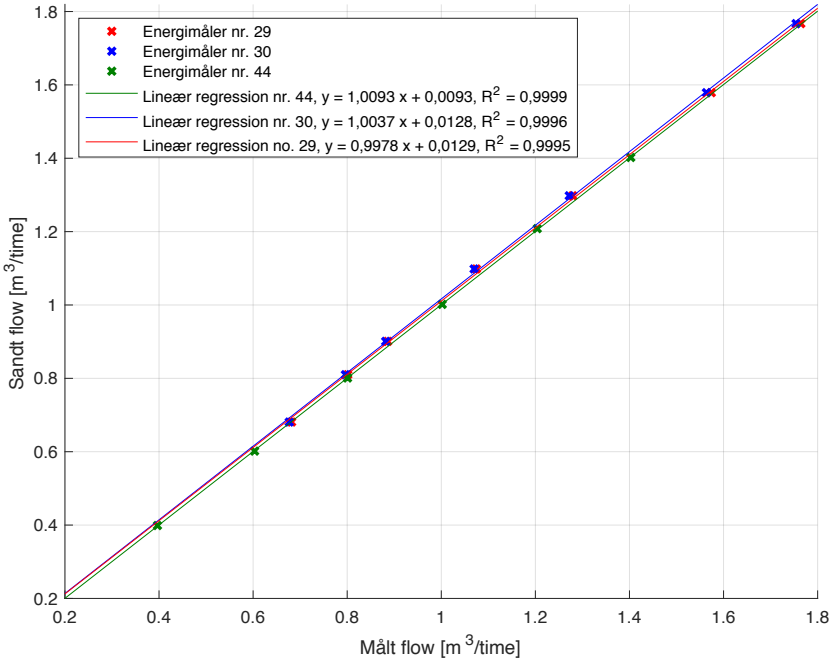
Temperatursensorernes maksimalt tilladelige afvigelse er ± 0,5 °C i henhold til nøjagtighedsklasse 2 i EN 1434.

I det følgende dokumenteres resultaterne fra kalibreringen af Brunata energimålernes flow- og temperatursensorer, sammen med den dertilhørende MPE.

4.1.1 Kalibrering af Brunata energimålernes flowsensorer

Kalibreringen er udført med henblik på at bestemme kalibreringsligninger til korrektion af måledataene i den efterfølgende databehandling for derved at reducere måleusikkerheden og øge måledataenes kvalitet. Kalibreringsligningerne bestemmes på baggrund af en sammenligning af sande flows og Brunata energimålernes flowmålinger, der i det følgende er omtalt som "sandt" og "målt" flow.

Kalibreringsopstillingen og den anvendte metode til kalibreringen er beskrevet i Appendiks D afsnit D.1 på side 135. En kalibreringskurve for Brunata energimålerne er bestemt på baggrund af syv og seks målepunkter, for henholdsvis Brunata energimålermodel HGQ1 og HGQ3. Kalibreringskurverne for Brunata energimålernes flowsensorer kan ses i figur 4.2 sammen med kalibreringsformlen for hver måler.



Figur 4.2. Kalibreringskurver for de anvendte Brunata energimåleres flowsensorer.

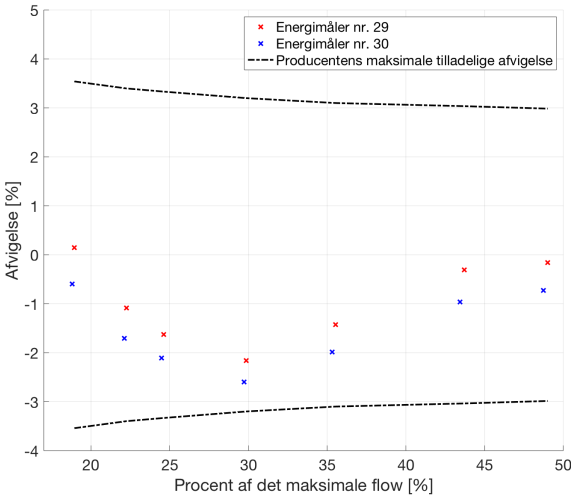
Af figur 4.2 fremgår det, at der er en stærk lineær sammenhæng mellem de forskellige flowmålepunkter, hvilket afspejles af R^2-værdien, der er tæt på 1. Grundet den stærke lineære sammenhæng mellem flowmålepunkterne, anvendes lineær regression til at bestemme kalibreringsligningerne for Brunata energimålernes flowsensorer, og af samme årsag er det vurderet, at inter- og ekstrapolering er acceptabelt. Brunata energimålernes nøjagtighed er undersøgt, ved bestemmelse af den procentvise afvigelse mellem de målte og de sande flows, samt ved sammenligning med producentens maksimalt tilladelige afvigelse, MPE.

Den procentvise afvigelse er bestemt ud fra formel (4.3).

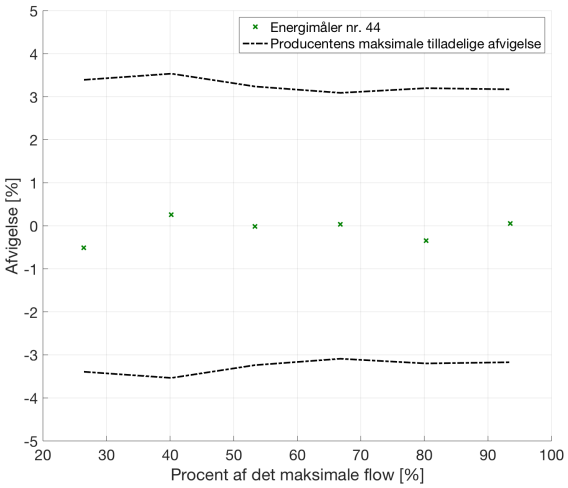
$$A_{energimaler} = \frac{q_{energimaler}}{q_{sand}} \cdot 100 - 100 \tag{4.3}$$

$A_{energimaler}$	Brunata energimålerens afvigelse fra det sande flow	[%]
$q_{energimaler}$	Målt flow	[L/sek.]
q_{sand}	Sandt flow	[L/sek.]

Figur 4.3 og 4.4 viser de procentvise afvigelser for de tre anvendte energimålere, samt producentens maksimalt tilladelige afvigelse.



Figur 4.3. Den procentvise afvigelse mellem det sande og målte flow for de to Brunata energimålere af typen HGQ3, nummer 29 and 30, og grænsen for MPE for flow sensoren og beregneren.



Figur 4.4. Den procentvise afvigelse mellem det sande og målte flow for den ene Brunata energimåleren af typen HGQ1, nummer 44, og grænsen for MPE for flow sensoren og beregneren.

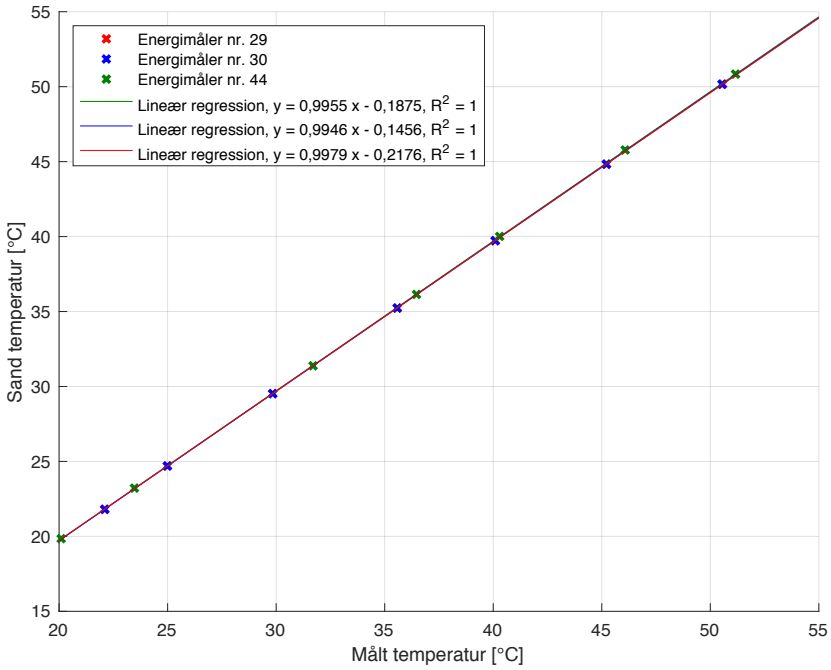
Af figur 4.3 og 4.4 fremgår det, at alle tre Brunata energimåleres flowmålepunkter er inden for producentens maksimalt tilladelige afvigelse, hvilket er en god indikator for, at afvigelserne er acceptable. Energimålernes flowsensorer er derfor vurderet egnet til at foretage den ønskede dataopsamling på Aalborgkollegiet.

4.1.2 Kalibrering af Brunata energimålernes temperatursensorer

Brunata energimålernes temperatursensorer er kalibreret på baggrund af målinger for seks og syv forskellige medietemperaturer i intervallet 20-55 °C, for henholdsvis Brunata energimålermodel HGQ1 og HGQ3. Kalibreringsopstillingen og metoden brugt til kalibreringsmålingerne kan ses i Appendiks D afsnit D.1 på side 135.

Til bestemmelse af kalibreringsligningerne er der anvendt gennemsnitsværdier for henholdsvis de sande temperatursensorer og Brunata energimålernes temperatursensrorer. Gennemsnitsværdierne er anvendt, da der er registreret minimale forskelle for de to indbyrdes temperatursensorer, hvilket er beskrevet i Appendiks D.

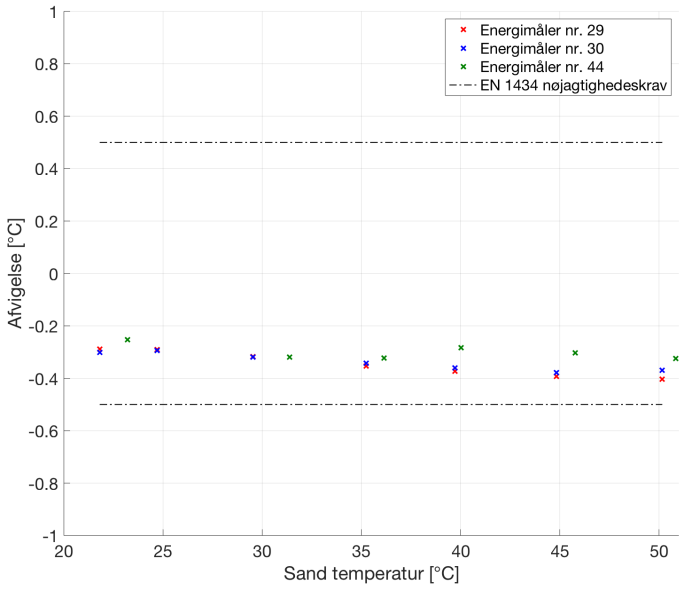
Ligesom for flowmålingerne i afsnit 4.1.1, har temperaturmålingerne en stærk lineær sammenhæng, hvorfor kalibreringsligningerne ligeledes er bestemt ved lineær regression. Kalibreringskurverne for de tre Brunata energimåleres temperatursensorer kan ses på figur 4.5.



Figur 4.5. Kalibreringskurver for de tre Brunata energimåleres temperatursensorer.

I henhold til måleplanen i afsnit 3.2, skal Brunata energimåler nr. 30 monteres på fjernvarmerør, hvor der er højere medietemperaturer. Grundet den stærke, lineære sammenhæng mellem temperaturmålepunkterne, vist på figur 4.5, er det vurderet at være unødvendigt at kalibrere Brunata energimåler nr. 30 ved højere temperaturer.

I modsætning til flowsensorerne, er afvigelsen mellem de sande og målte temperaturer bestemt som temperaturforskelle i [°C] for temperaturmålepunkterne. Afvigelserne er sammenlignet med den maksimalt tilladte afvigelse på $\pm$ 0,5 °C, i henhold til nøjagtighedsklasse 2 i [EN]. Figur 3.7 viser temperaturmålepunkternes afvigelser samt den maksimalt tilladelige afvigelse.



Figur 4.6. Afvigelse mellem den sande temperatur og de tre Brunata energimåleres temperaturmålepunkter, sammenlignet med den tilladelige afvigelse i [EN].

Figur 4.6 viser, at alle temperaturmålepunkter overholder kravet i nøjagtighedsklasse 2 i [EN], hvilket indikerer, at afvigelserne er acceptable.

4.2 Huba flowmålere

I henhold til afsnit 3.2, blev der i forbindelse med projektet installeret 14 sæt Huba flowmålere ved tapsteder på Aalborgkollegiet, hvoraf et sæt svarer til to stk. Huba flowmålere, som skal måle temperatur og forbrug af henholdsvis koldt og varmt brugsvand ved tapsteder. Af de 14 sæt, er 7 sæt kalibreret som beskrevet i det følgende, og de resterende 7 sæt er kalibreret i forbindelse med projektet [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019]. Kalibreringsligningerne for henholdvis den udførte kalibrering og kalibreringen fra det omtalte projekt, er vist i Appendiks D.2 på side 140. Udover kalibreringerne, er der ligeledes udført en verificering af flowsensorerne. Den anvendte type Huba flowmåler, 236 DN10, kan ses på figur 4.7.

Figur 4.7. Huba flowmåler 236 DN10.

Huba flowmålerne kan både måle temperatur [°C] og flow [L/min], og angiver resultaterne i et interval mellem 0-10 V, som efterfølgende omregnes til førnævnte enheder. Huba flowmålernes måleintervaller og opløsning fremgår af tabel 4.2.

Parameter	**Værdi**
Måleopløsning	8/sek.
Temperatur	-25 til +125 °C
Flow	1,8 til 32L/min. 0,03 til 0,53L/sek.
Responstid for flowsensor	$< 0,5$sek.
Signalforsinkelse for flowsensor	$<$ 2sek.

Tabel 4.2. Måleintervallerne for Brunata energimålernes flowsensorer.

Til temperaturmålinger anvender Huba flowmåleren en PT1000 temperatursensor, som er designet i overensstemmelse med nøjagtighedsklasse B i [Standard].

Huba flowmåleren måler flow på samme måde som energimålerne, beskrevet i afsnit 4.1. Flowsensoren kan måle flows i intervallet vist i tabel 4.2, såfremt at medietemperaturen er under 125 °C og den omgivende temperatur er imellem -15 og +85 °C. Flowsensorens responstid og signalforsinkelse skyldes en indbygget strømbesparende funktion, hvor Huba flowmåleren går i dvale når der ikke registreres et flow.

Huba flowmålerne monteres som en integreret del af rørsystemet, og kan monteres i en vilkårlig retning, såfremt at pilen, vist på figur 3.8, peger i flowretningen. Af hensyn til målenøjagtigheden, skal der være lige rørstykker før og efter Huba flowmålerne, for at minimere turbulens ved Huba flowmålernes sensorer. Kravene til rørstykkerne før og efter Huba flowmålerne er som følgende: [Huba Control, 2019]

- Indløbsrør: Minimumlængde mellem 0,5 til 5xDN afhængig af bøjningsradius ved foranliggende bøjning
- Udløbsrør: Minimumlængde på 1xDN i alle tilfælde

For hvert tapsted er der en arduino, som lagrer måledata fra tapstedets to Huba flowmålere og uploader måledataene til en server via Wi-Fi, hvorfra måledataene kan tilgås.

Arduinoerne er programmeret til at uploade måledata 5 minutter efter endt tapning, hvis der ikke startes en ny tapning i dette tidsrum. I de tilfælde, hvor en ny tapning startes indenfor dette tidsrum, samt tilfælde hvor tapningerne har lang varighed, uploader arduinoerne i stedet måledata med 15 minutters mellemrum. Arduinoerne er simple computere og kan derfor ikke opsamle og uploade måledata på samme tid, hvorfor der ved lange tapninger vil være måledata, som går tabt i uploadingsperioden.

Som tidligere nævnt, måles flow og temperatur som en spænding. I henhold til producenten, kan flow- og temperaturmålingerne efterfølgende omregnes til deres respektive værdier og enheder ved hjælp af formel (4.4) og (4.5) for henholdsvis flow og temperatur. [Huba Control, 2019]

$$q_V = K_U \cdot U_{OUT} \tag{4.4}$$

$$T = \frac{150\,°C}{10\,V} \cdot U_{OUT_T} - 25\,°C \tag{4.5}$$

q_V	Volumenstrøm	[L/min.]
T	Temperatur	[°C]
K_U	Koefficient for volt output K_U = 3,2 for flow mellem 1,8 og 32 L/min	[(L/min)/V]
U_{OUT}	Målt volumenstrøm	[V]
U_{OUT_T}	Målt temperatur	[V]

For flowsensoren har producenten opgivet en maksimalt tilladelig afvigelse på 2 %, hvor den maksimalt tilladelige afvigelse for temperatursensoren kan bestemmes ud fra formel (4.6).

$$E_f = \pm 0,5\,K \pm 0,005 \cdot \Delta T \tag{4.6}$$

E_f	Maksimal tilladelig afvigelse for temperaturen	[K]
ΔT	Forskel mellem den målte temperatur og 0 °C	[K]

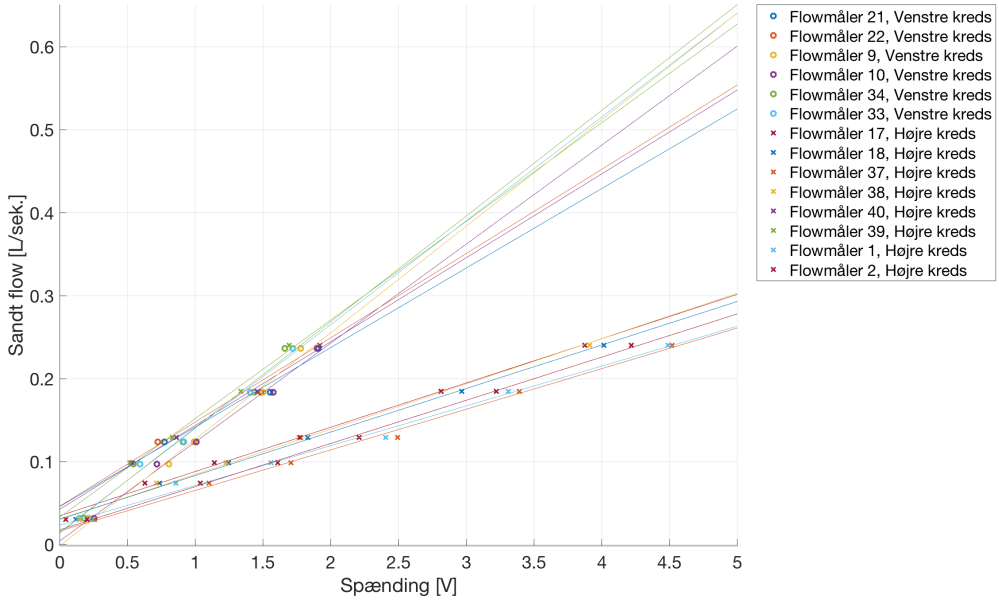
Ved at bestemme Huba flowmålernes kalibreringsligninger ud fra målepunkterne i volt for henholdsvis det sande flow og temperatur, vil omregningsformlerne (4.4) og (4.5) automatisk blive integreret ind i kalibreringsligningerne.

4.2.1 Kalibrering af Huba flowmålernes flowsensorer

I dette afsnit dokumenteres kalibreringen af Huba flowmålernes flowsensorer. Kalibreringen af Huba flowmålernes flowsensorer er udført på samme måde som for Brunata energimålerne, som beskrevet i Appendiks D.1 på side 135.

Under kalibreringen var Huba flowmålerne inddelt i to kredse, adskilt med hver sin afspærringsventil, som beskrevet i afsnit D.2 på side 140 i Appendiks D. Forsøgsopstillingen resulterede i en tydelig afvigelse i kalibreringsligningerne mellem de to kredse. For begge kredse blev der ligeledes observeret en betydelig afvigelse mellem de sande og målte flows, hvorfor der efterfølgende blev foretaget en verificering af flowsensorerne, efter montering på Aalborgkollegiet, hvilket er beskrevet i det følgende afsnit.

Af figur 4.8 fremgår den førnævnte systematiske afvigelse mellem de to kredse, anvendt ved kalibreringen.



Figur 4.8. Kalibreringskurve for anvendte flowmålere og deres fordeling på henholdsvis venstre og højre kreds under kalibreringen.

Figur 4.8 viser, at flowmålerne placeret på den højre kreds generelt måler et højere flow for kalibreringspunkterne, sammenlignet med den venstre kreds. Dertil ses det, at forskellen mellem kredsene stiger, når flowet stiger, hvilket skyldes utætheder i de anvendte afspærringsventiler.

På baggrund af forsøgsopstillingen er det vurderet, at den observerede systematiske afvigelse kun kan skyldes forskelle i de to afspærringsventilers tæthed. De omtalte afspærringsventilers placering fremgår af figur D.4 i Appendiks D.2 på side 140.

Verificering af Huba flowmålerne, beskrevet i det følgende, bekræfter vurderingen af, at afvigelserne, observeret i forbindelse med kalibreringen, skyldes utætheder i de anvendte afspærringsventiler.

Verificering

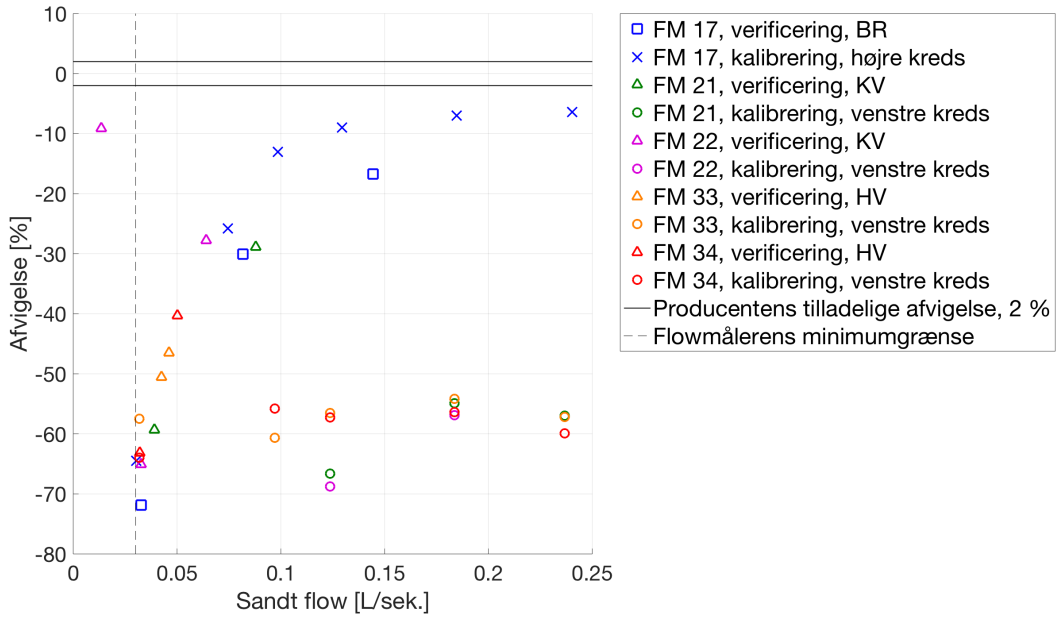
Verificeringen af flowsensorerne er udført i henhold til Appendiks E på side 145 og er foretaget efter, at Huba flowmålerne er blevet monteret på Aalborgkollegiet.

Med henblik på at bestemme årsagen til afvigelserne, observeret i forbindelse med kalibreringen, er der anvendt to forskellige metoder til omregning af Huba flowmålernes måledata fra [V] til [L/sek.]:

- Uden kalibrering: I henhold til producentens omregningsformel (4.4)
- Med kalibrering: I henhold til de bestemte kalibreringsligninger, vist i Appendiks D.2

Flowmålerdataene uden kalibrering benyttes til at undersøge, om Huba flowmålernes målepunkter følger den samme inddeling i højre og venstre kreds, som observeret under kalibreringen. Derimod benyttes flowmålerdataene med kalibrering til at undersøge, om kalibreringen har en tilfredsstillende kvalitet, hvilket er opfyldt, hvis omregning med kalibreringsligningerne giver en reduceret afvigelse mellem det sande og målte flow, for måledata opsamlet under verificeringen.

Til sammenligning af måledataene for kalibreringen og verificeringen, er den procentvise afvigelse anvendt. Den procentvise afvigelse er bestemt med formel (4.3) og plottes som vist på figur 4.9 og 4.10.



Figur 4.9. Procentvise afvigelser fundet mellem de sande flows og Huba flowmålernes flowmålinger foretaget under henholdsvis kalibreringen og verificeringen på Aalborgkollegiet, hvor producentens omregningsformel er benyttet. BR: bruser, HV: håndvask, KV: køkkenvask.

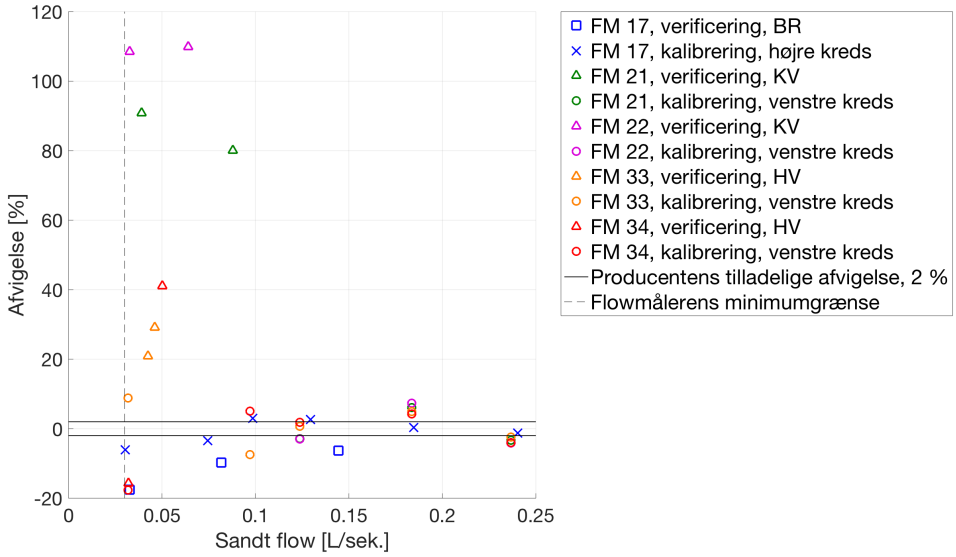
Ved en sammenligning af måledata uden kalibrering, vist på figur 4.9, blev følgende observeret:

1. Store procentvise afvigelser fra det sande flow for måledata fra både kalibrering og verificering
2. Måledata fra verificering har samme mønster som højre kreds under kalibreringen
3. Måledata fra verificering er tæt på den nedre grænse for Huba flowmålernes måleinterval, som er mellem 0,03 - 0, 53L/sek.

Ud fra figur 4.9 kan det konkluderes, at der er forekommet systematiske afvigelser under kalibreringen, idet de procentvise afvigelser for verificeringsdataene, vist med trekanter og kvadrater, ikke er inddelt i henholdsvis højre og venstre kreds, som observeret for kalibreringsdataene, vist med cirkler og kryds.

Derudover kan det konkluderes, at det maksimalt opnåelige flow på Aalborgkollegiets tapsteder ligger tæt på den nedre grænse for Huba flowmålernes måleinterval, hvilket øger usikkerheden for flowmålingerne på Aalborgkollegiet samt sandsynligheden for, at Huba flowmålingerne ikke registrerer alle tapninger.

Figur 4.10 viser kalibrerings- og verificeringsdata med kalibrering. Af hensyn til opløsningen, er Huba flowmåler nr. 22's laveste flowmåling sorteret fra, da den har en procentvis afvigelse på 417 %. Den store afvigelse skyldes, at dette målepunkt er udenfor Huba flowmålerens måleinterval.



Figur 4.10. Procentvise afvigelser fundet mellem det sande og de målte flows for henholdsvis den oprindelige kalibrering, samt verificering på Aalborgkollegiet, hvor kalibreringsligningerne er benyttet. BR: bruser, HV: håndvask, KV: køkkenvask.

Ved en sammenligning af måledata med kalibrering, vist på figur 4.10, blev følgende observeret:

1. Anvendelse af kalibreringsligninger øger den procentvise afvigelse mellem det sande flow og måledata fra verificeringen, med undtagelse af Huba flowmåler nr. 17 fra højre kreds, hvor afvigelsen reduceres
2. Anvendelse af kalibreringsligninger medfører positive procentvise afvigelser mellem det sande flow og verificeringsdataene for den venstre kreds

I henhold til ovenstående kan det konkluderes, at der har været en fejl under kalibreringen, som har medført, at kalibreringsligningerne er utroværdige.

Af tabel E.4 i Appendiks E, fremgår det, at der for de ukalibrerede måledata er en nogenlunde konstant afvigelse i [L/sek.] mellem det sande og målte flow, hvorimod

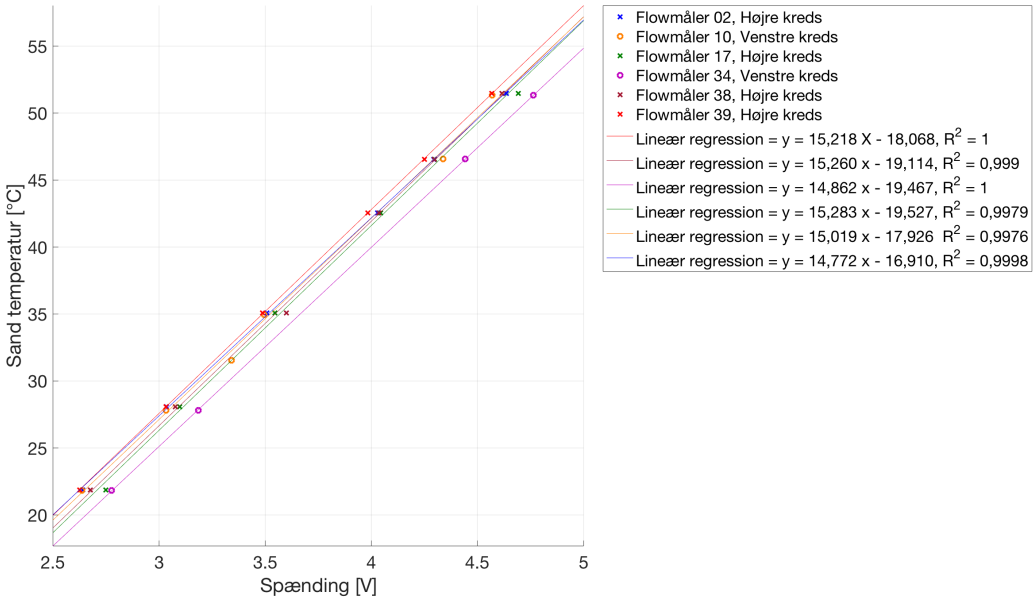
afvigelsen for de kalibrerede måledata varierer. Ovenstående bekræfter, at kalibreringen af Huba flowmålernes flowsensorer er fejlbehæftet og ikke bør anvendes.

Ud fra verificeringen er det vurderet, at afvigelsen mellem de to kredse, anvendt under kalibreringen, skyldes en utæt afspærringsventil. Den største afvigelse mellem det sande og målte flow, forekommer for Huba flowmålerne kalibreret i venstre kreds. Derfor vurderes utætheden at være størst for afspærringsventilen tilknyttet højre kreds.

4.2.2 Kalibrering af Huba flowmålernes temperatursensorer

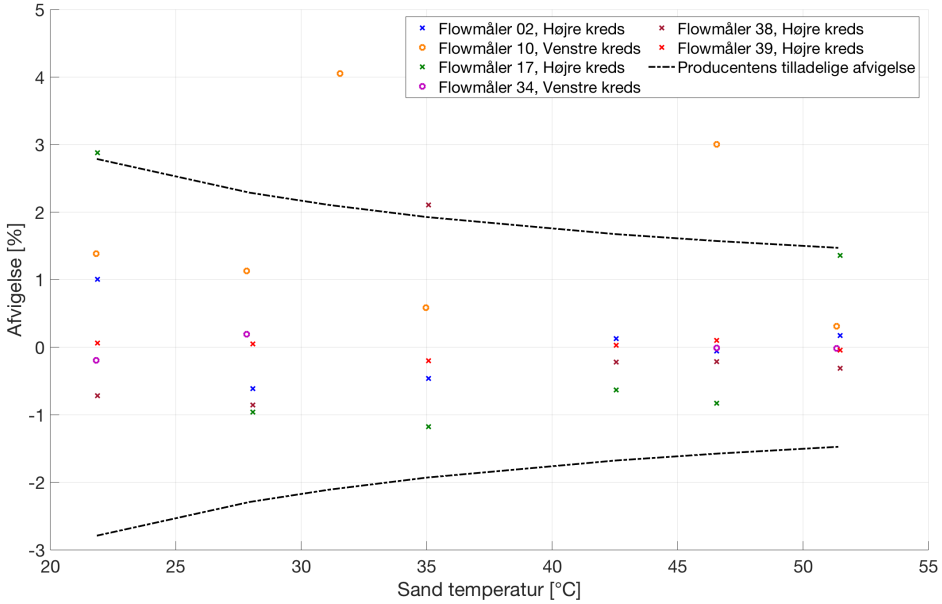
Kalibreringen af temperatursensorerne er foretaget med opstillingen beskrevet i afsnit 4.2.1 og metoden beskrevet i Appendiks D.1. Under kalibreringen blev rørstrækningerne isoleret med stof, for at opnå en konstant medietemperatur, hvilket resulterede i en maksimal forskel mellem den sande frem- og returløbstemperatur på 0,35 °C.

Figur 4.11 viser kalibreringskurverne for seks udvalgte Huba flowmåleres temperatursensorer, hvor de resterende kalibreringsligninger kan ses i Appendiks D.2 på side 140.



Figur 4.11. Kalibregingskurver for Huba flowmålernes temperatursensorer, for seks udvalgte Huba flowmålere.

Af figur 3.13 fremgår det, at der er en stærk lineær sammenhæng mellem målepunkter for hver individuel Huba flowmåler. Derudover har de forskellige kalibreringsligninger for temperatursensorerne tilnærmelsesvist samme hældning, hvilket står i kontrast til kalibreringen for flowsensorerne, vist på figur 4.8. Figur 4.12 viser den procentvise afvigelse for Huba flowmålernes temperaturmålepunkter sammenlignet med de sande temperaturer og producentens maksimalt tiladelige afvigelse.



Figur 4.12. Procentvis afvigelse for temperaturmålinger.

Af figur 3.14 fremgår det, at der forekommer procentvise afvigelser på mellem ca. -1 og 4 % for de forskellige målepunkter, svarende til en måleusikkerhed på +0,28 °C og -0,41 °C. På baggrund af ovenstående er det derfor vurderet, at kalibreringsligningerne for Huba flowmålernes temperatursensorer kan anvendes.

Fejldetektering 5

Dette kapitel dokumenterer og redegør for observerede fejl i måledata fra Aalborgkollegiet, for alle måleperioder, med henblik på at kunne tage højde for fejlene i den efterfølgende databehandling, og dermed øge analysernes kvalitet. For måledata med udfald og udsving er al måledata for de berørte døgn frasorteret.

Følgende fejl er observeret for måledataene:

- Tidsforskydelse for Brunata energimålere
- Signalfejl mellem Brunata energimålere og DCU
- Signalfejl mellem Brunata energimåler 44's flowsensor og datalogger for volumen
- Signalfejl mellem Brunata energimåler 29's datalogger og flowsensor
- Løs forbindelse mellem Brunata energimåler 29's datalogger og temperatursensor 29 T1
- Utroværdige udsving i cirkulationstemperatur
- Afvigelse mellem de målte varmt brugsvandstemperaturer

Tabel 5.1 er en gentagelse af tabel 5.1, og viser en oversigt over Brunata energimålernes sensornavne og -placeringer i Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, hvilket benyttes som reference til beskrivelserne i dette kapitel.

Energimåler	Sensor	Placering	Tilknytning til VBV-system
29	29 Flow	Koldt brugsvand, KBV	Varmt brugsvand
	29 T1	Varmt brugsvand, VBV	
	29 T2	Koldt brugsvand, KBV	
30	30 Flow	Fjernvarme fremløb, FVF	Fjernvarme
	30 T1	Fjernvarme fremløb, FVF	
	30 T2	Fjernvarme returløb, FVR	
44	44 Flow	Cirkulation, CBV	Cirkulation
	44 T1	Varmt brugsvand, VBV	
	44 T2	Cirkulation, CBV	

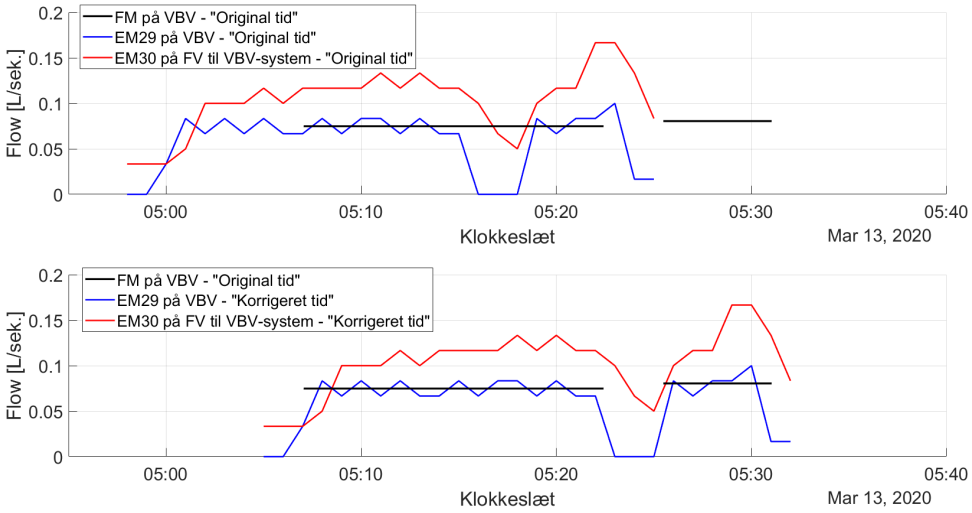
Tabel 5.1. Tilknytning og placering af Brunata energimålernes sensorer. Alle sensorer er placeret på rørtilslutninger til veksleren. Flow står for flowsensor, og T1 og T2 står for temperatursensorer.

Tidsforskydelse for Brunata energimålere

Der er observeret tidsforskydelse af Brunata energimålernes tidsstemper for måledata. Dette er blandt andet observeret ved analyse af tapninger udført d. 13/3, 16/4 og 5/5-2020, jævnfør kapitel 10.2 omhandlende energitab i forbindelse med tapninger. Ved at sammenholde tidsstemplerne for henholdsvis Brunata energimålerdata og Huba

flowmålerdata, med de udførte tapningernes start- og sluttidspunkter, noteret i realtid, blev det observeret, at Huba flowmålerne følger realtid.

Figur 5.1 viser tidsangivelserne for Brunata energimålerdata og Huba flowmålerdata, henholdsvis med og uden korrektion af Brunata energimålerdataene. "VBV, FM - "Original tid" ", på figur 5.1, viser to tapninger i realtid med en opløsning på 1 sekund. Flowet for de to tapninger, vist for Huba flowmålerne, er bestemt som en gennemsnitsværdi af hver tapnings samlede varmtvandsforbrug, målt med Brunata energimåler nr. 29 i de pågældende tappeperioder, grundet utroværdig flowdata fra Huba flowmålerne, som beskrevet i kapitel 4.



Figur 5.1. Tidsforskydelse mellem energimålerdata og flowmålerdata. Måleopløsning er 1/min. for Brunata energimålerdata og 1/sek. for Huba flowmålerdata.

Af figur 5.1 fremgår det, at der forekommer ca. 7 minutters tidsforskydelse mellem Brunata energimålerdataene og Huba flowmålerdataene, da de viste tapninger blev foretaget. En tilsvarende analyse af tapningerne foretaget d. 16/4 og 5/5-2020 viste, at energimålerne her havde omkring 10 minutters tidsforskydelse. Dermed er der belæg for, at energimålernes tidsforskydelse varierer en smule over tid, hvorfor der er en usikkerhed i variationernes størrelse.

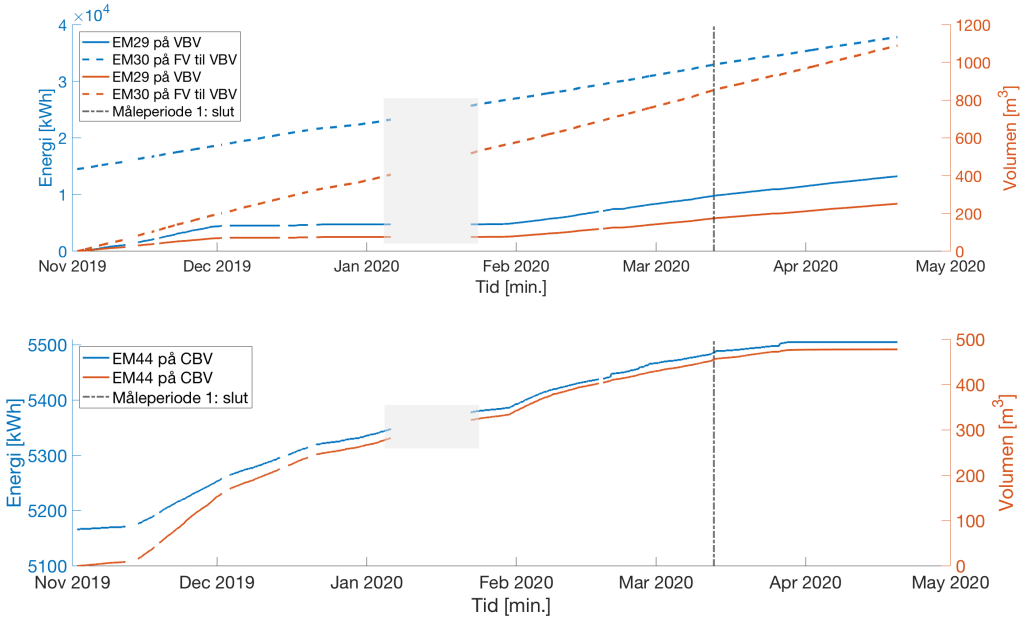
På baggrund af ovenstående er det vurderet, at den observerede tidsforskydelse har en minimal betydning for analyser, hvor der udelukkende foretages sammenligninger af Brunata energimålerdata. I analyser, hvor Brunata energimålerdata sammenlignes med Huba flowmålerdata, vil der være en vis usikkerhed grundet tidsforskydelsen.

Udover ovennævnte fremgår det, er der er ca. 1 minuts forsinkelse imellem at en tapning påbegyndes til at varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug stiger som det fremgår af flowkurverne for Brunata energimåler nr. 29 og 30. Ovennævnte forsinkelse forekommer ikke mellem varmt brugsvandstemperaturen, målt med sensor 29 T1, og cirkulationstemperaturen, målt med sensor T2, som vist på figur 5.6. På baggrund af ovenstående er det vurderet, at Brunata energimålerne har samme tidsforskydelse i forhold til realtid, og at forsinkelsen skyldes træghed i Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem,

grundet styring af vekslerens fjernvarmetilløb.

Signalfejl mellem Brunata energimålere og DCU

Ved sammenligning af måledata for de tre anvendte Brunata energimålere, er der observeret gennemgående udfald for alle måleparametre i måleperiode 1. Figur 5.2 viser alle udfaldsperioderne, her med måleparametrene "Energi" og "Volumen" som eksempel. Signalfejlen fremgår som fravær af måledata i de berørte perioder.



Figur 5.2. Aalborgkollegiets summerede forbrug for alle måleperioder. Den længste udfaldperiode er markeret med grå.

Perioderne med signalfejl, vist på figur 5.2, skyldes en løs forbindelse mellem Brunata energimålerne og DCU'en. Dette er observeret ved en fejlmeddelelse om manglende måledata i softwaren, som benyttes til at hente de berørte måledata fra DCU'en til en computer.

Perioderne med signalfejlen er af varierende varighed, hvoraf den længste udfaldsperiode af denne type forekommer i januar og varer 17 døgn, vist med grå markering på figur 5.2.

Signalfejl mellem Brunata energimåler 44's flowsensor og datalogger for volumen

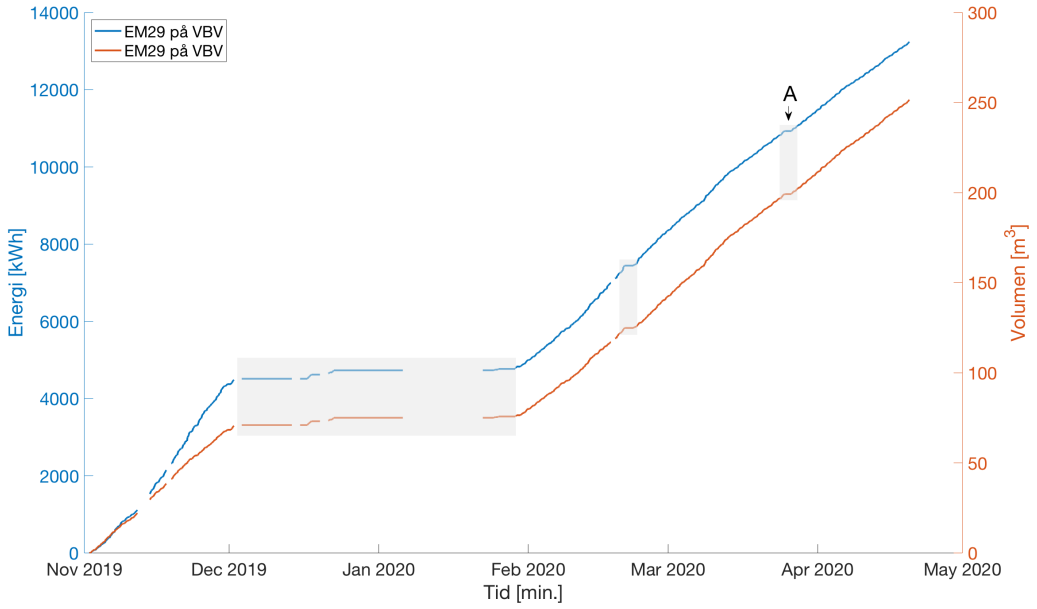
Udover de generelle signalfejl, nævnt i det forudgående afsnit, er der desuden observeret en uoverensstemmelse mellem det registrerede flow [L/time] og den summerede volumen [m^3] for Brunata energimåler 44.

Som det fremgår af figur 5.2, forekommer der en væsentligt reduceret stigning for summeret volumen og energi for Brunata energimåler 44. Den lave stigning i volumen resulterer i et lavt flow ved manuel omregning, hvilket ikke stemmer overens med øvrige flowmålinger af henholdsvis cirkulationspumpen og Brunata energimåler 44's egne flowdata i [L/time].

Derimod er der en overensstemmelse mellem cirkulationspumpens flowmålinger og Brunata energimåler 44's flowdata i [L/time], hvorfor det vurderes, at den summerede volumen er upålidelig.

Signalfejl mellem Brunata energimåler 29's datalogger og flowsensor

Udover den gennemgående signalfejl mellem Brunata energimålerne og DCU'en, er der observeret en fejl mellem Brunata energimåler 29's datalogger og flowsensor. Figur 5.3 viser de berørte tidsperioder markeret med grå. "A" angiver tidsperioden d. 25/3 - 26/3-2020, hvor Aalborgkollegiets veksler blev afsyret.

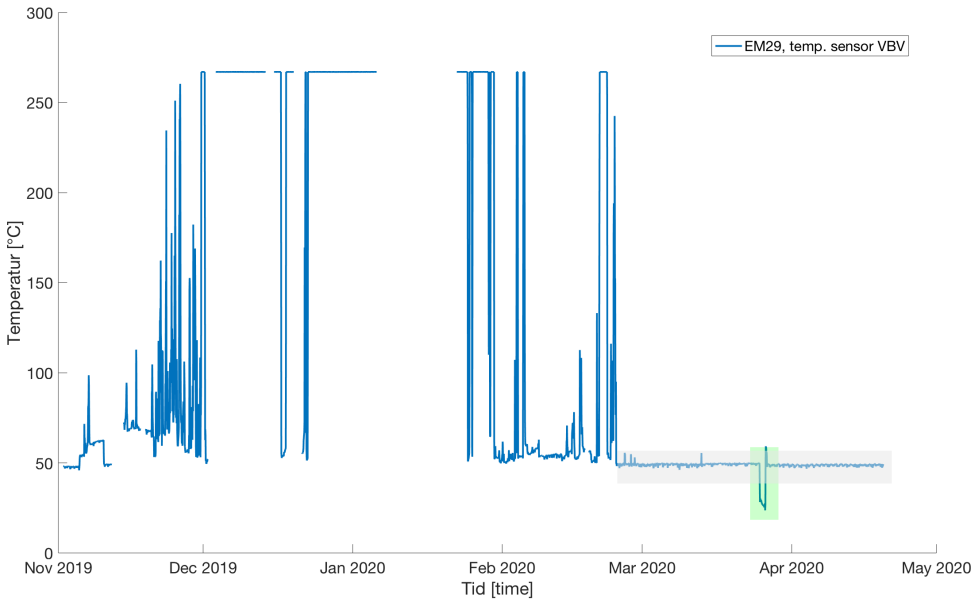


Figur 5.3. Aalborgkollegiets summerede forbrug for alle måleperioder. Berørte tidsperioder markeret med grå. "A" viser tidsperiode for afsyring af veksler.

Signalfejlen mellem Brunata energimåler 29's datalogger og flowsensor adskiller sig fra den føromtalte gennemgående signalfejl, ved at Brunata energimåler nr. 29 ikke registrerer forbrug. Den omtalte fejl har ingen påvirkning på de øvrige måledata for Brunata energimåler nr. 29.

Løs forbindelse mellem Brunata energimåler 29's datalogger og temperatursensor 29 T1

En løs forbindelse mellem Brunata energimåler nr. 29's datalogger og temperatursensor, 29 T1, resulterede i fejlbehæftet måledata for varmt brugsvandstemperaturen for Brunata energimåler nr. 29, hvilket kan ses på figur 5.4.



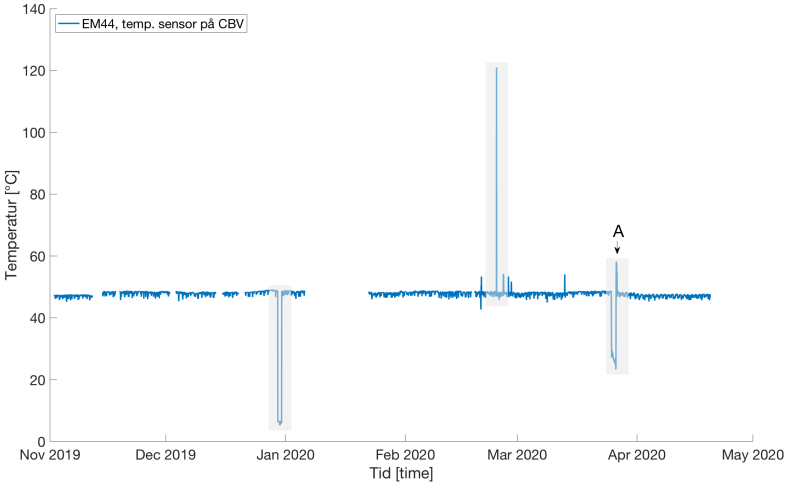
Figur 5.4. Temperaturmålinger for varmt brugsvand målt med energimåler nr. 29.

Efter identificering af den løse forbindelse, blev denne udbedret. Den grå markering på figur 5.4 angiver tidsperioden efter udbedring af fejlen. Temperaturudsvingene, markeret med grøn, skyldes afsyring af veksleren.

Grundet den fejlbehæftede temperaturdata for Brunata energimåler nr. 29, er Brunata energimåler nr. 29's beregning af energiforbrug vurderet til at være utroværdig, hvorfor dette energiforbrug er beregnet separat i den videre databehandling.

Utroværdige udsving i cirkulationstemperatur

Der er observeret utroværdige udsving i cirkulationstemperaturen målt med Brunata energimåler nr. 44's temperatursensor, 44 T2, hvilket er vist på figur 5.5, markeret med grå.

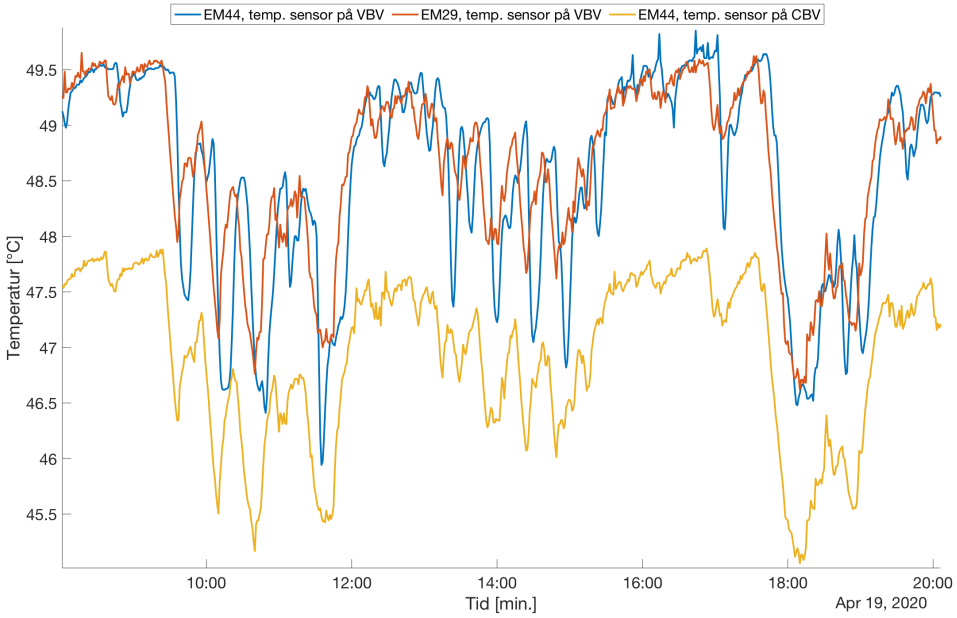


Figur 5.5. Temperaturmålinger for cirkulation målt med energimåler nr. 44. "A" viser tidspunktet for afsyring af veksler.

Årsagen til de første to udsving i cirkulationstemperaturen er ukendt, imens det sidste udsving, markeret med "A", skyldes afsyring af veksleren.

Afvigelse mellem de målte varmt brugsvandstemperaturer

Efter udbedring af fejlen vedrørende høje varmt brugsvandstemperaturer, vist på figur 5.4, blev der observeret en afvigelse mellem de to varmt brugsvandstemperaturer, målt med henholdsvis Brunata energimåler nr. 29 og 44, med sensorerne 29 T1 og 44 T1. Afvigelsen mellem temperatursensorerne er vist på figur 5.6, sammen med temperaturen for cirkulation, målt med sensor 44 T2.



Figur 5.6. Temperaturmålinger for varmt brugsvand og cirkulation, målt med Brunata energimåler nr. 29 og 44.

Af figur 5.6 fremgår det, at mønsteret for udsvingene i varmt brugsvandstemperaturen, målt med Brunata energimåler nr. 44, afviger fra mønsteret for de øvrige temperatursæt, vist på figur 5.6. På baggrund af ovennævnte, er Brunata energimåler nr. 29's sensor 29 T1 vurderet at være mest troværdig, hvorfor det i analyserne er valgt at anvende temperatursættet målt med Brunata energimåler nr. 29, for perioden efter udbedringen, vist på figur 5.4. Forud for udbedring af den løse forbindelse for sensor 29 T1, er data fra sensor 44 T1 benyttet, hvor der er korrigeret for afvigelsen mellem de to sensorer.

Forbrugsprofiler på Aalborgkollegiet 6

I dette kapitel dokumenteres og redegøres der for Aalborgkollegiets forbrug og forbrugsmønstre for varmt brugsvand på bygningsniveau, med henblik på at identificere generelle tendenser i forbrugsmønstret samt sammenligne Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug med litteraturen omtalt i litteraturgennemgangen i kapitel 1. Derudover redegøres der for de væsentligste konklusioner for seks udvalgte tapsteder, for at vise eksempler på observerede forbrugsmønstre, samt at opnå fagligt grundlag til at lave kunstige forbrugsprofiler for Aalborgkollegiet, beskrevet i kapitel 11 på side 105.

Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug stemmer overens med den beskrevne litteratur. Dog er det er observeret, at Coronanedlukningen, beskrevet i afsnit 3.2 på side 20, har haft en betydelig indvirkning på beboernes varmtvandsforbrug i hverdagene, hvormed Coronanedlukningens indvirkning har medført, at Aalborgkollegiets overordnede forbrugsmønster for hverdage tilnærmelsesvist ligner forbrugsmønsteret for weekender.

Tabel 6.1 viser en oversigt og klassificering af det overordnede forbrugsmønster for hverdage, for hver af de tre måleperioder, grundet Coronanedlukningens påvirkning af forbrugsmønsteret.

Måleperiode	Dato	Forbrug på hverdage
1	2/11-2019 - 12/3-2020	Typisk
2	13/3-2020 - 24/3-2020	Atypisk grundet Coronanedlukning
3	27/3-2020 - 19/4-2020	Atypisk grundet Coronanedlukning

Tabel 6.1. Oversigt over tidsperiode og udviklingen i varmt vandsforbruget for hverdage i hver af de tre måleperioder.

Der er observeret en afvigelse på 0,8 L/pers./døgn mellem varmtvandsforbrugene i måleperiode 2 og 3. Grundet den minimale afvigelse i varmtvandsforbruget i [L/pers./døgn] er disse præsenteret samlet i det følgende kapitel. Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug, henholdsvis før og under Coronanedlukningen, kan ses i Appendiks G.1 på side 157.

Til undersøgelse af typiske forbrugsmønstre på bygningsniveau og observerede forbrugsmønstre på tapstedniveau, er konklusionerne fra kapitel F på side 151, omhandlende integrations- og summeringstider, anvendt. Integrations- og summeringstider er vurderes af være afhængig af hvad der skal undersøges, hvorfor der er anvendt forskellige summeringstider.

6.1 Varmtvandsforbrug i litteraturen

I dette afsnit sammenlignes Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug med de gennemsnitlige varmtvandsforbrug, beskrevet i litteraturen i henhold til kapitel 1. Sammenligningen skal give et indblik i, hvorledes Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug forholder sig i forhold til andre boligtyper.

Tabel 6.2 viser Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug, fordelt på antal personer for måleperiode 1, sammenlignet med de gennemsnitlige varmtvandsforbrug beskrevet i den omtalte litteratur. Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug kan ses i Appendiks G.1 på side 157. Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug pr. person for måleperiode 2 og 3, bestemt til 42,1 L/pers./døgn, er udeladt fra sammenligningen, da nogle beboere tager væk fra Aalborgkollegiet grundet Coronanedlukningen, jævnfør forbrugerundersøgelsen i Appendiks C på side 127, hvorfor det vurderes, at det gennemsnitlige varmtvandsforbrug i måleperiode 1 er mest repræsentativt for Aalborgkollegiet.

Måleperiode/kilde	**Bygningstype**	**Varmtvandsforbrug** [L/pers./døgn]
Aalborgkollegiet, måleperiode 1	Kollegium	47,1
Be18, [Aggerholm, 2018]	Alle boliger	41,1*
[Kaiser Ahmed, 2015]	Boligejendomme	43
[Toode, 2006]	Boligejendomme	44
[Bøhm, 2012]	Boligejendomme	46,7 - 143**
[Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019]	Boligejendomme	22 22 46

Tabel 6.2. Sammenligning af varmtvandsforbrug pr. person for henholdsvis Aalborgkollegiet og litteratur beskrevet i litteraturstudiet. *: Denne værdi er omregnet fra $60\,m^3$/4 pers./år, som er angivet i [Aggerholm, 2018]. **: Omregnet fra 1,4 - $4{,}3\,m^3$/lejlighed/måned for 1 pers./lejlighed med 30 døgn/måned.

Af tabel 6.2 fremgår det, at Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug pr. person for måleperiode 1 ligger højere end de målte varmtvandsforbrug for boligejendommene beskrevet i [Kaiser Ahmed, 2015] og [Toode, 2006], foretaget i henholdsvis Finland og Estland. Afvigelsen mellem Aalborgkollegiet og de omtalte studier kan skyldes nationale forskelle, sæsonvariationer samt mulige forskelle i måden, beboernes varmtvandsforbrug afregnes på. [E. Fuentes, 2017] [Kaiser Ahmed, 2015]

At Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug ligger over de førnævnte boligejendomme kan skyldes, at varmtvandsforbruget på Aalborgkollegiet måles og afregnes på bygningsniveau, hvorved beboerne ikke afregnes direkte for eget forbrug. Det er et velkendt fænomen, at fælles afregning kan medføre reduceret opmærksomhed på varmtvandsforbruget hos de individuelle beboere, hvorved de ubevist får et øget varmtvandsforbrug. I henhold til [E. Fuentes, 2017] og [Kaiser Ahmed, 2015] kan sæsonvariationer påvirke varmtvandsforbruget, så der sker en øgning af varmtvandsforbruget om vinteren og en reduktion om sommeren. Da målingerne af Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug er foretaget i vinterhalvåret, kan måleresultaterne være påvirket af sæsonvariationer, sammenlignet med hvis dataopsamlingen havde forløbet i et helt år.

Ved sammenligning af Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug og det danske studie [Bøhm,

2012], fremgår det, at Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug ligger inden for det angivne interval. Intervallet er baseret på gennemsnitlige varmtvandsforbrug for lejligheder, hvor antallet af beboere er ukendt, dog antages det, at lejligheder med én beboer ligger i den lave ende af førnævnte interval. På baggrund af denne antagelse, er det vurderet, at Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug pr. person pr. døgn stemmer overens med varmtvandsforbruget for de danske boligejendomme, beskrevet i [Bøhm, 2012].

Overensstemmelsen mellem Aalborgkollegiets og boligejendommenes varmtvandsforbrug pr. person viser, at varmtvandsforbruget for en beboer på et kollegium tilnærmelsesvist kan sidestilles med varmtvandsforbruget for en beboer i en typisk boligejendom i de omtalte lande.

I modsætning til boligejendomme, er der kun overensstemmelse mellem Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug pr. person og ét af de tre enfamiliehuse. Afvigelsen mellem Aalborgkollegiet og enfamiliehusene kan skyldes, at varmtvandsforbruget for kollegier og boligejendomme typisk har flere beboere, vis forbrug kan udligne hinanden ved en gennemsnitsberegning, hvorimod enfamiliehuse kun inkluderer forbrug fra én familie med samme, overordnede vaner. Derved kan der være stor variation i varmtvandsforbruget fra enfamiliehus til enfamiliehus, hvilket ligeledes fremgår ved sammenligning af de tre enfamiliehuse, hvor det ene hus har et væsentligt højere varmtvandsforbrug pr. person pr. døgn.

Udover sammenligningen af varmtvandsforbrug i [L/pers./døgn], er Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug ligeledes sammenlignet med standardværdien for energirammeberegninger for boliger, beskrevet i [Aggerholm, 2018]. Varmtvandsforbrugene for de førnævnte er vist i tabel 6.3.

Måleperiode/kilde	**Varmtvandsforbrug [L/m^2/år]**
Aalborgkollegiet, måleperiode 1	419,4
Be18, [Aggerholm, 2018]	250

Tabel 6.3. Sammenligning af varmtvandsforbrug pr. person og pr. boligareal, for henholdsvis Aalborgkollegiet og standardværdien for boliger i [Aggerholm, 2018].

Af tabel 6.3 fremgår det, at der er stor afvigelse mellem Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug i [L/m^2/år] sammenlignet med standardværdien, som anvendes til energirammeberegninger for boliger. Afvigelsen kan skyldes, at Aalborgkollegiet har en højere beboertæthed, grundet at det er et kollegium, sammenlignet med andre boligtyper, hvor der typisk er et større boligareal pr. person.

På baggrund af ovenstående kan det derfor konkluderes, at standardværdien på 250 L/m^2/år ikke nødvendigvis er repræsentativ for kollegier, og at der for denne boligtype bør anvendes et varmtvandsforbrug, som ligeledes tager højde for bygningens forventede antal beboere.

6.2 Forbrugsprofiler på bygningsniveau

De gennemsnitlige varmtvandsforbrug, præsenteret i det forudgående afsnit, giver et overordnet overblik over varmtvandsforbruget. For at opnå et mere nuanceret indblik

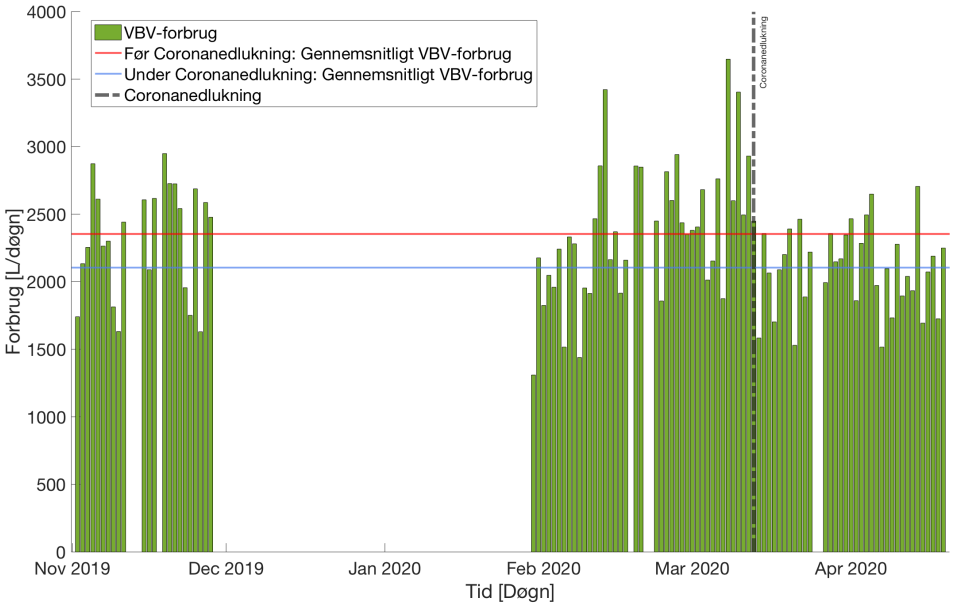
i fordelingen af Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug, er der foretaget en analyse af Aalborgkollegiets hverdags- og weekendprofiler på timebasis, med henblik på at undersøge generelle tendenser i Aalborgkollegiets forbrugsmønstre samt påvirkningen af Coronanedlukningen. Derudover er der foretaget en sammenligning af Aalborgkollegiets typiske forbrugsprofiler sammen med forbrugsprofiler fra litteraturen, med det formål at undersøge ligheder og forskelle.

Grundet den observerede forskel på Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmvandsforbrug i måleperiode 1 og kombinationen af måleperiode 2 og 3, er forbrugsprofilerne inddelt efter betegnelserne *før* og *under* Coronanedlukningen, hvilket fremgår af tabel 6.4.

Måleperiode	Dato	Inddeling i forhold til Coronanedlukning
1	2/11-2019 - 12/3-2020	Før Coronanedlukning
2	13/3-2020 - 24/3-2020	Under Coronanedlukning
3	27/3-2020 - 19/4-2020	

Tabel 6.4. Oversigt over tidsperiode for hver af de tre måleperioder samt deres inddeling i forhold til Coronanedlukningen.

For at få et indblik i variationen i varmtvandsforbruget pr. døgn og dennes påvirkning af Coronanedlukningen, er Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug undersøgt pr. døgn, hvilket er vist på figur 6.1. De afbildede gennemsnit kan være påvirkede af forskelle i måleperiodernes længde.



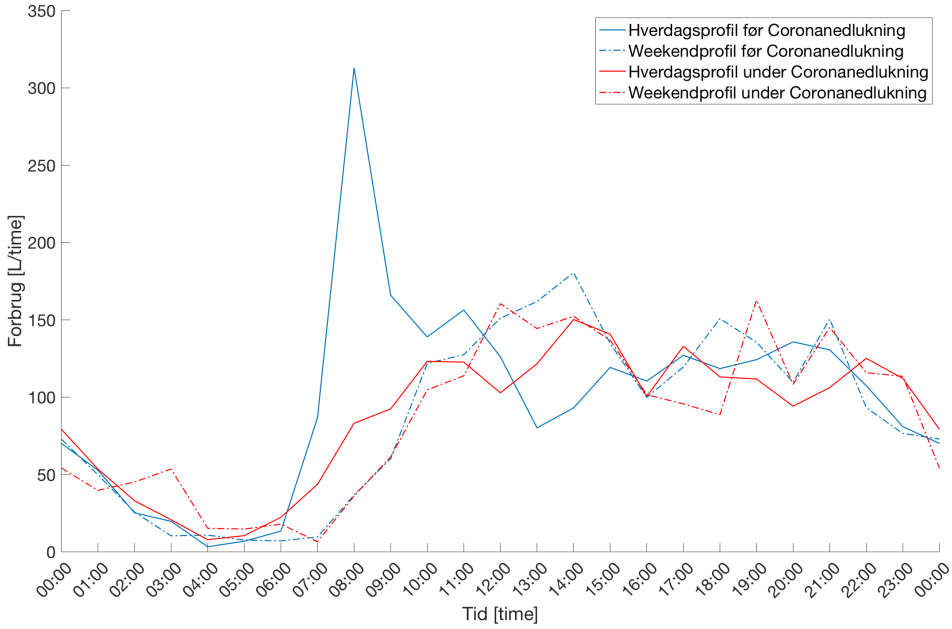
Figur 6.1. Udviklingen i Aalborgkollegiets samlede varmtvandsforbrug pr. døgn, med et gennemsnitligt forbrug før og under Coronanedlukningen på henholdsvis 2354 L/døgn og 2106 L/døgn.

Ved sammenligning af varmtvandsforbrugene på figur 6.1 kan det ses, at Coronanedlukningen har medført en reduceret variation i varmtvandsforbrugene for de forskellige døgn, hvilket er vurderet til at skyldes følgende:

- Nogle beboere tager væk fra Aalborgkollegiet i dele af Coronanedlukningsperioden, jævnfør forbrugerundersøgelsen i Appendiks C på side 127.
- Beboernes rutiner er blevet mere ensartede grundet den øgede forekomst af hjemmearbejde, i henhold til afsnit 3.2 på side 20.

Årsagen til, at Coronanedlukningen har medført en reduceret variation i varmtvandsforbrugene kan være, at nogle beboere tager væk fra Aalborgkollegiet, hvilket reducerer spredningen i forbrugsmønstrene, samt at de tilstedeværende beboere generelt er mere hjemme, både i og udenfor arbejdstiden, hvorved beboernes varmtvandsforbrug bliver mere ens for de forskellige døgn.

På baggrund af den observerede forskel i varmtvandsforbruget, som følge af Coronanedlukningen, er der foretaget en analyse af de gennemsnitlige hverdags- og weekendprofiler, henholdsvis før og under Coronanedlukningen, med henblik på at redegøre for Coronanedlukningens indvirkning på forbrugsmønstrene. Denne redegørelse fremgår af figur 6.2, hvor de gennemsnitlige varmtvandsforbrug er summeret på timebasis i overensstemmelse med Appendiks F på side 151, hvor denne summeringstid blev vurderet passende til analyse af generelle tendenser.



Figur 6.2. Gennemsnitlige forbrugsprofiler for Aalborgkollegiets samlede varmtvandsforbrug før og under Coronanedlukningen, for henholdsvis hverdage og weekender. Forbruget i tidrummet 00:00-01:00 er vist kl. 01:00 og så fremdeles.

De følgende afsnit beskriver de væsentligste konklusioner, som er udledt af forbrugsprofilerne på figur 6.2.

Før Coronanedlukningen

Det fremgår af figur 6.2, at Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug før Coronanedlukningen generelt følger et typisk mønster, med en tydelig forskel på hverdage og weekender:

- Hverdage: Morgenspidsbelastning i tidsrummet 07:00 - 09:00, efterfulgt af et jævnt forbrug
- Weekender: Ingen spidsbelastning. Jævnt forbrug i størstedelen af tiden

Den gennemsnitlige morgenspidsbelastning for hverdage afspejler, at en stor del af Aalborgkollegiets beboere har en typisk arbejdsdag, hvor de er udenfor hjemmet i dagtimerne. Det efterfølgende jævntfordelte varmtvandsforbrug på hverdage skyldes en kombination af Aalborgkollegiets beboerantal, samt at beboerne er under uddannelse, og i den forbindelse har varierende mødetider kombineret med en varierende grad af hjemmearbejde.

Fra kl. 15:00 og fremefter følger hverdagsprofilet og weekendprofilet hinanden i overordnede træk frem til kl. 22:00, hvilket viser, at der er en stor spredning i beboernes aftenrutiner for henholdsvsis hverdage og weekend.

Under Coronanedlukningen

Under Coronanedlukningen forekommer der ikke nogen morgenspidsbelastning i Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug for hverdage, hvormed hverdagsprofilet får samme karakter som weekendprofilet, med et gennemsnitligt, jævntfordelt varmtvandsforbrug frem til kl. 23:00. Den primære forskel mellem hverdagsprofilet og weekendprofilet under Coronanedlukningen er, at der fra kl. 06:00 og frem til kl. 11:00 er ca. en times forskydelse imellem de to forbrugsprofiler. Forskydningen mellem hverdags- og weekendprofilet i morgentimerne afspejler, at en andel af Aalborgkollegiets beboere fortsat skal hjemmefra om morgenen og derfor har fastholdt deres typiske morgenrutiner.

Det jævntfordelte varmtvandsforbrug i dagtimerne og aftentimerne skyldes formentlig, at størstedelen af beboerne arbejder hjemmefra, som beskrevet i måleplanen i afsnit 3.2, og beboerne derfor ikke nødvendigvis har typiske morgenrutiner.

Sammenligning på tværs af Coronanedlukning

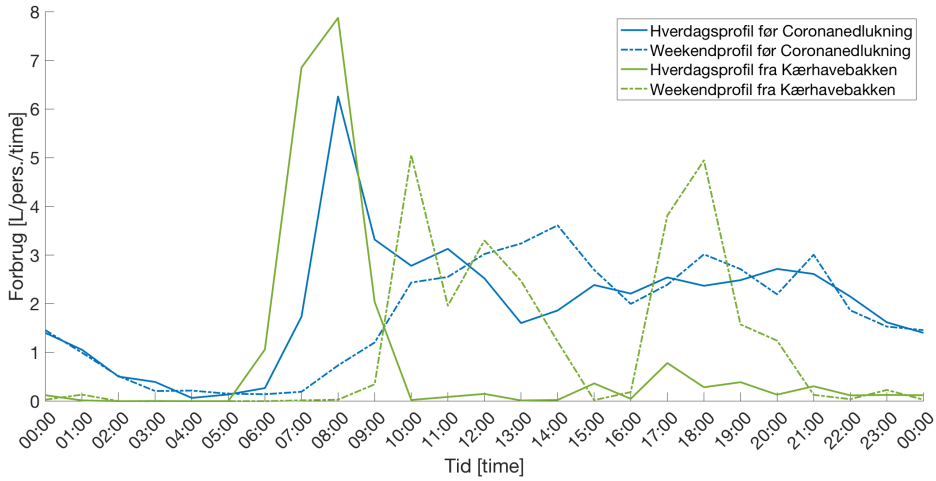
Ved sammenligning af forbrugsprofilerne på tværs af Coronanedlukningen, fremgår det, at hverdagsprofilet under nedlukningen i høj grad ligner begge weekendprofiler, med undtagelse af forbruget om morgenen, som stiger en time før i hverdagene. Det kan dermed konkluderes, at Coronanedlukningen har medført et atypisk forbrugsmønster for hverdage på Aalborgkollegiet, imens forbrugsmønsteret for weekender stort set er upåvirket.

Derudover kan det ses, at Coronanedlukningen har medført en forskydning af beboernes aftenrutiner, idet det gennemsnitlige varmtvandsforbrug har nogenlunde samme niveau kl. 22:00 før Coronanedlukningen, som det har kl. 23:00 under Coronanedlukningen. Denne forskydning kan muligvis hænge sammen med, at mange beboere arbejder hjemmefra og derfor sparer transporttid, hvorved de kan gå senere i seng og sove længere om morgenen. Derudover kan det skyldes, at alle kulturtilbud er lukket ned, og at besøg frarådes i samme periode, hvilket gør, at mange formentlig ikke har det samme niveau af arrangementer at skulle møde op til som de plejer, hverken i hverdage eller weekender.

6.2.1 Sammenligning af forbrugsprofiler for forskellige boligtyper

I det følgende foretages en sammenligning af Aalborgkollegiets typiske forbrugsprofiler med eksempler på forbrugsprofiler beskrevet i litteraturen [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019] og [Kaiser Ahmed, 2016], som beskrevet i afsnit 1.1. Aalborgkollegiets forbrugsprofiler før Coronanedlukningen er anvendt til sammenligningen, eftersom at disse profiler afspejler de typiske forbrugsmønstre, hvilket øger sammenligneligheden med litteraturen, da de beskrevne studier ligeledes afspejler typiske forbrugsprofiler. Formålet er at undersøge, om Aalborgkollegiets gennemsnitlige forbrugsprofiler i [L/pers./time] er typiske i forhold til eksempler på forbrugsprofiler for andre boligtyper.

Figur 6.3 viser en sammenligning af gennemsnitlige forbrugsprofiler for hverdage og weekender, for henholdsvis Aalborgkollegiet før Coronanedlukningen og enfamiliebolig nr. 1 omtalt som Kærhavebakken, beskrevet i [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019]. Enfamilieboligen Kærhavebakken huses af en familie på fire personer. Forbrugsprofilerne for Kærhavebakken er inddelt i henholdsvis hverdage og en kombination af weekender og feriedage.



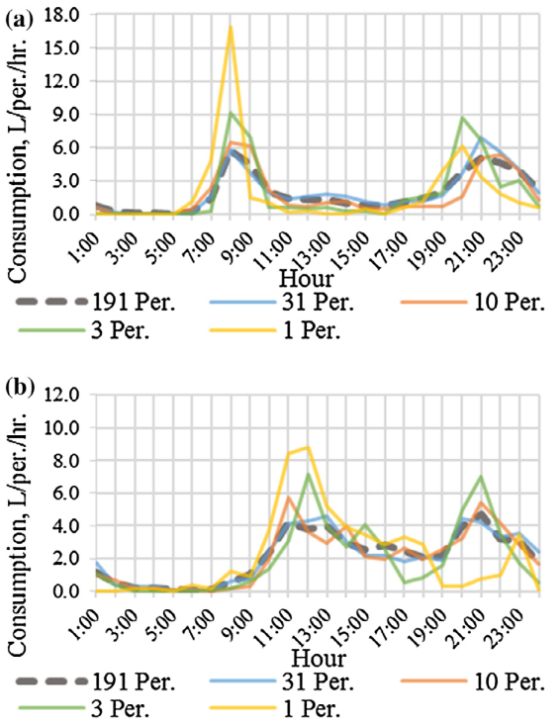
Figur 6.3. Gennemsnitlige varmtvandsforbrug for hverdage og weekender i [L/pers./døgn] for Aalborgkollegiet og Kærhavebakken. Forbruget i tidrummet 00:00-01:00 er vist kl. 01:00 og så fremdeles. [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019]

I henhold til [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019] går to af Kærhavebakkens beboere i morgenbad dagligt, hvilket forklarer den store morgenspidsbelastning for hverdage i tidsrummet fra kl. 06:00 - 08:00. Efterfølgende er hele familien udenfor hjemmet frem til eftermiddagstimerne, undtaget en beboer, som arbejder hjemmefra hver fredag.

Det fremgår af figur 6.3, at morgenspidsbelastningerne for hverdage falder inden for samme tidsrum for både Aalborgkollegiet og Kærhavebakken, hvilket viser, at Aalborgkollegiets morgenspidsbelastning følger et typisk forbrugsmønster for hverdage, hvor beboere er udenfor hjemmet i dagtimerne. Efter morgenspidsbelastningen på hverdage adskiller Aalborgkollegiets jævntfordelte varmtvandsforbrug sig dog væsentligt fra Kærhavebakken, hvilket viser, at Aalborgkollegiets beboerantal og beboernes beskæftigelse påvirker forbrugsprofilet for varmtvandsforbrug på hverdage.

For weekendprofilerne er der ligeledes en væsentlig afvigelse mellem Aalborgkollegiet og Kærhavebakkens gennemsnitlige varmtvandsforbrug, idet der for Kærhavebakken forekommer en tydelig spidsbelastning i henholdsvis formiddags- og aftentimerne, hvorimod Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug er jævnt fordelt og ikke har nogen spidsbelastninger.

Udover enfamiliehuset Kærhavebakken, er Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug sammenlignet med [Kaiser Ahmed, 2016], hvor forbrugsprofiler blev fundet i sammenhæng med forskellige beboerantal, som vist på figur 6.4.



Figur 6.4. Foreslåede forbrugsprofiler for varmt brugsvand for november. *a* er for hverdage og *b* er for weekender. [Kaiser Ahmed, 2016]

Sammenligningen viste, at der for de undersøgte etageboliger generelt forekommer både en morgen- og aftenspidsbelastning i hverdagene, henholdsvis i tidsrummene 07:00 - 10:00 og 20:00 - 23:00, hvilket afviger fra Aalborgkollegiets hverdagsprofil, vist på figur 6.3, idet der her kun forekommer en morgenspidsbelastning i tidsrummet 07:00 - 09:00. De gennemsnitlige weekendprofiler for etageboligerne, med 31 personer og opefter, stemmer overens med weekendprofilet for Aalborgkollegiet, idet der i begge tilfælde er et jævntfordelt varmtvandsforbrug, hvilket formentligt skyldes, at begge boligtyper har mange beboere og derfor en stor spredning i varmtvandsforbrugene.

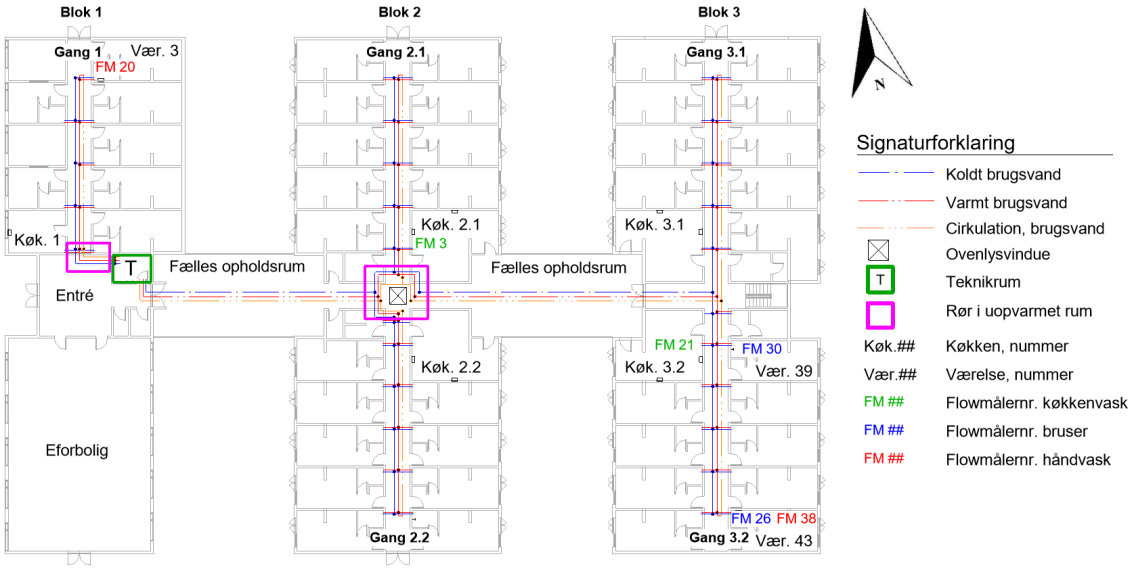
På baggrund af ovenstående kan det derfor konkluderes, at Aalborgkollegiets forbrugsprofiler adskiller sig fra forbrugsprofilerne for de undersøgte boligejendomme, grundet det jævntfordelte forbrug i dag- og aftentimerne. Afvgigelsen mellem Aalborgkollegiet og boligejendommene kan skyldes, at Aalborgkollegiets beboere er studerende og derfor har en øget variation i mødetider og antal hjemarbejdsdage.

6.3 Sammenligning af udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet

Som det fremgår af de forudgående afsnit, er Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug meget jævntfordelt, hvilket afspejler en stor spredning i beboernes forbrugsmønstre. Dette afsnit redegør for tappeprofiler for udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, med henblik på at præsentere de væsentligste konklusioner fra analysen af tappeprofiler, beskrevet i Appendiks G.3 på side 159. Grundet manglende, pålidelig flowdata fra flowmålerne på de forskellige tapsteder, er flowmålernes temperaturprofiler i stedet anvendt til at estimere tidspunkt og varighed for hver tapning. Denne metode fremgår af Appendiks G.2.

Analysen er foretaget på baggrund af Huba flowmålerdata på seks udvalgte tapsteder, herunder to køkkenvaske, to håndvaske og to brusere, vis placering er vist på figur 6.5. Da der blot er foretaget målinger på to af hver type tapsted, kan konklusionerne i det følgende afsnit ikke anvendes til fastsættelse af generelle tendenser om Aalborgkollegiets forbrugsmønstre for håndvaske og brusere, men blot give et indblik i forbrugsmønstre for udvalgte tapsteder på et kollegium.

De udvalgte tapsteder er fordelt på fem rum på Aalborgkollegiet. Dataopsamlingen er foretaget i perioden 13/3 - 24/3-2020, hvor Coronanedlukningen, i henhold til afsnit 6.2 på side 51, bevirkede, at Aalborgkollegiets samlede, gennemsnitlige forbrugsmønstre ændrede sig for hverdagene, hvilket kan have resulteret i atypiske forbrugsmønstre for de undersøgte tapsteder, beskrevet i dette afsnit.



Figur 6.5. Oversigt over placering af flowmålere. Dette er samme figur som figur 3.5.

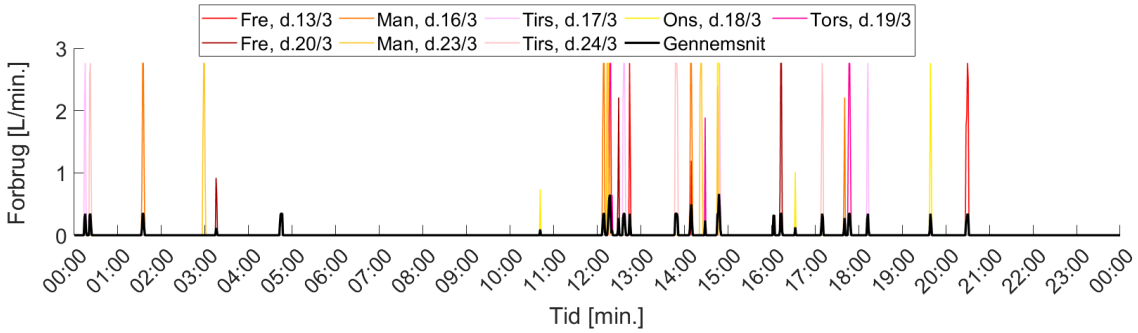
Køkken

I henhold til tappeprofilerne i Appendiks G.3 og den statistiske analyse i kapitel 7, blev der observeret en jævn fordeling af de registrerede tapninger i køkken 2.1 og 3.2, hvilket stemmer overens med det observerede forbrugsmønster på bygningsniveau i afsnit 6.2. På baggrund af overensstemmelsen mellem Aalborgkollegiets samlede, gennemsnitlige forbrugsprofiler og tendenserne for tappeprofilerne i køkkenerne, er det vurderet, at

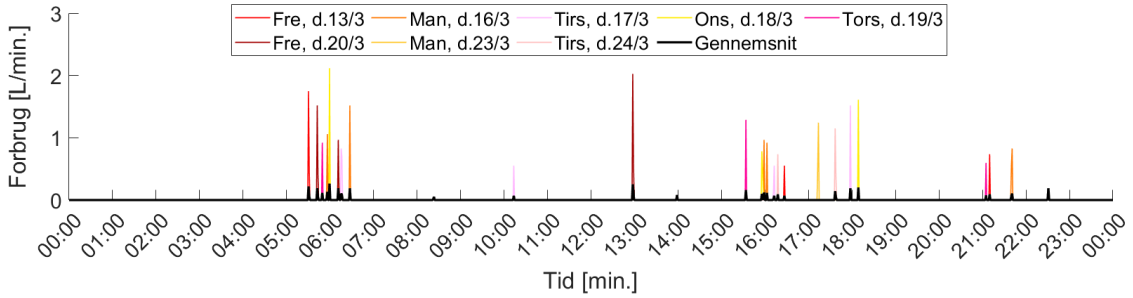
køkkenernes tappeprofiler er repræsentative for den jævne fordeling af tapningerne. Vurderingen er dog med forbehold for den usikkerhed, da der kun er måledata for én af to køkkenvaske pr. køkken.

Håndvask

For håndvasken i henholdsvis kollegieværelse 3 og 43 blev der observeret to vidt forskellige forbrugsmønstre, hvor beboeren på kollegieværelse 43 har en typisk døgnrytme og er udenfor hjemmet i dagtimerne, imens beboeren på kollegieværelse 3 ofte går sent i seng og står sent op. Hverdagsprofilerne for de to håndvaske er vist på henholdsvis figur 6.6 og 6.7 for kollegieværelse 3 og 43.



Figur 6.6. Tappeprofil for hverdage og dertilhørende gennemsnit på minutbasis for håndvasken i kollegieværelse 3.



Figur 6.7. Tappeprofil for hverdage og dertilhørende gennemsnit på minutbasis for håndvasken i kollegieværelse 43.

Morgenspidsbelastningen mellem kl. 05:30 - 06:30 for håndvasken på kollegieværelse 43, vist på figur 6.7, stemmer overens med tidsrummet, hvor morgenspidsbelastningen begynder at stige på bygningsniveau for hverdage før Coronanedlukningen, som vist på figur 6.2. Overensstemmelsen skyldes, at denne beboer har en beskæftigelse, som ikke er omfattet af Coronanedlukningen, hvilket underbygges af, at beboeren er observeret iklædt arbejdstøj i morgentimerne. Grundet ovenstående vurderes det, at denne beboers forbrugsmønster er tilnærmelsesvist upåvirket af Coronanedlukningen.

Til sammenligning forekommer spidsbelastningen for håndvasken på kollegieværelse 3 i tidsrummet mellem kl. 12:00 - 12:45, vist på figur 6.6, grundet at beboeren har en atypisk døgnrytme, i forhold til en typisk arbejdsdag mellem kl. 08:00 - 16:00. Dog kan beboerens forbrugsmønster og døgnrytme være påvirket af Coronanedlukningen.

Som det fremgår af figur 6.6 og 6.7, er der stor forskel på de to registrerede forbrugsmønstre, særligt med henblik på morgenspidsbelastningen og fordelingen af tapninger i løbet af døgnets timer, hvor den ene beboer har en typisk arbejdsdag med faste rutiner, imens den anden beboer har en atypisk døgnrytme med et mere jævntfordelt varmtvandsforbrug i løbet af døgnet.

Bruser

For de to udvalgte brusere på henholdsvis kollegieværelse 39 og 43, blev der observeret store forskelle i beboernes foretrukne badelængde. Badene for beboeren på værelse 39 blev foretaget i tidsrummet 09:00 - 11:00 og varede i gennemsnit 7 minutter, imens beboeren på værelse 43 foretog bade i tidsrummet 13:00 - 18:30, med en gennemsnitlig badevarighed på 32 minutter.

6.4 Opsummering

En sammenligning mellem Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug litteraturen viste, at Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug i [L/pers./døgn] tilnærmelsesvist stemmer overens med varmtvandsforbruget for boligejendomme. Dog er Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug en smule højere end de beskrevne boligejendomme, hvilket kan skyldes nationale forskelle, afregningsmetode samt påvirkning af sæsonvariationer for Aalborgkollegiets måledata. Der blev fundet en stor uoverensstemmelse mellem Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug i [L/m^2]/år og standardværdien på 250 L/m^2/år, beskrevet i [Aggerholm, 2018], hvilket er vurderet at skyldes en høj beboertæthed. Det vurderes derfor, at standardværdien ikke nødvendigvis er repræsentativ for kollegier, og at bygningens forventede antal beboere bør inkluderes i estimeringen af varmtvandsforbruget, som anvendes til energirammeberegninger.

Ved analyse af Aalborgkollegiets forbrugsprofiler, henholdsvis før og under Coronanedlukningen, blev det konkluderet, at hverdagsprofilet under Coronanedlukningen tilnærmelsesvist fremstår som et weekendprofil, hvorimod weekendprofilet er uændret.

Ud fra en sammenligning mellem Aalborgkollegiets typiske forbrugsprofiler før Coronanedlukningen, og udvalgte bygningstyper fra litteraturen, er det vurderet, at der kun er overensstemmelse mellem hverdagsprofilerne i tidsrummet for morgenspidsbelastningerne for henholdsvis Aalborgkollegiet, Kærhavebakken og finske boligejendomme.

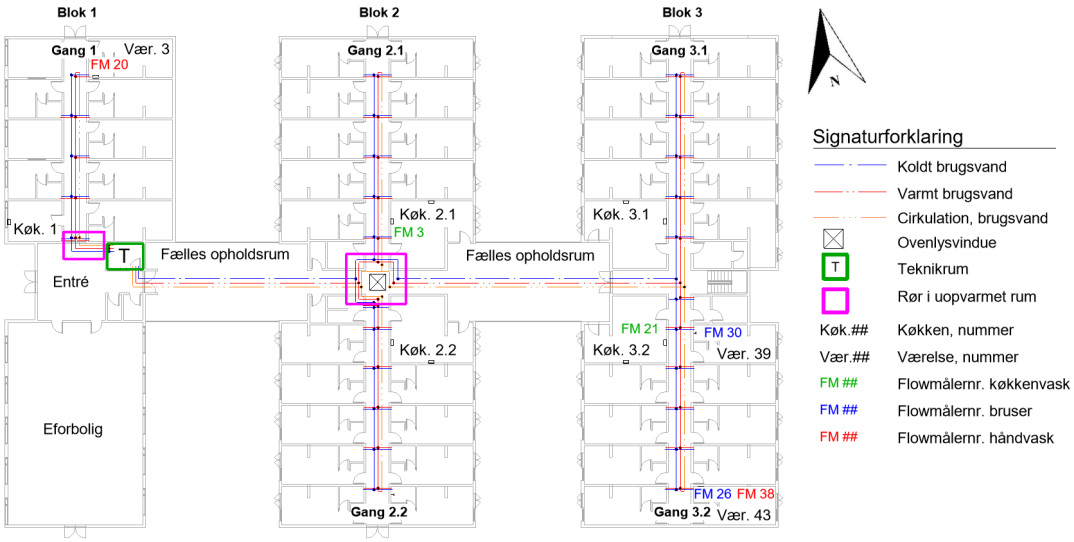
På baggrund af tappeprofiler fra seks udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, blev der påvist en stor spredning i måledataene, hvilket underbygger, at Aalborgkollegiet er en beboelsesejendom med mange beboere, hvor der forekommer forskellige forbrugsmønstre, jævnfør det jævntfordelte varmtvandsforbrug på bygningsniveau i afsnit 6.2.

Statistisk analyse for Aalborgkollegiet

7

Dette kapitel redegør for en statistisk analyse af måledata fra seks udvalgte tapsteder, med henblik på at undersøge tendenser og forskelle blandt de forskellige tapsteder, vist på figur 7.1. Formålet er at overskueliggøre måledataene for de udvalgte tapsteder, med henblik på at sammenligne tapstederne på tværs at type, samt for at danne grundlag for analyse af energitab i kapitel 10 og fremstilling af kunstige forbrugsprofiler i kapitel 11.

Den statistiske analyse er foretaget på baggrund Huba flowmålerdata fra måleperiode 2, d. 13/3 - 24/3-2020, ved fremstilling af kumulative frekvenskurver, bestemt ud fra frekvensen af en værdi og den procentdel, denne værdi udgør i forhold til de resterende målinger for samme tapsted.



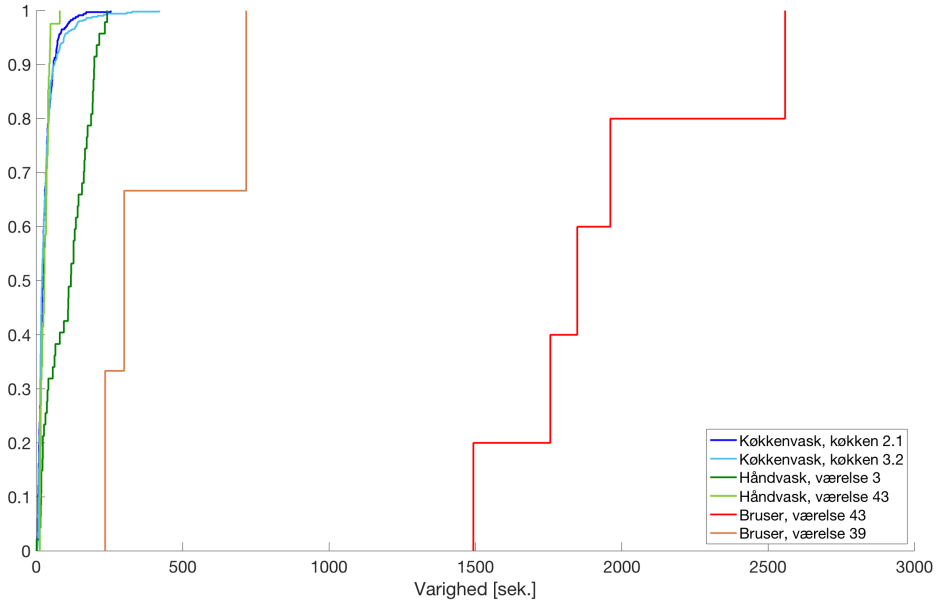
Figur 7.1. Oversigt over relevante rum og placering af flowmålerne angivet ud fra de tilsluttede Huba flowmålere.

Den statistiske analyse er foretaget for følgende parametre:

- Tappevarighed
- Tappetidspunkter
- Antal tapninger pr. døgn
- Tid mellem hver tapning
- Ventetid

7.1 Tappevarighed

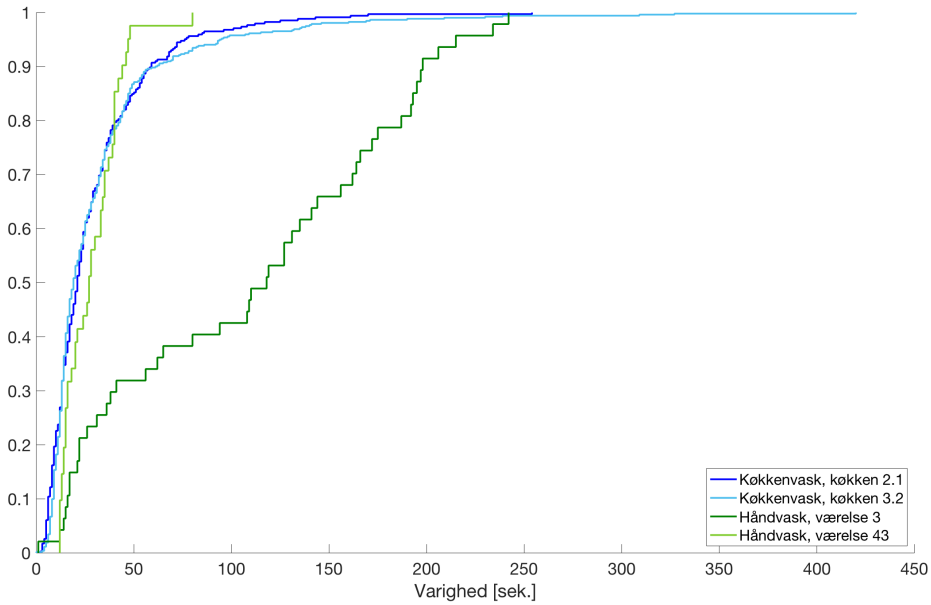
Dette afsnit dokumenterer fordelingen af tappevarighed for de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, med henblik på at skabe overblik over måledataene samt undersøge generelle tendenser for tappevarighederne. Den kumulative fordeling af varighederne for tapninger ved de udvalgte tapsteder af typerne køkkenvask, håndvask og bruser, kan ses på figur 7.2.



Figur 7.2. Kumulativ frekvenskurve for varigheden af tapninger målt med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

Af figur 7.2 fremgår det, at tapningerne ved køkkenvaskene og håndvaskene generelt har de korteste varigheder, sammenlignet med brusere. Derudover fremgår det, at bruserne har den største spredning i tappevarighed, hvor medianen for de to brusere er 300 og 1848 sekunder for henholdsvis kollegieværelse 39 og 43. Disse varigheder svarer til henholdsvis 5 og 30,8 minutter, hvilket afspejler en stor forskel imellem måledataene for de to brusere. Den tydelige trappestigning for bruserne skyldes det lave antal tapninger for disse tapsteder.

Grundet en stor forskel mellem tappevarigheder for køkken- og håndvaske, sammenlignet med brusere, er kurverne for køkken- og håndvaske vist alene på figur 7.3.



Figur 7.3. Kumulativ frekvenskurve for varigheden af tapninger målt med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

På figur 7.3 kan det ses, at der er en stor forskel på spredningen for håndvasken i kollegieværelse 3, sammenlignet med de øvrige tapsteder, hvilket ses ved, at den kumulative kurve for dette tapsted har en væsentligt fladere stigning. Derudover fremgår det, at kurverne for de to køkkenvaske tilnærmelsesvist er ens, hvilket viser, at beboerne på Aalborgkollegiet typisk benytter samme tappelængde ved køkkenvaske. Minimum, maksimum, gennemsnit og medianværdierne for varighederne, for de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, fremgår af tabel 7.1.

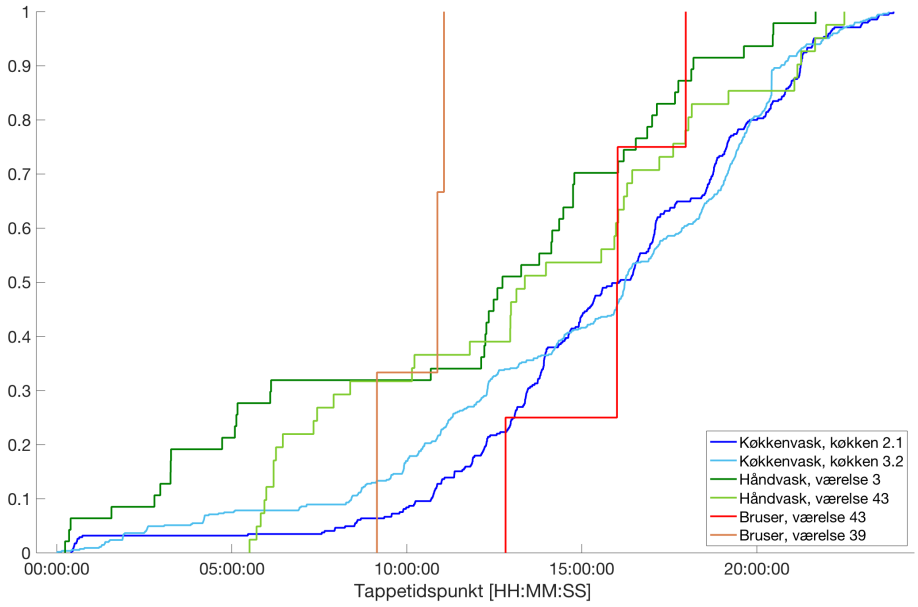
Placering	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**
Køkken, 2.1	2	28,9	21	254
Køkken 3.2	3	31,9	19	420
Håndvask, værelse 3	12	111	118	242
Håndvask, værelse 43	12	28,3	27	80
Bruser, værelse 39	235	417,3	300	717
Bruser, værelse 43	1493	1923	1848	2558

Tabel 7.1. Minimum, maksimum, gennemsnit og medianværdier for tappevarighed, for de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet.

Af tabel 7.1 fremgår det, at der er stor forskel på tappevarighederne for de udvalgte tapsteder på kollegieværelser, hvorimod der er en ubetydelig forskel mellem de to køkkenvaske. Dette viser, at der er stor forskel på forbrugsmønstre fra person til person, men at disse forskelle udlignes for tapsteder, som benyttes af flere personer.

7.2 Tappetidspunkt

Tappetider ved udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet er fastlagt, med henblik på at udlede, hvornår der oftest forekommer tapninger. Figur 7.4 viser de forskellige tappetidspunkter for udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet.



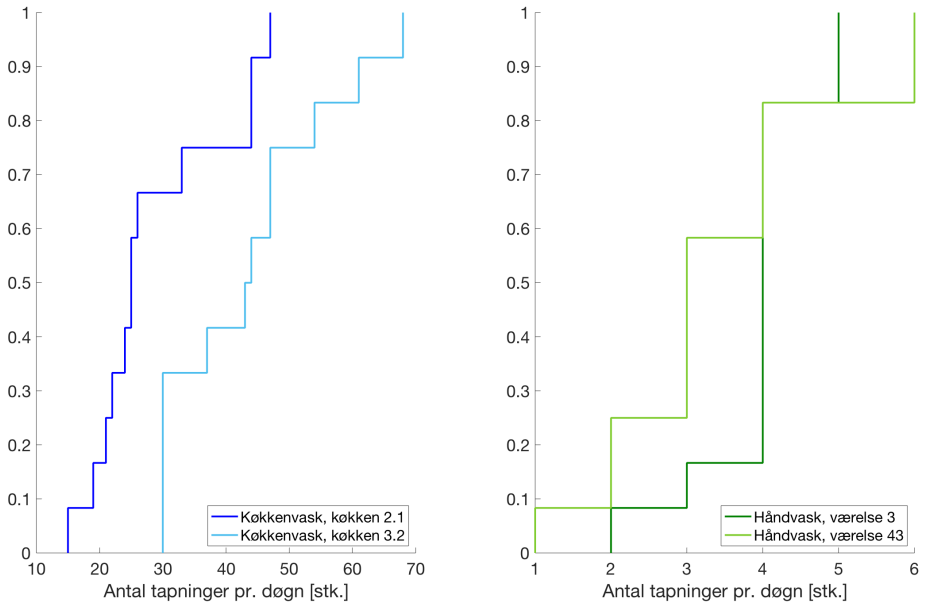
Figur 7.4. Kumulativ frekvenskurve for tappetidspunkter for tapninger, målt med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

Figur 7.4 viser, at der er en jævn fordeling af 90 % af tapningerne i tidsrummet kl. 11:45 - 22:10 for køkkenvasken i køkken 2.1, hvor der for køkken 3.2 forekommet en jævn fordeling for 83 % af tapningerne i tidsrummet kl. 09:30 - 22:10. Ovenstående viser at køkkenvaskene anvendes hyppigt i dag- og aftentimerne. For håndvaskene ses det, at 32 % af tapningerne foretages før kl. 06:07:15 og 08:22:56 for henholdsvis kollegieværelse 3 og 43. Dette afspejler en spredning i beboernes sengetider og mødetider. Efter ca. kl. 12:00, er der en jævnfordeling af tapningerne ved begge håndvaske, hvilket viser, at der er størst afvigelse mellem beboerne i morgentimerne. For brusebadene kan det ses, at spændet, hvori tapningerne finder sted, er mindre end for de øvrige tapsteder, grundet en stejlere stigning som følge af, at der er foretaget færre tapninger for disse tapsteder.

7.3 Antal tapninger pr. døgn

Antallet at tapninger pr. døgn er anvendt til fremstilling af kunstige profiler for Aalborgkollegiet, der benyttes til simuleringer, beskrevet i kapitel 11. For brusebade er der maksimalt registreret 1 tapning pr. døgn, hvorfor der ikke er foretaget en dybere analyse for disse.

Antallet af tapninger pr. døgn for de udvalgte tapsteder er vist på figur 7.5, hvor en stor spredning mellem antal tapninger for køkkenvaskene og håndvask ses.



Figur 7.5. Kumulativ frekvenskurve for antallet af tapninger målt på et forskellige tappetyper med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

Det fremgår af figur 7.5, at medianen for køkkenvasken i køkken 2.1 er 25 tapninger pr. døgn, hvor medianen i køkken 3.2 er 43 tapninger pr. døgn. Afvigelsen mellem medianerne viser en væsentligt forskel i hyppigheden af, hvor anvendte de to forskellige køkkenvaske er, på trods af, at de er tilknyttet samme antal beboere. Forskellen kan skyldes, at flere beboere, tilknyttet køkken 2.1, ikke har været hjemme i måleperioden. De to køkkener, der er målt i, indeholder hver 2 køkkenvaske, hvorfor forskellen i hyppigheden ligeledes kan skyldes at beboerne ikke benytter de to køkkenvaske lige hyppigt.

Håndvaskenes tappehyppighed er væsentligt lavere end køkkenvaskene, hvilket afspejler, at disse finder sted på hvert værelse, og derfor formodentligt kun viser én persons tapninger pr. døgn. Tabel 7.2 viser minimum, maksimum, gennemsnit og medianværdierne for antal tapninger pr. døgn, for de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet.

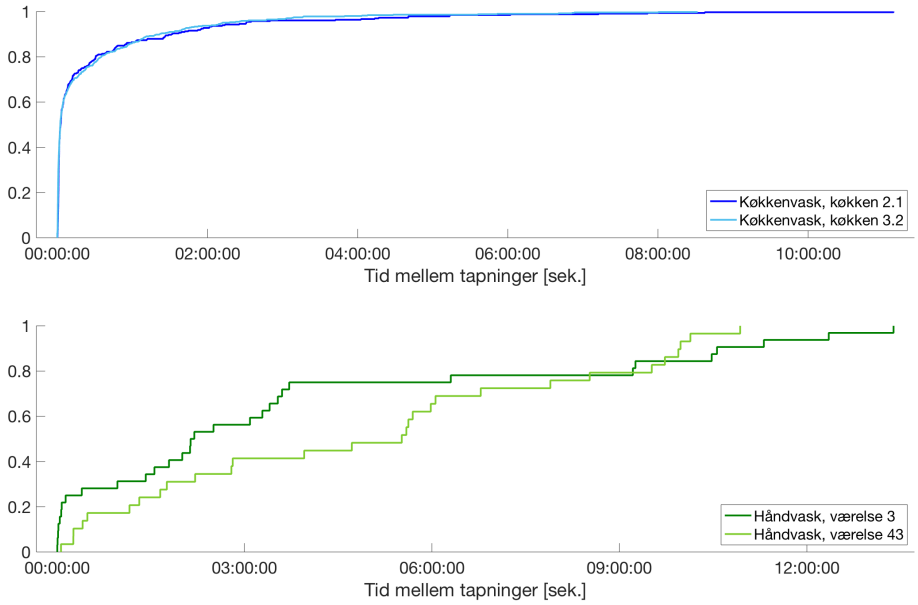
Placering	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**
Køkken, 2.1	15	29	25	47
Køkken 3.2	30	44	43	68
Håndvask, værelse 3	2	4	4	5
Håndvask, værelse 43	1	4	3	6

Tabel 7.2. Minimum, maksimum, gennemsnit og median for antal tapninger pr. døgn for de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet.

7.4 Tid mellem hver tapning

Det følgende afsnit dokumenterer fordelingen af tid mellem tapninger, foretaget pr. døgn, for hvert pågældende tapsted. En stor tidsforskel mellem tapninger resulterer i større tab i systemet, da vandet i rørene bliver afkølet, hvilket medfører øget energiforbrug til

opretholdelse af varmt brugsvandstemperaturen. Figur 7.6 viser tiden mellem tapninger for samme døgn, for henholdsvis køkken- og håndvaske.



Figur 7.6. Kumulativ frekvenskurve for tiden mellem tapninger på samme døgn, målt på et forskellige tappetyper med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

På figur 7.6 ses en tydelig forskel mellem køkken- og håndvaskene, hvoraf 75 % af tapningerne ved køkkenvaskene foretages med maksimalt 25 minutters mellemrum. Dette afspejler, at forbruget over et døgn fordeler sig forholdsvis jævnt, hvilket ligeledes kan ses på figur 7.4. For håndvaskene er der en større spredning, og tiden mellem tapninger er generelt længere, både sammenlignet med køkkenvaskene samt indbyrdes mellem de to håndvaske. For håndvaskene er medianen mellem tapninger på henholdsvis 2 og 5 timer, for kollegieværelse 3 og 43, hvilket underbygger en forskel på beboernes forbrugsmønstre, som vist på figur 7.4.

På baggrund af de hyppige tapninger i køkkenerne, sammenholdt med analyserne af energitab i kapitel 10 på side 91, formodes det, at der formentligt forekommer et større rørtab ved koblingsrørene i køkkener, sammenlignet med koblingsrørene i kollegieværelser.

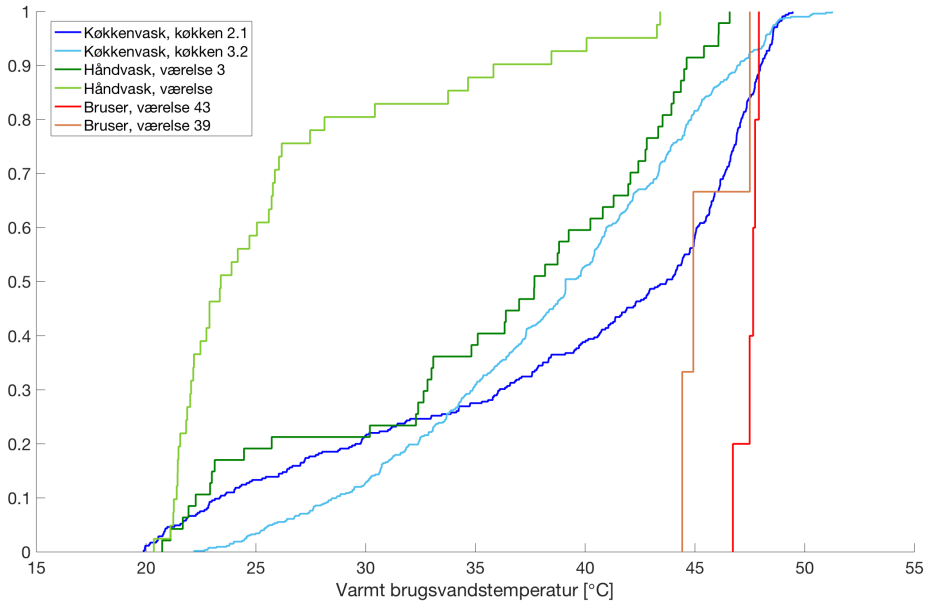
7.4.1 Ventetid

Dette afsnit redegør og dokumenterer for ventetiden for hver tapning ved de udvalgte tapsteder, for en varmt brugsvandstemperatur på henholdsvis 30, 40 og 45 °C. Ventetid medfører energi- og vandspild samt reduceret komfort for forbrugerne, hvorfor der i Danmark tilstræbes en ubesværende ventetid, på maksimalt 10 sekunder, for hyppigt anvendte tapsteder. I henhold til [Dansk Standard, 2009] bør varmt brugsvandstemperaturene, vist i tabel 7.3, opnås med ubesværende ventetid for de pågældende tapstedstyper. Derudover bør varmt brugsvandstemperaturen ikke falde til under 45 °C i spidsbelastningen.

Tapstedstype	**Temperaturkrav i følge [Dansk Standard, 2009]** [°C]
Håndvask	40
Køkkenvask	45
Bruser	40

Tabel 7.3. Temperaturkrav til forskellige tappetyper i henhold til Dansk Standard [2009].

Ved sammenligning af figur 7.7, som viser sluttemperaturen for hver tapning, og tabel 7.3 fremgår det, at mellem 39 og 92 % af tapningerne ved køkkenvaske og håndvaske, slutter med en temperatur på 40 °C eller derunder, hvilket viser, at beboerne regelmæssigt benytter varmt brugsvand med lavere temperaturer end kravene i [Dansk Standard, 2009]. I henhold til [Dansk Standard, 2009] er en varmt brugsvandstemperatur på 30 °C tilstrækkelig til vask af hænder, hvorfor ventetiden for denne temperatur ligeledes er undersøgt for køkkenvaske og håndvaske.



Figur 7.7. Kumulativ frekvenskurve for sluttemperaturen målt for hver tapning på de forskellige tappetyper med Huba flowmålerne på Aalborgkollegiet.

Tabel 7.4 viser andelen af tapninger for de forskellige tapstedstyper, der ikke opnår en temperatur på henholdsvis 30, 40 og 45 °C.

Tappetype	**Antal tapninger**	**Opnår ikke** 30 °C	**Opnår ikke** 40 °C	**Opnår ikke** 45 °C
Køkkenvask, køkken 2.1 - P20	345	21,7 %	39,1 %	58,8 %
Køkkenvask, køkken 3.2 - PB4	524	13,4 %	53,6 %	81,7 %
Håndvask, værelse 3 - P5	47	21,3 %	59,6 %	91,5 %
Håndvask, værelse 43 - P10	41	80,5 %	92,7 %	100 %
Bruser, værelse 39 - P11	3	0,00 %	0,00 %	33,3 %
Bruser, værelse 43 - P8	5	0,00 %	0,00 %	0,00 %

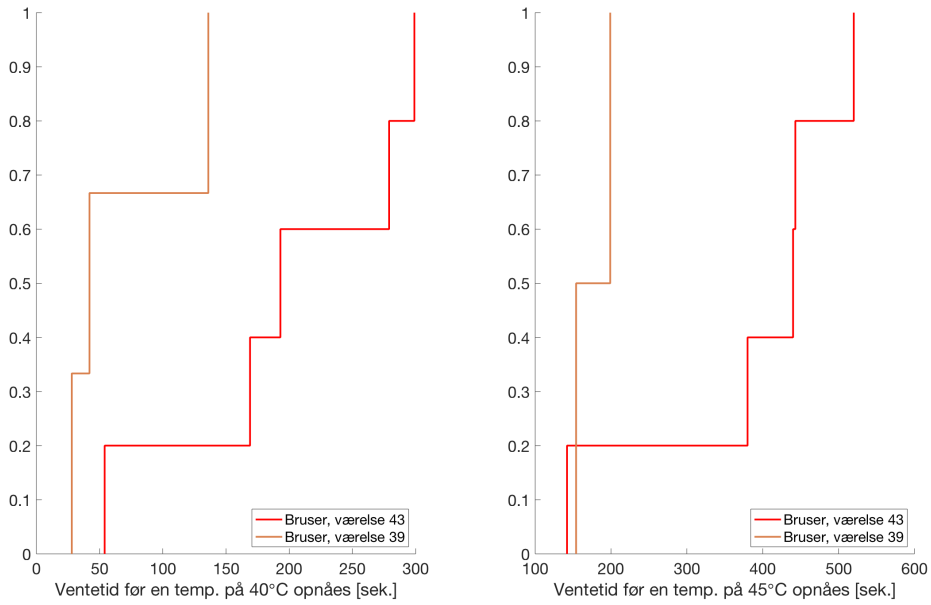
Tabel 7.4. Andelen at tapninger, hvor en varmt brugsvandstemperatur på henholdsvis 30, 40 og 45 °C ikke opnås.

Ud fra tabel 7.4 fremgår det, at der for alle tapstedstyper, med undtagelse af den ene bruser,

er tapninger, der ikke opnår de forskellige, angivne temperaturer, hvilket afspejler, at der er en besværende ventetid for størstedelen af de udvalgte tapsteder. Dette er medvirkende til et stort, unødvendigt energispild, idet veksleren bruger fjernvarme på at producere varmt brugsvand, som når at tabe varme inden det bliver anvendt.

Tappevarigheden, tiden mellem hver tapning og antallet af tapninger pr. døgn har dog en væsentlig indflydelse på ventetiden, hvilket medfører de variationer, som tabel 7.4 viser for hvert tapsted. Da ventetiden påvirkes af ovennævnte, forskellige parametre, er der en usikkerhed i årsagen til de uopnåede temperaturer, vist i tabel 7.4. Dette er blandt andet vurderet på baggrund af en sammenligning af tabel 7.4 og figur 7.2, som viste, at korte tappevarigheder er den primære årsag til, at varmt brugsvandstemperaturen for håndvasken i kollegieværelse 43 kun sjældent opnår temperaturene, angivet i tabel 7.4.

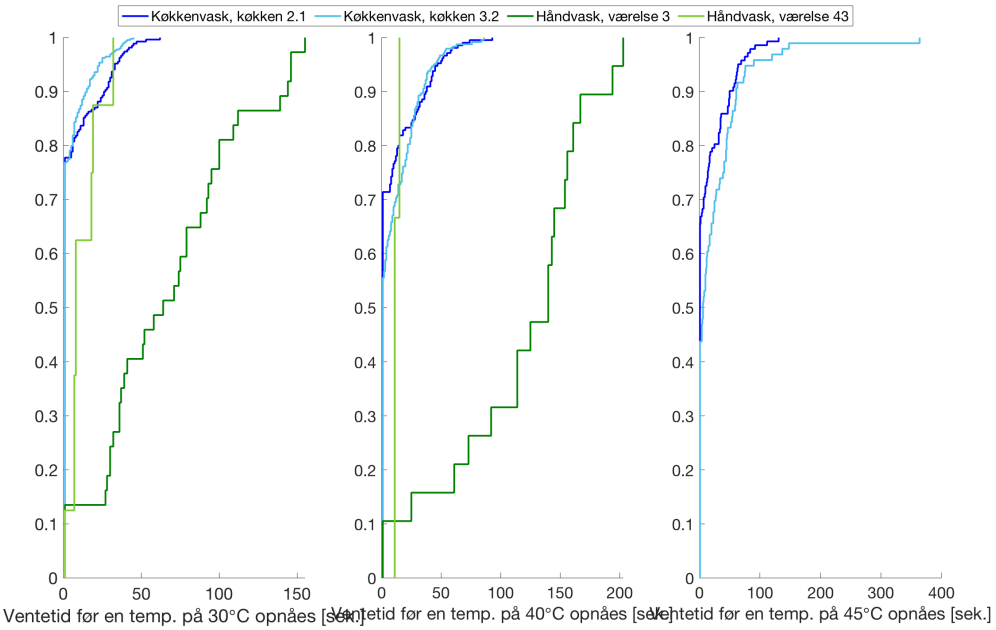
Da ventetiden for tapningerne, vist i tabel 7.4, ikke kendes, er de sorteret fra i den følgende analyse af ventetid for henholdsvis 30, 40 og 45 °C. Figur 7.8 viser ventetiden for henholdsvis 40 og 45 °C for bruserne.



Figur 7.8. Kumulativ frekvenskurve for ventetid for bruser.

Grundet en længere varighed for brusebade, sammenlignet med tapninger ved de øvrige tapstedstyper, opnår alle tapningerne en retvisende ventetid, hvilket afspejles af figur 7.7, som viser sluttemperaturen for tapninger. På figur 7.8 ses en tydelig forskel på ventetiderne for kollegieværelse 39 og 43, hvilket formentligt skyldes kollegieværelsernes placering, som henholdsvis er i starten og slutningen at gang 3.2. Kollegieværelse 39, som er placeret i starten af gang 3.2, opnår væsentligt hurtigere en temperatur på henholdsvis 40 og 45 °C, hvor 2 tapninger, har en ventetid på 42 sekunder eller derunder ved opnåelse af 40 °C. For kollegieværelse 43, placeret i slutningen af gang 3.2, er den tilsvarende ventetid på 193 sekunder eller derunder for 3 tapninger, hvilket er en væsentligt længere ventetid sammenlignet med kollegieværelse 39.

Ventetiden for køkkenvaske og håndvaske er vist på figur 7.9. Ventetiden for håndvaske er kun vist for 30 og 40 °C, da varmt brugsvandstemperaturen på 45 °C kun opnås i begrænset omfang for håndvaskene, som vist i tabel 7.4, samt da denne temperatur ikke er foreskrevet for håndvaske i henhold til tabel 7.3.



Figur 7.9. Kumulativ frekvenskurve for ventetid for køkken- og håndvaske.

Af figur 7.9 fremgår det, at der generelt er en kort ventetid for køkkenvaskene, idet tommelfingerreglen om maksimalt 10 sekunders ventetid er overholdt for henholdsvis 56 og 73 % af tapningerne for køkken 3.2 og 2.1, ved en varmt brugsvandstemperatur på 45 °C. Ved sammenligning af ventetidskurverne for de to køkkenvaske fremgår det, at forskellen mellem ventetiden for de to køkkenvaske stiger ved opnåelse af en højere varmt brugsvandstemperatur. For køkkenvaskene ses det, at køkken 3.2 har kortere ventetid ved 30 °C, sammenlignet med køkken 2.1, hvilket kan skyldes, at der i køkken 3.2 forekommer flere tapninger, hvorfor det varme brugsvand i koblingsrørene ikke når at tabe ligeså meget varme, imellem tapningerne.

For håndvaskene er der en større variation i ventetiderne for henholdsvis 30 og 40 °C, sammenlignet med køkkenvaskene. For en varmt brugsvandstemperatur på 40 °C, er medianen for kollegieværelse 3 på 140 og tommelfingerreglen om maksimalt 10 sekunders er overholdt for 11 % af tapningerne, hvorimod medianen for kollegieværelse 43 er 11 og tommelfingerreglen om maksimalt 10 sekunders ventetid ikke er overholdt for nogen af tapningerne.

Tabel 7.5, 7.6 og 7.7 viser minimum, maksimum, gennemsnit og median for ventetider for 30, 40 og 45 °C, for henholdsvis udvalgte køkkenvaske, håndvaske og brusere på Aalborgkollegiet.

	Opnåelse af 30 °C				**Opnåelse af** 40 °C				**Opnåelse af** 45 °C			
Placering	**Min.**	**Gns.**	**Median**	**Maks.**	**Min.**	**Gns.**	**Median**	**Maks.**	**Min.**	**Gns.**	**Median**	**Maks.**
Køkken, 2.1	1	6,05	1	62	1	9,35	1	93	1	13,86	1	131
Køkken 3.2	1	4,39	1	45	1	10,87	1	86	1	25,18	6	364

Tabel 7.5. Minimum, maksimum, gennemsnit og median for ventetider for de udvalgte køkkenvaske på Aalborgkollegiet. Alle ventetider er angivet i [sek.].

	Opnåelse af 30 °C				**Opnåelse af** 40 °C			
Placering	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**
Håndvask, værelse 3	1	66,57	64	155	1	116,3	140	203
Håndvask, værelse 43	1	12,5	8	32	11	12,33	11	15

Tabel 7.6. Minimum, maksimum, gennemsnit og median for ventetider for de udvalgte håndvaske på Aalborgkollegiet. Alle ventetider er angivet i [sek.].

	Opnåelse af 40 °C				**Opnåelse af** 45 °C			
Placering	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**	**Minimum**	**Gennemsnit**	**Median**	**Maksimum**
Bruser, værelse 39	28	68,67	42	136	154	385	199	199
Bruser, værelse 43	54	198,8	193	299	142	176,5	440	199

Tabel 7.7. Minimum, maksimum, gennemsnit og median for ventetider for de udvalgte brusere på Aalborgkollegiet. Alle ventetider er angivet i [sek.].

Af figur 7.9 og tabel 7.6 fremgår det, at håndvasken på værelse 43 har den korteste ventetid, på trods af, at denne er placeret længst væk fra teknikrummet. Dette indikerer at cirkulationen fungerer bedre i gang 3.2 end i gang 1.

Ved sammenlignin af tabel 7.7 og 7.6 kan det ses, at der er en uoverensstemmelse mellem ventetiden for opnåelse af 40 °C for bruser og håndvask på kollegieværelse 43, hvilket ligeledes indikerer, at cirkulationssystemet ikke fungerer optimalt. Ved antagelse om, at cirkulationssystemet ikke fungerer optimalt i gang 3.2, er det vurderet, at forskellen på ventetid for bruser og håndvask skyldes variationer i forekomsten af forudgående tapninger fra nogle af gang 3.2's øvrige tapsteder. Hvis der i den forudgående tidsperiode har været foretaget en eller flere tapninger, inden tapninger på håndvasken i kollegieværelse 43 finder sted, reduceres distancen mellem det varme brugsvand i grenrøret og koblingsrør til tapsted, hvilket reducerer ventetiden.

Ligesom for håndvaske og brusere, indikerer forskellen på ventetiderne for de to køkkenvaske, at cirkulationssystemet ikke fungerer optimalt, idet der er en tydelig forskel. Ved et velfungerende cirkulationssystem vil der kun være en ubetydelig forskel på ventetiderne for tapsteder, uafhængig af tapstedets afstand til teknikrummet.

7.5 Opsummering

Den statiske analyse viste en tilnærmet overensstemmelse mellem varigheden af tapninger ved køkkenvaskene og håndvasken på kollegieværelse 43. Der er stor spredning i antal tapninger pr. døgn, hvoraf der er flest ved køkkenvaskene. For køkkenvaske bliver tapningerne generelt foretaget med en jævn fordeling i dag- og aftentimerne, hvilket ligeledes afspejles af en generelt kort tidsperiode mellem hver tapning. For håndvaskene er der en stor forekomst af tapninger i de tidlige morgentimer, og der er generelt stor variation i tiden mellem hver tapning. Ved analyse af ventetid blev det påvist, at en betydelig del af de foretagede tapninger ikke opnår den ønskede temperatur i henhold til [Dansk

Standard, 2009], og at kun et begrænset antal tapninger overholder tommelfingerreglen på maksimalt 10 sekunders ventetid. Der forekommer stor variation i ventetid afhængigt af tapstedets placering og tappetidspunkter, hvilket indikerer, at cirkulationssystemet ikke fungerer optimalt.

Cirkulation 8

Dette kapitel dokumenterer og redegør for, hvorledes Aalborgkollegiets cirkulationssystem overordnet set fungerer, hvilken effekt det har haft at ændre cirkulationspumpens indstilling fra variabelt til konstant flow, samt cirkulationssystemets andel af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug.

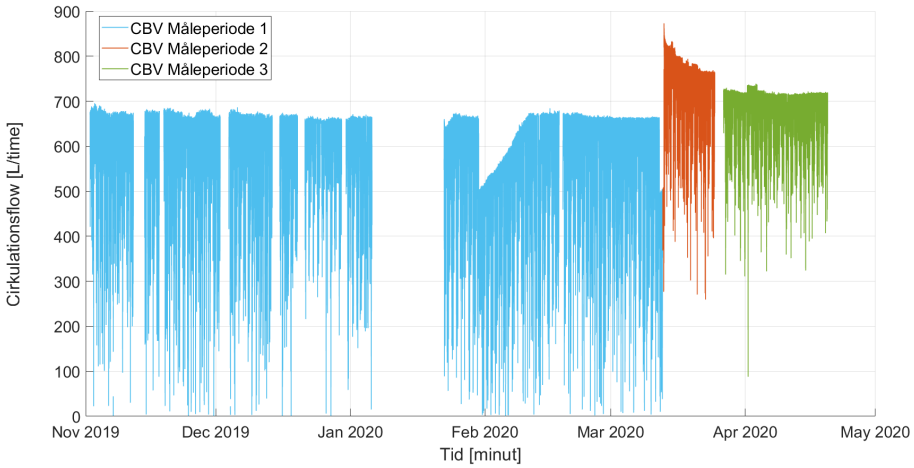
Derudover er formålet at fastlægge den eksisterende regulering af cirkulationssystemet, med henblik på at foreslå mulige optimeringer, der kan medvirke til at reducere de lange ventetider, som er påvist i kapitlerne 10 og 7, omhandlende henholdsvis energitab og statistisk analyse.

8.1 Cirkulationsflowets udvikling

I dette afsnit præsenteres udviklingen af cirkulationsflowet gennem de tre måleperioder, med henblik på at beskrive effekten af den ændrede indstilling for cirkulationspumpen fra variabelt flow med $\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$ til konstant flow med et setpunkt på 600 L/time.

$\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$ er en selvreguleringsmekanisme udviklet af Grundfos, hvor pumpen anvender proportionaltryksregulering og samtidig registrerer forbrugernes forbrugsmønstre ud fra variationer i differenstrykket. Pumpen benytter de opsamlede forbrugsdata til at slukke i tidsrum, hvor der normalvist ikke er varmtvandsforbrug. Proportionaltryksregulering betyder, at pumpen tilpasser trykket i forhold til det målte differenstryk, og derved kan tilpasse trykket i forhold til eventuelle reguleringsventiler. $\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$ er udviklet med henblik på at opnå en strømbesparelse hos forbrugeren.

Figur 8.1 viser cirkulationsflowet på minutbasis for de tre måleperioder. Ud fra en nærmere undersøgelse fremgår det, at cirkulationsflowet falder ved varmtvandsforbrug, hvilket stemmer overens med de dyk, som kan ses på figur 8.1. Appendiks H viser et eksempel på denne sammenhæng for en 6-timers periode. De observerede dyk i cirkulationsflowet skyldes, at tapninger af varmt brugsvand medfører et tryktab i varmt brugsvandssystemet, hvormed cirkulationspumpen skal levere et højere tryk for at opretholde samme cirkulationsflow. Af figur 8.1 fremgår det, at der er variationer i disse dyk, hvilket er beskrevet nærmere i det følgende.



Figur 8.1. Cirkulationsflows på minutbasis for de tre måleperioder. Det gennemsnitlige cirkulationsflow for måleperiode 1, 2 og 3 er henholdsvis 603,88, 750,19 og 696,62 L/time.

Af figur 8.1 fremgår det, at cirkulationsflowet i måleperiode 1 har større udsving sammenlignet med de to øvrige måleperioder. Størrelsen på udsvingene i måleperiode 1 er vurderet til enten at skyldes cirkulationspumpens indstilling på $\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$, eller at der formodentligt foretages flere tapninger på samme tid, i overensstemmelse med det større varmtvandsforbrug, som omtalt i kapitel 6. Den formodede sammenhæng mellem større variationer og $\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$-indstillingen skyldes, at pumpen her ikke prøver at opretholde samme flow, i perioder henholdsvis med og uden varmtvandsforbrug, formentligt grundet den førnævnte strømbesparelse.

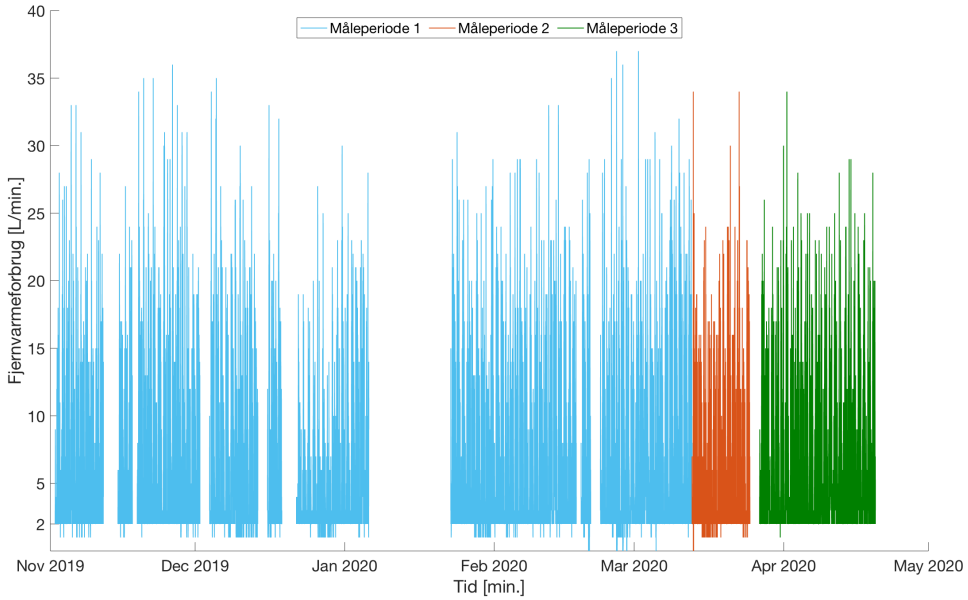
Mellem måleperiode 1 og 2 er cirkulationspumpens indstilling ændret fra $\text{Auto}_{\text{ADAPT}}$ til en konstant hastighed. Som det fremgår af figur 8.1, medfører den ændrede pumpeindstilling, at cirkulationsflowet stiger, og at dykkene i forbindelse med tapninger bliver mindre. Denne udvikling kan skyldes, at den ændrede pumpeindstilling får pumpen til at følge en ydelseskurve, som kan opnå et højere tryk, hvorved pumpen bedre kan kompensere for tryktabene som opstår i forbindelse med tapninger. Det samme gør sig gældende for måleperiode 3, dog ses det, at cirkulationsflowet her er mere konstant.

8.2 Cirkulationstab

I henhold til det forudgående afsnit, forekommer der cirkulationsflow i alle døgn, hvilket dækkes af øget fjernvarmeforbrug til varmt brugsvandssystemet. Formålet med dette afsnit er at fastlægge andelen af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, der går til dækning af cirkulationstab, da cirkulationstabet, i henhold til [Bøhm, 2009] typisk udgør mellem 30 - 75 % for boligejendomme.

Ved analyse af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, er der observeret et nogenlunde konstant minimumforbrug af fjernvarme på 2-3 L/min. i tidsperioder uden varmtvandsforbrug for alle tre måleperioder, hvilket kan ses på figur 8.2. Det konstante minimumforbrug svarer til ca. 127 L/time, bestemt ud fra et timegennemsnit. Af figur 8.2 fremgår det, at minimumforbruget er lavere til tider, særligt i måleperiode 1, hvor dette

er hyppigt forekommende. Det nogenlunde konstante fjernvarmeforbrug er vurderet til at gå til dækning af cirkulationstab, på baggrund af en overensstemmelse mellem førnævnte, konstante fjernvarmeforbrug og perioder med maksimale cirkulationflows, vist på figur 8.1. Tabel 8.1 viser varmt brugsvandssystemets gennemsnitlige fjernvarmeforbrug samt intervallet for andelen heraf, der går til dækning af cirkulationstab. Den nedre grænse svarer til, at der kun er cirkulationstab i tidsperioder uden varmtvandsforbrug, hvor den øvre grænse svarer til et konstant cirkulationstab på alle tidspunkter.



Figur 8.2. Fjernvarmeforbrug for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem for de tre måleperioder. Varmt brugsvandssystemes fjernvarmeforbrug kan ses på timebasis for et tilfældigt døgn i hver måleperiode i Appendiks H.

Som det fremgår af figur 8.2 og temperaturforskellen mellem varmt brugsvand og cirkulation i teknikrum, vist i tabel 8.2, er der en sammenhæng mellem en lav temperaturforskel og en øget forekomst af minimumfjernvarmeforbrug under 2 L/min. Sammenhængen kan skyldes forskel på turbulens i cirkulationsrørene, hvor de højere cirkulationsflows i måleperiode 2 og 3 kan have medført et øget rørtab eller øget opblanding med cirkulationsvand i nærliggende rør med lavere cirkulationsflow.

Måleperiode	**Gns. FV-forbrug** [L/time]	**FV-forbrug, CBV** [L/time]	**Andel FV til CBV** [%]
1	267,4	127	34,19 - 47,49 %
2	257,7	127	30,71 - 49,28 %
3	263,1	127	28,19 - 48,27 %

Tabel 8.1. Gennemsnitligt fjernvarmeforbrug til varmt brugsvandssystemet, fjernvarmeforbrug til dækning af cirkulationstab, samt andelen denne udgør af fjernvarmeforbruget.

Som det fremgår af tabel 8.1, er der en stor forskel mellem henholdsvis den nedre og øvre grænse for cirkulationstabets andel af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug,

for hver af de tre målerperioder. Variationerne i cirkulationstabenes andele skyldes forskellige, gennemsnitlige fjernvarmeforbrug, hvor variationer i de nedre andelsgrænser desuden påvirkes af, at hver måleperiode har forskellige andele af minutter uden varmtvandsforbrug. På trods af cirkulationstabets varierende andele af fjernvarmeforbruget for de tre måleperioder, ligger alle overvejende inden for intervallet for cirkulationstab i boligejendomme på 30 - 75 %, beskrevet i [Bøhm, 2009].

Det er formodet, at cirkulationstabets andel af fjernvarmeforbruget svinger i henhold til cirkulationsflowet, vist på figur 8.1. På baggrund af de gennemsnitlige cirkulationsflows, sammenlignet med de tilnærmede maksimum cirkulationsflows, er det vurderet, at cirkulationstabets fjernvarmeandel generelt ligger i den øvre halvdel af intervallet i tabel 8.1. For måleperiode 2 og 3, hvor cirkulationsflowet er mere konstant og sjældent kommer under 300 L/time, forventes cirkulationstabets andel dog at være tæt på den øvre grænse i størstedelen af tiden. Det kan dermed konkluderes, at ændring af cirkulationspumpens indstilling til et konstant flow, har medvirket til et øget fjernvarmeforbrug til cirkulationstab.

8.3 Cirkulationssystemets regulering

Formålet med regulering er at balancere cirkulationssystemet, for at opnå en ensartet og ubesværende ventetid ved alle regelmæssigt benyttede tapsteder, uafhængigt af tapstedernes afstand til en givet, central varmt brugsvandsproduktion.

På baggrund af det forudgående afsnit, omhandlende cirkulationsflowets udvikling, hvor der er observeret et nogenlunde konstant maksimumflow i perioder uden varmtvandsforbrug, er det vurderet, at cirkulationssystemet ikke indeholder nogen form for regulering udover cirkulationspumpen, da der ligeledes er registreret en minimal temperaturforskel mellem varmtbrugsvand og cirkulation i teknikrummet. Den manglende regulering af cirkulationssystemet underbygges af, at der er observeret besværende ventetider for udvalgte tapsteder, som præsenteret i statistisk analyse i kapitel 7, samt ved analyserne af energitab ved tapninger i køkkener, omtalt i kapitel 10. Den omtalte, minimale temperaturforskel, præsenteres i det følgende sammen med resultaterne fra en visuelle inspektioner og termografisk undersøgelse af cirkulationssystemet.

8.3.1 Cirkulationstemperaturer

Ved dimensionering af typiske varmt brugsvandssystemer, anvendes en dimensionsgivende varmt brugsvandstemperatur på 55 °C for at undgå vækst af legionella, som er en naturligt forekommende, men farlig bakterie, der trives imellem 35 og 46 °C, og dør ved temperaturer over 50 °C. I henhold til [Dansk Standard, 2009], er komfortkravene til varmt brugsvandstemperaturen overholdt for alle Aalborgkollegiets tapsteder, ved en temperatur på 45 °C, hvorfor cirkulering af varmt brugsvand ved højere temperaturer end 45 °C anses for unødvendigt. Tabel 8.2 viser temperaturerne for varmt brugsvand og cirkulation, målt i Aalborgkollegiets teknikrum.

Måleperiode	Gennemsnitlig temperatur [°C]		
	Varmt brugsvand	Cirkulation	Temperaturforskel
1	48,16	47,59	0,57
2	47,71	46,54	1,17
3	48,78	47,21	1,57

Tabel 8.2. Gennemsnitlige temperaturer for varmt brugsvand og cirkulation målt i Aalborgkollegiets teknikrum.

Som det fremgår af tabel 8.2, er Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmt brugsvandstemperatur under 50 °C for alle tre måleperioder, hvilket medfører en øget risiko for legionellavækst i varmt brugsvandssystemet.

Dertil kan det ses, at det cirkulerede, varme brugsvand i gennemsnit kommer tilbage til teknikrummet med en temperatur på 46,54-47,59 °C, hvilket er en minimal forskel i forhold til den leverede varmt brugsvandstemperatur. At varmt brugsvand cirkuleres med en højere temperatur end komfortkravet på 45 °C skyldes, at der ikke er temperaturregulering af cirkulationssystemet. Den lille temperaturforskel mellem varmt brugsvand og cirkulation er vurderet til at skyldes manglende balancering af tryk i cirkulationssystemet, hvilket medfører, at der kun cirkuleres med maksimalt flow i en begrænset rørstrækning. I henhold til den termografiske undersøgelse, beskrevet senere i dette afsnit, er det vurderet, at cirkulationssystemet kun fungerer optimalt imellem teknikrummet og blok 2, imens cirkulationsflowet i de øvrige rørstrækninger er begrænset.

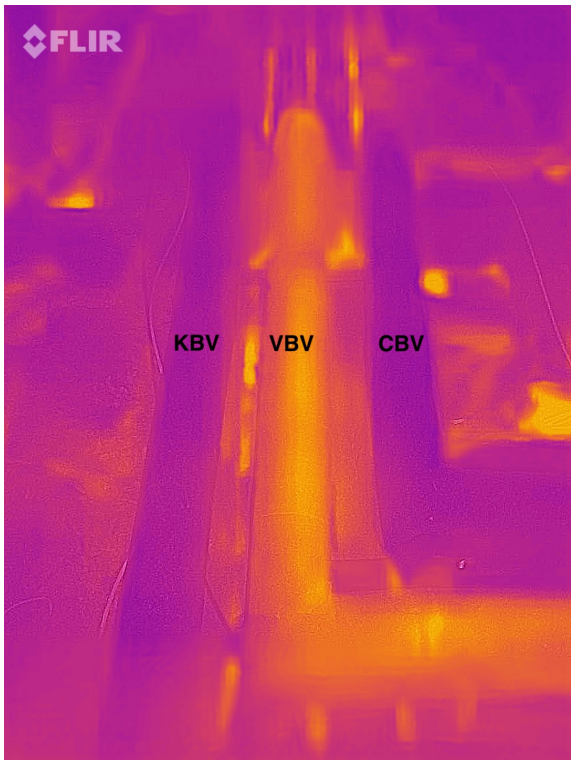
8.3.2 Visuel inspektion og termografisk undersøgelse

En visuel inspektion af rørføringen på Aalborgkollegiet har bekræftet, at Aalborgkollegiets cirkulationssystem ikke indeholder nogen reguleringsventiler, da der ikke forekommer synlige buler eller huller i isoleringen, som en ventil ville medfører.

Den termografiske undersøgelse blev foretaget i måleperiode 1, og påviste problematiske områder med begrænset cirkulationsflow i blok 1 og blok 3 på Aalborgkollegiet. At der er begrænset cirkulationsflow i blok 1 og 3 er ligeledes påvist for måleperiode 2 og 3, jævnfør kapitel 7 og 10.2, omhandlende henholdsvist statistisk analyse og analyse af energitab i forbindelse med tapninger. Det manglende cirkulationsflow er vurderet at skyldes den føromtalte manglende balancering af cirkulationssystemet, hvor det forventes, at cirkulationsflowet er størst i rørstrækningerne med mindst tryktab.

Blok 1 - Meget begrænset cirkulationsflow

I blok 1 blev der påvist et stærkt begrænset cirkulationsflow, på baggrund af en stor forskel i de observerede varmeafgivelser for varmt brugsvandsrørene og cirkulationsrørene. Figur 8.3 viser et termografisk foto af rørføringen til blok 1, som delvist er i uopvarmet tagrum, hvor figur 8.4 viser det termografiske fotos lokation og retning.



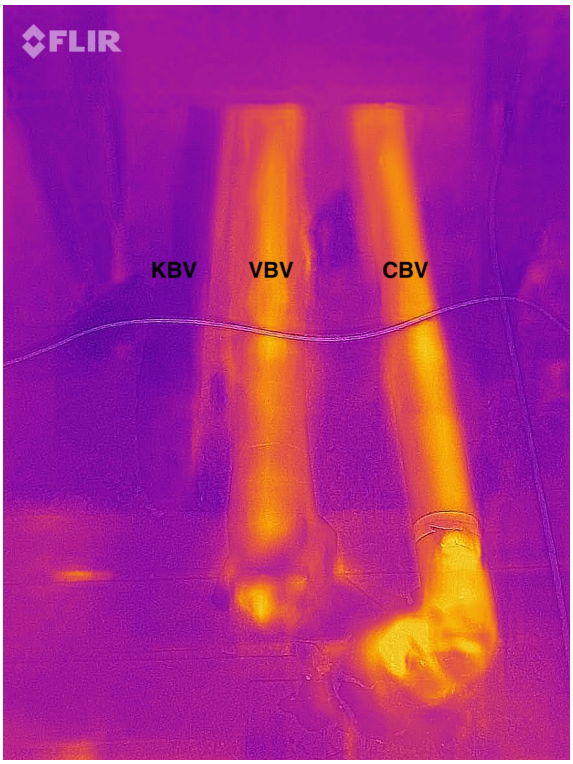
Figur 8.3. Termografifoto af rørføring i uopvarmet tagrum, der forsyner blok 1.

Figur 8.4. Oversigt over placering af termografifoto af rørføring, der forsyner blok 1, vist på figur 8.3. Den sorte pil og streg viser henholdsvis retning og placering for termografifoto.

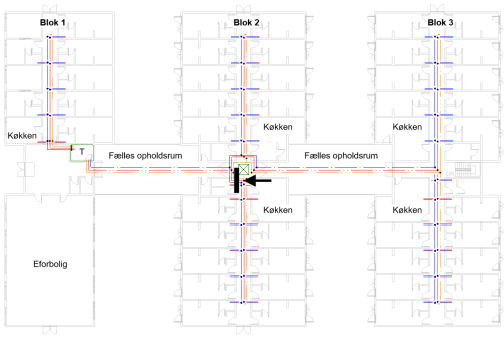
På figur 8.3 ses en tydelig forskel på varmt brugsvandsrøret, VBV, og cirkulationsrøret, CBV, hvilket ikke stemmer overens med den lille temperaturforskel, der er målt i teknikrummet, som vist i tabel 8.2. Afvigelsen mellem den lille temperaturforskel i teknikrum og den store forskel på varmeafgivelser i rørføringen ved blok 1 indikerer, at der enten ikke er cirkulationsflow eller at cirkulationsflowet er meget begrænset. Dette underbygges af en lang ventetid for værelse 3, som ligger for enden af blok 1, længst fra teknikrummet, hvor medianventetiden for 40 °C er registreret til 140 sek , jævnfør kapitel 7.

Blok 2 - Fungerende cirkulationsflow

I blok 2 blev der påvist et højt cirkulationsflow i cirkulationsrøret som afgrener til gang 2.2, på baggrund af en minimal forskel på de observerede varmeafgivelser for varmt brugsvandsrøret og cirkulationsrøret. Figur 8.5 viser et termografisk foto af rørføringen til blok 2, som delvist er i uopvarmet tagrum, hvor figur 8.6 viser det termografiske fotos lokation og retning.



Figur 8.5. Termografifoto af rørføring i uopvarmet tagrum, der forsyner blok 2, gang 2.2.

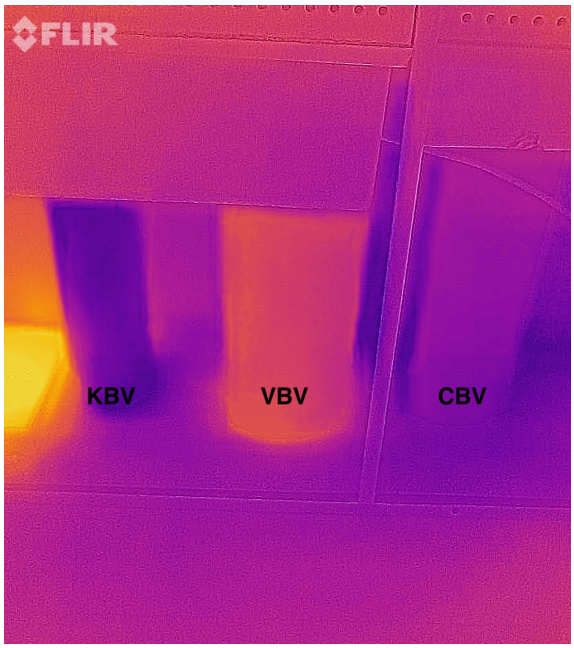


Figur 8.6. Oversigt over placering af termografifoto af rørføring, der forsyner blok 2 gang 2.2, vist på figur 8.5. Den sorte pil og streg viser henholdsvis retning og placering for termografifoto.

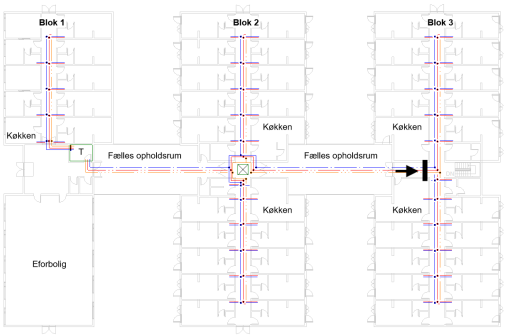
Som det fremgår af figur 8.5, har det viste varmt brugsvandsrør og cirkulationsrør nogenlunde samme varmeafgivelse, hvilket stemmer overens med den minimale, gennemsnitlige temperaturforskel mellem varmt brugsvand og cirkulation, registreret i teknikrummet i måleperiode 1, som vist i tabel 8.2. På baggrund af overensstemmelsen mellem observationerne i den termografiske undersøgelse, og de målte temperaturer i teknikrummet, er det vurderet, at cirkulationssystemet fungerer i gang 2.2 i blok 2.

Blok 3 - Begrænset cirkulationsflow

I blok 3 blev der påvist et begrænset cirkulationsflow, på baggrund af samme princip som for blok 1. Figur 8.8 og 8.7 viser henholdsvis et termografisk foto for rørføringen ved overgangen til blok 3 og termografifotoets lokation og retning.



Figur 8.7. Termografifoto af rørføring i uopvarmet tagrum, der forsyner blok 3.



Figur 8.8. Oversigt over placering af termografifoto af rørføring, der forsyner blok 3, vist på figur 8.7. Den sorte pil og streg viser henholdsvis retning og placering for termografifoto.

Ved sammenligning af varmt brugsvandsrøret og cirkulationsrøret på figur 8.7 fremgår det, at både rørene i blok 3 og blok 1 har en stor varmeafgivelser, hvilket indikerer, at begge blokke har et begrænset cirkulationsflow. Dog fremgår det, at varmeafgivelser mellem varmt brugsvandsrøret og cirkulationsrøret i blok 3 er mindre end ved blok 1, hvilket indikerer, at blok 3 har et større cirkulationsflow end blok 1. Dette kan skyldes, at de viste rør er større, da de forsyner tre gange med kollegieværelser, hvormed tryktabet kan være mindre, sammenlignet med cirkulationsrøret til blok 1. Det begrænsede cirkulationsflow i blok 3 underbygges af, at der er registreret lange ventetider for kollegieværelse 39 og 43, samt køkken 3.2, som beskrevet i kapitel 10.2 og 7.

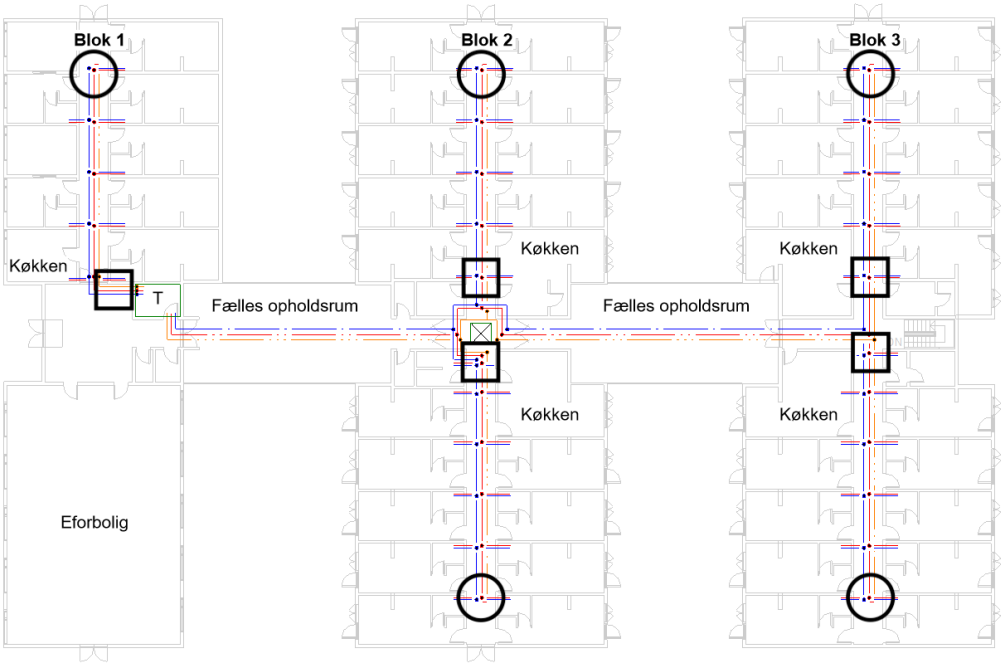
8.4 Optimeringsforslag

På baggrund af cirkulationssystemets manglende regulering og balancering, beskrevet i det forudgående afsnit, er der i det følgende præsenteret to mulige optimeringsforslag med regulerende ventiler, med henblik på at opnå en ubesværende ventetid for alle Aalborgkollegiets beboere, samt en mulig energibesparelse. En balancering af Aalborgkollegiets cirkulationssystem, forventes at medføre en lavere cirkulationstemperatur og dermed øget fjernvarmeafkøling ved recirkulering. Den forbedrede cirkulation for alle blokkene forventes at reducere ventetiden, så alle beboere opnår ubesværende ventetid og dermed mindre vandspild, dog kan dette være på bekostning af et øget fjernvarmeforbrug, grundet at rørtabene skal dækkes for en længere rørstrækning.

Til optimering af Aalborgkollegiet manglende regulering af cirkulationssystemet, foreslås det at balancere cirkulationssystemet ved enten at installere termostatventiler eller strengreguleringsventiler. Ved implementering af en af førnævnte ventiler kan der opnåes en ventetid som er kontrolleret ud fra hvilken temperatur vandet i rør

som minimum må falde til før der cirkuleres. Termostatventilen regulerer efter et temperatursetpunkt, hvor brugsvandet kun cirkuleres, når det er koldere end temperatursetpunktet. Strengreguleringsventilen regulerer efter en fast trykindstilling, som bestemmes på baggrund af en detaljeret varmetabsberegning, for at sikre konstant dækning af varmt brugsvandsrørets rørtab i den pågældende rørstrækning. De to ventiltyper arbejder bedst ved konstant tryk i cirkulationssystemet, så ventilerne selv står for hele reguleringsarbejdet.

Den foreslåede placering af de to ovennævnte ventiltyper er vist for stueplan på figur 8.9, hvor de samme principper for ventilplacering gør sig gældende for kælderplan.



Figur 8.9. Placering af foreslåede ventiltyper til regulering af cirkulationssystemet i Aalborgkollegiets stueplan. Cirkler symboliserer placeringen af termostatventilerne, og firkanter placeringen af strengreguleringsventilerne.

Fordelen ved regulering med termostatventiler er, at det varme brugsvand kun cirkuleres ved behov, i forhold til opretholdelse af den ønskede varmt brugsvandstemperatur, hvilket giver en energibesparelse, samt fører til en øget fjernvarmeafkøling og dermed en bedre udnyttelse af fjernvarmen. Det foreslås at installere termostatventilerne med minimum 0,5 meters afstand fra det sidste koblingsrør til varmt brugsvand, for enden af hver gang, jævnfør cirklerne på figur 8.9. Afstanden på 0,5 meter skyldes, at varmeledning fra varmt brugsvandsrøret kan påvirke termostatventilen til at åbne mere op end nødvendigt, hvilket påvirker energibesparelsen negativt.

Strengreguleringsventiler balancerer trykket i cirkulationssystemet, hvorved der opnås et konstant cirkulationsflow for alle gange på Aalborgkollegiet. I modsætning til termostatventilerne, kræver strengreguleringsventilerne, som tidligere nævnt, mere forarbejde, da det er nødvendigt med en grundig varmetabsberegning for hver rørstrækning, for at sikre tilstrækkelig dækning af rørtabet. Da strengreguleringsventilerne ikke regulerer efter temperatur, er der dog en risiko for, at varmt brugsvand cirkuleres uden at der er behov for det,

hvorved der ikke opnås samme energibesparelse, som ved anvendelse af termostatventiler.

8.5 Opsummering

På baggrund af de foretagede analyser af Aalborgkollegiets cirkulationssystem, kan det konkluderes, at cirkulationstab medfører et konstant minimumforbrug af fjernvarme på 2-3 L/min., svarende til ca. 127 L/time. Derudover udgør Aalborgkollegiets cirkulationstab mellem 28,19 - 49,28 % af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, hvilket stemmer overens med de typiske cirkulationstab for boligejendomme, beskrevet i [Bøhm, 2009].

Ud fra visuelle inspektionerer og måledata, er det vurderet, at der ikke er regulering eller balancering af Aalborgkollegiets cirkulationssystem. Dette er observeret ud fra en minimal temperaturforskel mellem varmt brugsvand og cirkulation i Aalborgkollegiets teknikrum, hvilket formentligt skyldes, at cirkulationssystemet er ubalanceret og derfor kun fungerer, som det skal, i en begrænset rørstrækning, hvilket er eftervist ud fra den termografiske undersøgelse for gang 2.2. Der blev påvist et begrænset cirkulationsflow frem til blok 3, imens cirkulationsflowet fremstod som ikkeeksisterende i blok 1. De begrænsede eller manglende cirkulationsflows i blok 1 og blok 3 underbygges af, at der er registreret besværende ventetider i henhold til den statistiske analyse og analysen af energitab ved tapninger, beskrevet i henholdsvis kapitel 7 og 10. På baggrund af den manglende balancering, er der foreslået to typer reguleringsventiler.

9 Effektivitet

Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystems effektivitet er undersøgt for alle tre måleperioder med henblik på at fastsætte dens udvikling over en længere tidsperiode, samt effekten af forskellige ændringer. Ændringerne for hver måleperiode fremgår af tabel 9.1. Med udgangspunkt i måleperiode 1, er der foretaget en analyse af, hvilke parametre, der har den største indflydelse på effektiviteten. Her blev parametrene varmtvandsforbrug, fjernvarmeafkøling og cirkulationstab påvist at have en væsentlig indflydelse på effektiviteten. Analysen af varmt brugsvandssystemets effektivitet danner grundlag for fokusområdet ved Polysun-simuleringerne, beskrevet i kapitel 11.

Nr.	Måleperiode	Udstyr	Nøgleord
1	2/11-2019 - 12/3-2020	Brunata energimålere	Typiske forbrugsmønstre
2	13/3-2020 - 24/3-2020	Brunata energimålere Huba flowmålere	Ny cirkulationsindstilling, Coronanedlukning Forbrugsmønstre ved tapsteder, Coronanedlukning
3	27/3-2020 - 19/04-2020	Brunata energimålere	Afsyring af veksler, Coronanedlukning

Tabel 9.1. Oversigt over tidsperiode, anvendt måleudstyr og nøgleord for hver af de tre måleperioder.

I Aalborg afregnes fjernvarme i DKK/m^3. Af denne grund er det valgt at beregne effektiviteten ud fra, hvor mange m^3 varmt brugsvand, der produceres pr. m^3 fjernvarme, der forbruges af varmt brugsvandssystemet. Formel (9.1) viser den anvendte formel til bestemmelse af effektiviteten.

$$\eta = \frac{\Delta V_{VBV}}{\Delta V_{FV_veksler}} \cdot 100 \tag{9.1}$$

η	Effektivitet	[%]
ΔV_{VBV}	Varmt brugsvand produceret	[m^3]
$\Delta V_{FV_{veksler}}$	Fjernvarme tilført til veksler	[m^3]

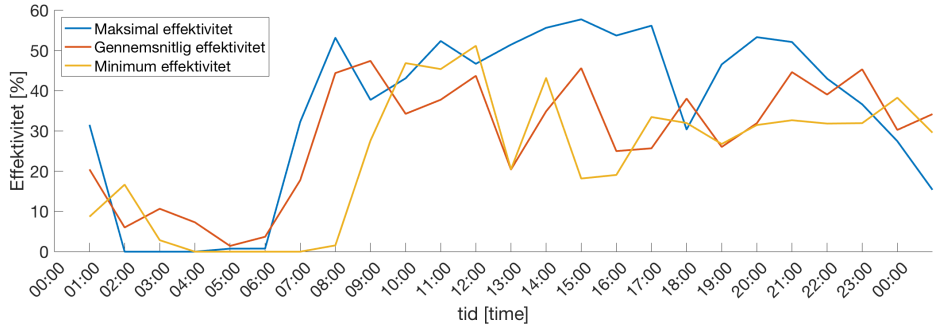
Effektiviteten er bestemt for henholdsvis hele varmt brugsvandssystemet og for varmt brugsvandsproduktionen alene. Forskellen på de to beregnede effektiviteter er, at førstnævnte er inklusiv fjernvarmeforbrug til cirkulationstab, hvor sidstnævne er eksklusiv cirkulationstab. Inddelingen i de to effektiviteter skyldes cirkulationssystemets væsentlige andel af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, beskrevet i kapitel 8.

9.1 Påvirkning af effektiviteten

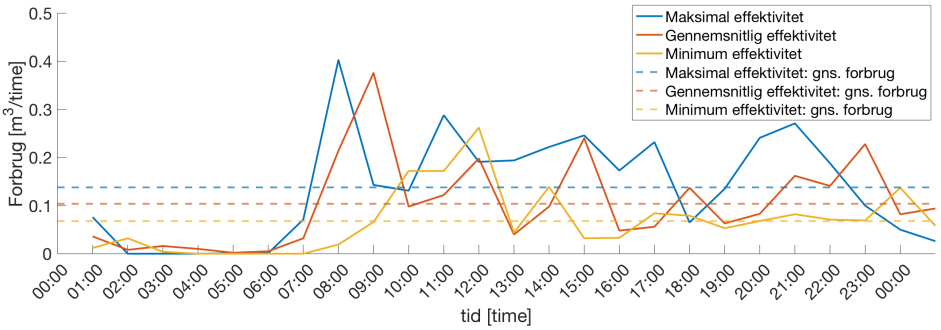
I det følgende afsnit redegøres der for forskellige parametres påvirkning af effektiviteten, med henblik på at fastlægge underliggende årsager til variationer i effektiviteten.

Analysen er foretaget med udgangspunkt i effektiviteten for tre forskellige døgn med den henholdsvis maksimale, mest gennemsnitlige og minimale effektivitet for hele varmt brugsvandssystemet, beregnet på døgnbasis. Datoerne for de analyserede døgn er henholdsvis 13/2-2020, 11/3-2020 og 26/11-2019.

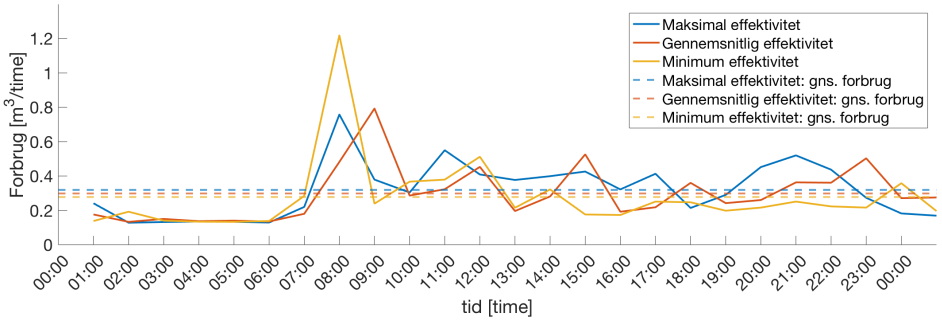
Figur 9.1, 9.2 og 9.3 viser en sammenligning af henholdsvis hele varmt brugsvandssystemets effektivitet, varmtvandsforbrug og fjernvarmeforbrug, for de tre døgn.



Figur 9.1. Effektivitet for hele varmt brugsvandssystemet, beregnet på timebasis for de tre døgn i periode 1 med den henholdsvis maksimale, mest gennemsnitlige og minimale effektivitet baseret på døgngennemsnittene.



Figur 9.2. Varmtvandsforbrug summeret på timebasis for de tre døgn i periode 1 med den henholdsvis maksimale, mest gennemsnitlige og minimale effektivitet baseret på døgngennemsnittene.

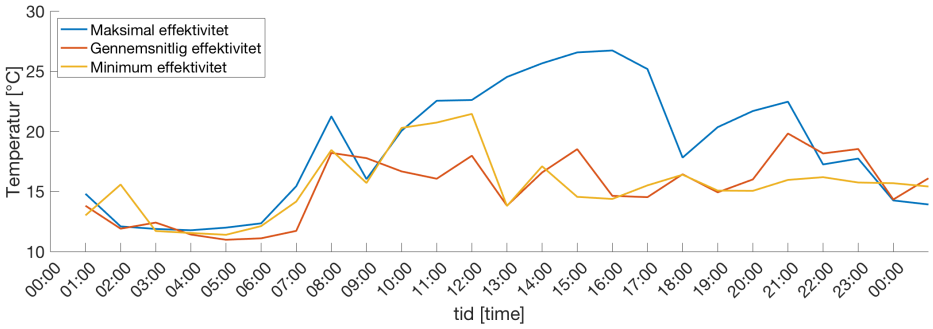


Figur 9.3. Varmt brugsvandssystemets samlede fjernvarmeforbrug summeret på timebasis for de tre døgn i periode 1 med den henholdsvis maksimale, mest gennemsnitlige og minimale effektivitet baseret på døgngennemsnittene.

Af figur 9.1 og 9.2 fremgår det, at effektiviteten følger udsvingene i varmtvandsforbruget. Ved sammenligning med førnævnte, har fjernvarmeforbruget for hele varmt brugsvandssystemet, vist på figur 9.3, et mere stabilt forløb, hvoraf fjernvarmeforbrugets nedre grænse skyldes dækning af Aalborgkollegiets cirkulationstab, som beskrevet i kapitel 8 omhandlende cirkulation.

At effektiviteten udviser en større sammenhæng med varmtvandsforbruget end fjernvarmeforbruget, skyldes blandt andet, at cirkulationsflowet reduceres i perioder med varmtvandsforbrug, som omtalt i kapitel 8. Det reducerede cirkulationsflow medfører, at der i disse perioder er et lavere fjernvarmeforbrug til dækning af cirkulationstab, hvilket har en påvirkning på effektiviteten. Det kan dermed konkluderes, at cirkulationssystemet har en væsentlig indvirkning på effektiviteten. Denne konklusion underbygges af de indikerede gennemsnit på figur 9.2 og 9.3, hvor det fremgår, at døgnet med den maksimale effektivitet ligeledes har det største gennemsnitlige varmtvandsforbrug. Samme døgn ses desuden at have det højeste fjernvarmeforbrug, hvilket afspejler den øgede varmtvandsproduktion.

Derudover er der påvist en sammenhæng mellem afkølingen af fjernvarmen og varmtvandsforbruget, hvor længerevarende varmtvandsforbrug giver en større afkøling, og dermed bedre udnyttelse af fjernvarmen. Den øgede fjernvarmeudnyttelse medfører et lavere fjernvarmeforbrug i [m^3] pr. [kWh] overført af veksleren, hvilket er fordelagtigt for Aalborgkollegiet grundet metoden til afregning af fjernvarme i Aalborg. Den omtalte afkøling af fjernvarmen fremgår af figur 9.4.



Figur 9.4. Vekslerens afkøling af fjernvarmen på timebasis for de tre døgn i periode 1 med den henholdsvis maksimale, mest gennemsnitlige og minimale effektivitet baseret på døgngennemsnittene.

På baggrund af den ovenstående analyse, kan det konkluderes, at varmtvandsforbruget har den største indvirkning på effektiviteten af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem. Varmtvandsforbrugets indvirkning skyldes dels, at tapninger medfører en reduktion i andelen af fjernvarme, som går til dækning af cirkulationstab, og dels, at der ved produktion af nyt varmt brugsvand er en bedre afkøling af fjernvarmen.

9.2 Effektivitetens udvikling mellem de tre måleperioder

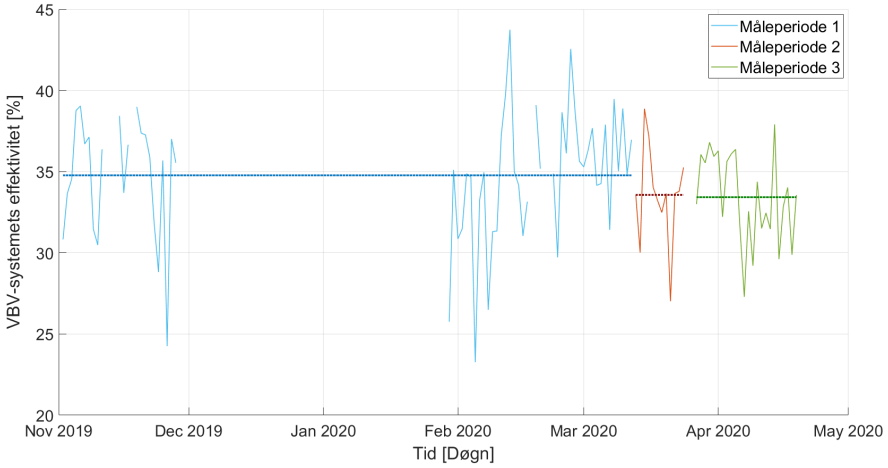
I det følgende redegøres for udviklingen i varmt brugsvandssystemets effektivitet, beregnet ud fra summerede døgnværdier for hver måleperiode i henhold til formel (9.1). Formålet er at afdække betydningen af forskellige ændringer, herunder Coronanedlukningen, ændring

af cirkulationspumpens indstilling, samt afsyring af veksleren d. 25/3-2020. Analyserne er bestemt på baggrund af måledata præsenteret i Appendiks I.

Som nævnt tidligere i dette kapitel, er effektiviteten bestemt for henholdsvis hele varmt brugsvandssystemet og for varmt brugsvandsproduktionen alene. Effektivitet for hele varmt brugsvandssystemet er et udtryk for systemets samlede ydeevne og påvirkes af alle systemets delelementer, såsom veksleren og cirkulationssystemet. Effektiviteten for varmt brugsvandsproduktionen svarer til vekslerens effektivitet ved produktion af nyt varmt brugsvand, eksklusiv fjernvarmeforbruget til cirkulationstab. Ekskludering af fjernvarmeforbrug til cirkulationstab, giver et mere præcist billede af vekslerens ydeevne isoleret set, og kan dermed vise ændringen i effektivitet uden påvirkning af cirkulationen.

Der er observeret store variationer i de døgnmæssige effektiviteter, hvormed måleperiodernes længde har en indflydelse på den gennemsnitlige effektivitet for hver måleperiode, hvilket medfører en vis usikkerhed ved sammenligning af de gennemsnitlige effektiviteter på tværs af de tre måleperioder.

Figur 9.5 viser udviklingen i effektiviteten for hele varmt brugsvandssystemet for de tre måleperioder. Værdierne for de afbildede gennemsnit fremgår af tabel 9.2, som ligeledes viser de gennemsnitlige varmtvandsforbrug, fjernvarmeforbrug, samt fjernvarmeafkølingen.



Figur 9.5. Effektivitet for hele varmt brugsvandssystemet, beregnet på døgnbasis for de forskellige måleperioder, samt dertilhørende gennemsnit, afbildet med horisontale linjer. Gennemsnitsværdierne fremgår af tabel 9.2.

Måleperiode	VBV-forbrug [m^3/døgn]	Total FV til VBV-system [m^3/døgn]	Fjernvarme afkøling [°C]	Hele VBV-systemets effektivitet [%]
1	2,35	6,42	16,08	36,67
2	2,09	6,19	15,94	33,57
3	2,12	6,32	15,38	33,56

Tabel 9.2. Gennemsnitsværdier for hele varmt brugsvandssystemets effektivitet, varmtvandsforbrug, fjernvarmeforbrug, samt fjernvarmeafkøling for de tre måleperioder.

Af figur 9.5 og tabel 9.2 kan det ses, at effektiviteten af hele varmt brugsvandssystemet ligger mellem 33,56 - 36,67 % i de tre måleperioder, hvilket forventes at skyldes Aalborgkollegiets cirkulationssystem. Sammenhængen mellem effektiviteten og cirkulationssystemet

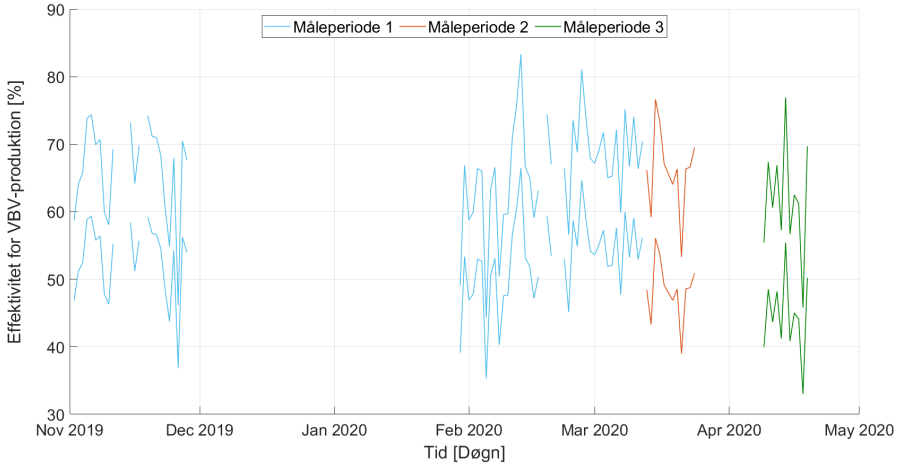
underbygges af, at den gennemsnitlige fjernvarmeafkøling ligger imellem 15,38 - 16,08 °C. Til sammenligning viste studiet [Bøhm, 2009], at den typiske fjernvarmeafkøling er 19 - 45 °C for boligejendomme og 11 - 24 °C for kontorbygninger. Det kan dermed konkluderes, at varmt brugsvandssystemets gennemsnitlige fjernvarmeafkøling er meget dårlig, da den er under den nedre grænse for typiske fjernvarmeafkølinger i boligejendomme, og i stedet tilsvarer kontorbygninger.

Det fremgår af figur 9.5 og tabel 9.2, at den største ændring i hele varmt brugsvandssystemets gennemsnitlige effektivitet forekommer mellem måleperiode 1 og 2. Faldet i effektivitet mellem måleperiode 1 og 2 på 3,10 procentpoint, svarer til en reduktion på ca. 8,5 %. Det er vurderet, at denne reduktion af effektiviteten primært skyldes, at nogle beboere tager væk fra Aalborgkollegiet grundet Coronanedlukningen, jævnfør kapitel 6 og Appendiks C, hvilket ligeledes afspejles af et reduceret varmtvandsforbrug. De bortrejse beboere, under Coronanedlukningen, medfører et fald i varmtvandsforbruget 275,28 L/døgn, svarende til en reduktion på 11,70 %. På baggrund af effektiviteten for hele varmt brugsvandssystemet i måleperiode 1, burde denne reduktion af varmtvandsforbruget ligeledes medføre en reduktion af fjernvarmeforbruget svarende til ca. 752,66 L/døgn. Den forventede reduktion af fjernvarmeforbruget er bestemt ved at isolere fjernvarmeforbruget i formel (9.1). Dog ses det af tabel 9.2, at det reelle fjernvarmeforbrug kun falder med ca. 230 L/døgn.

Forskellen mellem det forventede og faktiske fald i fjernvarmeforbruget mellem måleperiode 1 og 2 viser, at ændring af cirkulationspumpens indstilling muligvis har medført en stigning i fjernvarmeforbruget på op til ca. 522,66 L/døgn, som følge af, at cirkulationsflowet generelt er blevet højere og mindre varierende, som vist på figur 8.1. Det er derfor vurderet, at ændring af cirkulationspumpens indstilling har haft en indvirkning på den ændrede effektivitet mellem måleperiode 1 og 2.

I modsætning til det ovenstående, forekommer der ikke nogen væsentlig ændring i effektiviteten imellem måleperiode 2 og 3, hvor vekslerafsyringen foretages. I overensstemmelse med den stort set uændrede fjernvarmeafkøling i samme periode, som kan ses i tabel 9.2, kan det dermed konkluderes, at afsyringen ikke har haft nogen mærkbar effekt på effektiviteten af hele varmt brugsvandssystemet. På den baggrund er det vurderet, at afsyringens manglende effekt enten kan skyldes, at vekslerens effektivitet ikke er påvirket af tilkalkning, eller at veksleren er tilkalket i så høj en grad, at en vanlig afsyring ikke har været tilstrækkelig. Såfremt at vekslerens effektivitet ikke er påvirket af tilkalkning, kan den dårlige fjernvarmeafkøling skyldes et lavt overførselstal. Overførselstallet er bestemt til 348 W/K, ud fra energiforskellen på vekslerens primær- og sekundærside ved stationære forhold, i henhold til formel (10.1) og (10.2) i kapitel 10.2. Beregningen af overførselstallet er beskrevet nærmere i Appendiks K vedrørende input til de foretagede Polysun-simuleringer.

Varmt brugsvandsproduktionens effektivitet er bestemt ved at ekskludere henholdsvis den nedre og øvre andel af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, der går til cirkulationstab, hvilket fremgår af tabel 8.1 i kapitel 8 omhandlende cirkulation. Varmt brugsvandsproduktionens effektivitet er vist på figur 9.6.



Figur 9.6. Effektivitet for varmt brugsvandsproduktionen, beregnet på døgnbasis for de forskellige måleperioder i et interval for henholdsvis den nedre og øvre andel af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug, der går til cirkulationstab, som vist i tabel 8.1

Effektivitet	**Måleperiode 1**	**Måleperiode 2**	**Måleperiode 3**
Øvre grænse	66,22 %	66,18 %	61,86 %
Nedre grænse	52,84 %	48,44 %	44,56 %

Tabel 9.3. Gennemsnitlige effektivitet for henholdsvis den øvre og nedre grænse for varmt brugsvandsproduktionens effektivitet.

På baggrund af en sammenligning af hele varmt brugsvandssystemets effektivitet, vist på figur 9.5, og varmt brugsvandsproduktionens effektivitet på figur 9.6, kan det konkluderes, at cirkulationssystemet medfører en væsentlig reduktion af hele varmt brugsvandssystemets effektivitet, grundet det konstante cirkulationstab, som cirkulationssystemet medfører.

9.3 Opsummering

På baggrund af den foretagede analyse af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystems effektivitet, for hver af de tre måleperioder, kan det konkluderes, at:

- Den gennemsnitlige effektivitet for hele Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem ligger mellem 33,56 - 36,67 %
- Den gennemsnitlige effektivitet af varmt brugsvandsproduktionen ligger imellem 44,56 - 66,22 %
- Den gennemsnitlige fjernvarmeafkøling er mellem 15,38 og 16,08 °C

På baggrund af de ovenstående resultater kan det konkluderes, at Aalborgkollegiets cirkulationssystem har stor betydning for hele varmt brugsvandssystemets effektivitet. Cirkulationssystemets påvirkning afspejles, blandt andet, ved et nogenlunde konstant minimumforbrug af fjernvarme, samt en dårlig, gennemsnitlig fjernvarmeafkøling for alle måleperioder. Den dårlige fjernvarmeafkøling underbygges af, at den ligger under den nedre grænse på 19 °C for typiske boligejendomme, i henhold til [Bøhm, 2009].

På baggrund af en analyse af forskellige parametres påvirkning på effektiviteten, for hele Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, blev varmtvandsforbruget fundet til at have den mest signifikante indvirkning. Dette blev ligeledes observeret ved en sammenligning af effektivitetens udvikling, på tværs af de tre måleperioder, hvor et reduceret varmtvandsforbrug mellem måleperiode 1 og 2, grundet Coronanedlukningen, medførte det største fald i effektiviteten. Varmtvandsforbrugets påvirkning på effektiviteten skyldes en kombination af, at varmt brugsvandstapninger medfører et reduceret cirkulationsflow og at der opnås en større fjernvarmeafkøling ved produktion af nyt varmt brugsvand, fremfor ved recirkulering.

Der blev ikke påvist nogen mærkbar effekt af den foretagede afsyring af Aalborgkollegiets veksler, hverken i forhold til effektivitet eller fjernvarmeafkøling.

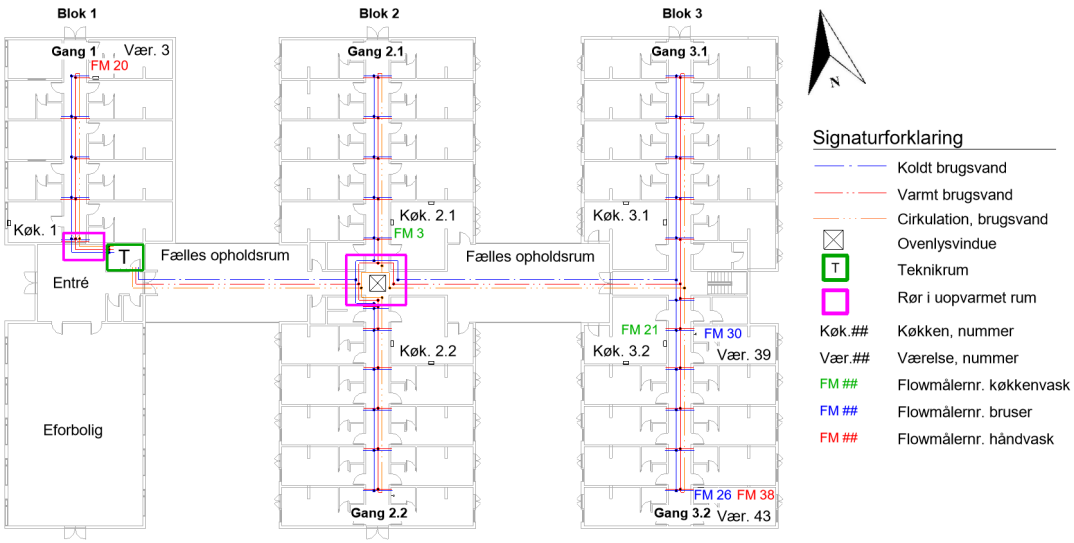
Energitab under tapninger

10

I dette afsnit dokumenteres og redegøres der for energiforbrug og -tab i forbindelse med seks foretagede tapninger, fordelt på henholdsvis køkken 2.1 og 3.2, vis placering kan ses på figur 10.1. Formålet er at undersøge sammenhænge mellem tapstedernes placering, tappevarighed, ventetid og fordeling af tab i varmt brugsvandssystemet, i forbindelse med tapninger.

På baggrund af måledata for to udvalgte tapninger, er der identificeret generelle tendenser i krumningerne for varmt brugsvandstemperaturen i henholdsvis teknikrum og ved tapsted, som benyttes til vurdering af cirkulationssystemets virkningsgrad i forskellige rørstrækninger. Hertil er tømningstiden estimeret for forskellige rørstrækninger for Aalborgkollegiet, som ligeledes anvendes til vurdering af cirkulationssystemets virkning i forhold til at opnå en ubesværende ventetid for de to tapsteders placering.

I henhold til den statistiske analyse af måledata for udvalgte tapsteder, beskrevet i kapitel 7, er der stor forskel på typiske tappevarigheder for de udvalgte tapsteder. For at opnå et indblik i, hvorledes rørtabene fordeler sig ved gennemsnitlige tapninger, er der derfor ligeledes foretaget en energiberegning for hvert af de udvalgte tapsteder, hvor gennemsnitsværdier og medianværdier er anvendt.



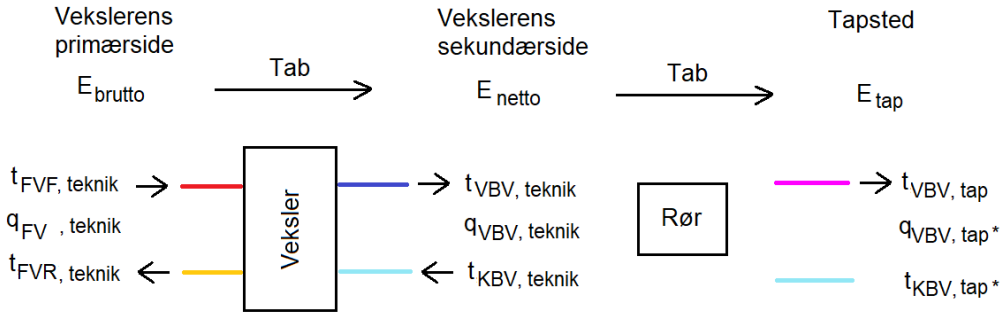
Figur 10.1. Oversigt over relevante rum og placering af flowmålerne. Dette er samme figur som figur 3.5 i kapitel 3.2 på side 20.

10.1 Metode og forudsætninger

Til analyse af energiforbrug og -tab, samt tømningstid for rør, i forbindelse med de udførte tapninger, er der anvendt forskellige metoder og forudsætninger, hvilke er beskrevet i det følgende afsnit. Derudover er metoden til bestemmelse af gennemsnitlige tapninger ligeledes beskrevet. Analysens metode og udførelse er baseret på metoden beskrevet i rapporten [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019].

10.1.1 Energiberegninger

Energitabene i Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem beregnes som differencen af energiforbrugene for tre forskellige dele af systemet; vekslerens primærside, vekslerens sekundærside og tapsteder. Figur 10.2 viser en principskitse over, hvordan energiforbrug og -tab er beregnet for de forskellige dele af systemet.



Figur 10.2. Principskitse over inddelingen af systemet, som er anvendt til beregning af energiforbrug og energitab. I afsnit 10.1.4 er betydningen af * forklaret.

På baggrund af figur 10.2, beregnes energiforbrugene E_{brutto}, E_{netto} og E_{tap} med henholdvis formel (10.1), (10.2) og (10.3).

$$E_{brutto} = q_{FV} \cdot C_p \cdot \rho \cdot (t_{FVF} - t_{FVR}) \tag{10.1}$$

$$E_{netto} = q_{VBV,teknik} \cdot C_p \cdot \rho \cdot (t_{VBV,teknik} - t_{KBV,teknik}) \tag{10.2}$$

$$E_{tap} = q_{VBV,tap*} \cdot C_p \cdot \rho \cdot (t_{VBV,tap} - t_{KBV,tap*}) \tag{10.3}$$

E	Energiforbrug	[kJ/min]
q	Volumenstrøm	[m^3/min]
C_p	Specifik varmekapacitet	[kJ/kg °C]
ρ	Densitet	[kg/m^3]
t	Temperatur	[°C]
*	Se tabel 10.2	

Ved at kende energiforbrugene for de forskellige dele af systemet, kan tabene bestemmes ud fra differencen imellem dem. Overordnet kan tabene inddeles i vekslertab og rørtab, hvor vekslertabet er forskellen mellem E_{brutto} og E_{netto}, og rørtabet er forskellen mellem E_{netto} og E_{tap}.

Rørtab medvirker både til energitab samt vandspild forårsaget af ventetid. For at skelne disse, er andelen af rørtabet, hvor der forekommer vandspild, beregnet separat. Da det er meget individuelt, hvornår vandtemperaturen anses for at være tilstrækkelig, er det i denne analyse valgt at definere vandspild som alt tappet varmt brugsvand med en temperatur under 30 °C, svarende til temperaturen som [Dansk Standard, 2009] foreskriver til vask af hænder. Denne temperatur er valgt på baggrund af analysen af sluttemperaturer for tapninger, beskrevet i den statistiske analyse i kapitel 7. I den omtalte analyse blev det udledt, at ca. 50 % af tapningerne i køkkener stoppes, før vandet har opnået en temperatur på 40 °C. På den baggrund er det vurderet, at beboerne bruger vandet, før det har nået den tilstrækkelige temperatur i henhold til [Dansk Standard, 2009].

10.1.2 Rørs tømningstid

Tømningstiden bestemmes ud fra vandets hastighed i rørene, hvormed vandets position i vandrørene kan bestemmes for forskellige tidspunkter ud fra dets tilbagelagte strækning. Til estimering af tømningstid er der benyttet en empirisk formel (10.4) fra [Dansk Standard, 2009], som er fremstillet til beregning af ventetid for kobberrør. Formel (10.5) er en modificeret udgave af formel (10.4), hvor rørlængden er isoleret og den forudsatte volumenstrøm på 0,2 L/sek. er udskiftet med varmtvandsforbruget målt med Brunata energimåleren på det varme brugsvand.

$$\tau = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot L}{0{,}2\,L/sek. \cdot 10^3} \tag{10.4}$$

$$L = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot q \cdot \tau}{d_i^2 \cdot \pi} \tag{10.5}$$

τ	Tømningstid	[sek.]
d_i	Rørets indvendige diameter	[mm]
L	Tilbagelagt rørstrækning	[m]
q	Volumenstrøm	[L/sek.]

Eftersom at formel (10.4) og (10.5) er empiriske formler udviklet til kobberrør, og den indvendige tilstand af rørene på Aalborgkollegiet er ukendt, er der tilknyttet en væsentlig usikkerhed til resultaterne, hvorfor disse kun kan benyttes til at give et estimat.

10.1.3 Gennemsnitlige tapninger

Til beregning af energitabene for gennemsnitlige tapninger ved hvert tapsted, er formel (10.1), (10.2) og (10.3) anvendt, i kombination med måledata fra måleperiode 2, hvor der er anvendt gennemsnitsværdier fra Brunata energimålerdataene og medianværdier fra Huba flowmålerdata, som præsenteret i den statistiske analyse i kapitel 7. For returtemperaturen for fjernvarmen, er der anvendt en gennemsnitsværdi, beregnet ud fra datapunkter, hvor der samtidig er varmtvandsforbrug.

10.1.4 Anvendt måledata

Analyserne af energiforbrug og -tab er udført på baggrund af seks tapninger foretaget i køkken 2.1 og 3.2 d. 13/3, 16/4 og 5/5-2020 på Aalborgkollegiet, som vist i tabel 10.1.

Køkkenernes placering kan ses på figur 10.1. For at undersøge betydningen af rækkefølgen af tapningerne i de to forskellige køkkener, blev tapningerne d. 5/5-2020 udført i omvendt rækkefølge, således at der blev tappet i køkken 2.1 først.

Tapning Nr.	**Dato**	**Køkken** Nr.	**Varighed** [MM:SS]	**Varmtvandsforbrug** [L/min.]	[L/sek.]
1	13/3-2020	3.2	15:22	4,50	0,07
2		2.1	05:23	4,85	0,08
3	16/4-2020	3.2	18:17	5,15	0,09
4		2.1	06:28	4,03	0,07
5	5/5-2020	2.1	38:33	4,39	0,07
6		3.2	34:07	5,92	0,10

Tabel 10.1. Tapninger analyseret i forhold til energiforbrug og -tab. Tapningerne er angivet i kronologisk rækkefølge. OBS: D. 5/5-2020 er tappet i køkkenerne i omvendt rækkefølge.

Tapningerne i tabel 10.1 er foretaget i forbindelse med måling af ventetid frem til opnåelse af en stabil temperatur. Tapningernes varigheder er derfor lange sammenlignet med typiske tapninger, jævnfør statistisk analyse i kapitel 7. De lange tapninger giver et detaljeret indblik i energiforholdene under tapninger, både ved tapstedet og ved veksleren i teknikrummet. Tapningerne er foretaget tidligt om morgenen, hvor der ikke er foretaget andre tapninger i minimum 2 forudgående timer, med undtagelse af tapning 2, 4 og 6, som er udført umiddelbart efter henholdsvis tapning 1, 3 og 5. Af samme årsag afspejler disse tapninger derfor de værst mulige scenarier i forhold til ventetid for de to køkkener.

Til analyserne er der benyttet forskellig måledata fra både Brunata energimålerne og Huba flowmålerne. Tabel 10.2 viser hvilke måledata, der ligger til grund for de parametre, der indgår i beregning af de forskellige energiforbrug.

Energi	**Parametre**	**Måleudstyr**	**Opløsning**
E_{brutto}	Alle	Energimåler 30	1/minut
E_{netto}	Alle	Energimåler 29	1/minut
E_{tap}	$t_{VBV,tap}$	Flowmåler	1/sekund
	$t_{KBV,tap}*$, $q_{VBV,tap}*$	Energimåler 29	1/sekund

Tabel 10.2. Måledata benyttet til de forskellige energiberegninger.

Som angivet i tabel 10.2, er der benyttet en kombination af flowmålerdata og energimålerdata til beregning af E_{tap}, for at opveje for manglende flowmålerdata. Det er valgt at beregne E_{tap} med en opløsning på 1/sekund i henhold til analysen af opløsning i Appendiks F, da denne opløsning gør det muligt at få et mere præcist billede af, hvad der sker med energien ved tapstederne i løbet af tapningerne.

$t_{KBV,tap}*$ og $q_{VBV,tap}*$ er bestemt ud fra måledata fra energimåler 29, hvor opløsningen er ændret fra 1/minut til 1/sekund. For $t_{KBV,tap}*$ er dette gjort ved at definere den samme temperatur for alle sekunder i det pågældende minut. For $q_{KBV,tap}*$ er det samlede varmtvandsforbrug for hele tapningen benyttet til at beregne et gennemsnit pr. sekund.

10.1.5 Forudsætninger

Grundet arduinoernes indstilling, hvor der lægges data op hvert 15. minut, er der for lange tapninger en periode på 7-16 sekunder, hvor dette giver et udfald i Huba flowmålerdataene. Som erstatning for dette udfald er der beregnet en gennemsnitlig temperatur ud fra temperaturen før og efter udfaldet, som er indsat i stedet. Dette gøres, for at den totale energimængde stadig er repræsentativ, når den summeres op for hele tapningen.

Ved beregning af energiforbrugene, er densiteter og varmekapaciteter bestemt ud fra et gennemsnit af de temperaturer, som er angivet i den pågældende energiformel, herunder (10.1), (10.2) og (10.3).

Da det er et kollegium, hvor der er mange beboere og tapsteder, er der en usikkerhed i forhold til, om der foretages andre tapninger samtidig med de analyserede. Dette er forsøgt undgået bedst muligt ved at analysere tapninger, som er foretaget udenfor normal brugstid.

Der forekommer tidsforskydelse mellem dataopsamlingerne fra Huba flowmålerne og energimålerne, som beskrevet i kapitel 5. I analysen er der taget højde for tidsforskydelse ved at tilpasse energimålernes tidsstempler, så de stemmer overens med Huba flowmålernes tidsstempler. Af samme årsag er de analyserede tapningers start- og sluttidspunkter bestemt ud fra Huba flowmålernes flowdata med en opløsning på 1/sekund.

10.2 Energiforbrug og -tab for tapninger i køkken 2.1 og 3.2

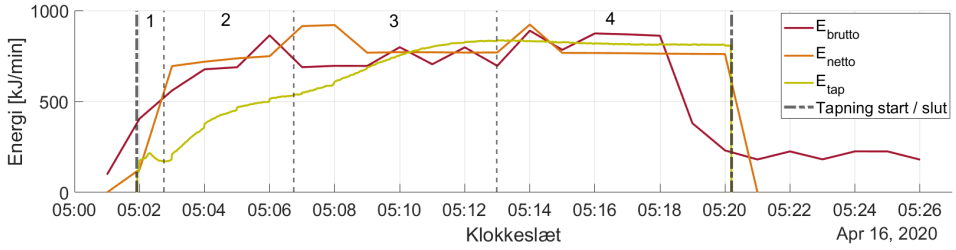
Dette afsnit redegør for energiforbrug- og tab, som forekommer i varmt brugsvandssystemet i forbindelse med de seks foretagede tapninger i køkken 2.1 og 3.2, vist i tabel 10.1. Da metoden for analyse af energiforbrug og -tab, beskrevet i afsnit 10.1, er den samme, er det valgt kun at vise en detaljeret beskrivelse af tapning 3 og 5, eftersom de er foretaget i hvert sit køkken. Begge tapninger er den første foretagede tapning, i minimum 2 timer, for det pågældende døgn og afspejler derfor den maksimale ventetid for det pågældende køkken.

I forbindelse med analyserne er der observeret måleusikkerhed ved tapning 1, 3 og 6, hvor der er registreret en højere varmt brugsvandstemperatur ved tapsted end i teknikrum, under semi-stationære og stationære forhold.

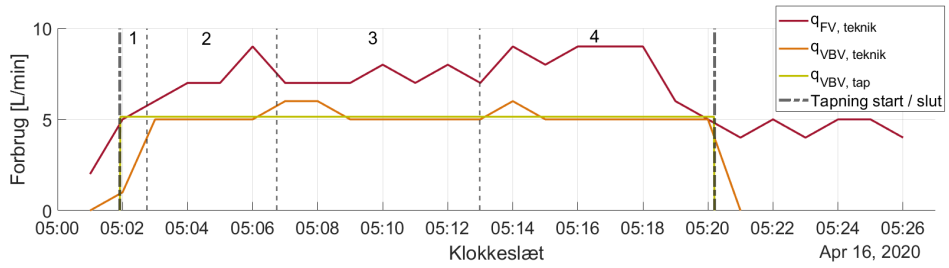
10.2.1 Tapning 3, køkken 3.2

Tapning 3 er foretaget kl. 05:01:55 - 05:20:12 d. 16/4-2020, hvor varmtvandsforbruget er fastlagt til 5,15 L/min., hvilket fremgår af tabel 10.1.

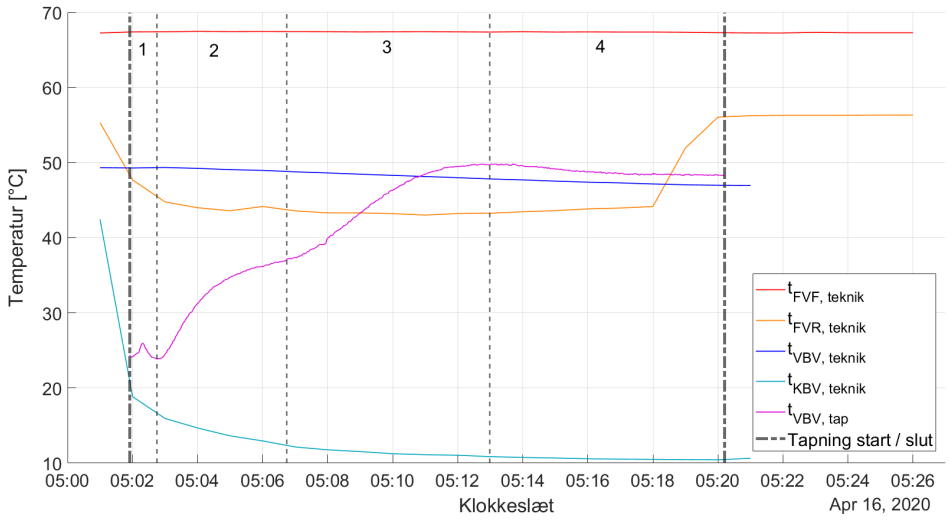
På baggrund af måledataene for forbrug af henholdsvis varmt brugsvand og fjernvarme, samt dertilhørende temperaturer, er energiforbrugene bestemt for henholdsvis vekslerens primærside, sekundærside og ved tapstedet, som vist på figur 10.3, 10.4 og 10.5. Tapningens forløb er inddelt i fire faser, som er angivet på hver figur.



Figur 10.3. Energiforbrug for tapning 3, køkken 3.2 d. 16/4-2020. $q_{VBV,tap}$ og E_{tap} er vist med en opløsning på 1/sekund. Resten er vist med opløsning på 1/minut.



Figur 10.4. Fjernvarmeforbrug og varmtvandsforbrug for tapning 3, køkken 3.2 d. 16/4-2020. $q_{VBV,tap}$ og E_{tap} er vist med en opløsning på 1/sekund. Resten er vist med opløsning på 1/minut.



Figur 10.5. Temperaturprofiler for tapning 3, køkken 3.2 d. 16/4-2020.

Af figur 10.3 fremgår det, at energien på vekslerens sekundærside er større end på primærsiden under størstedelen af tapningens forløb, på trods af, at fjernvarmeforbruget, vist på figur 10.4, er størst. Denne forskel er vurderet til at skyldes varmeakkumulation i veksleren, formentligt grundet cirkulationssystemet samt en høj rumtemperatur. Den høje rumtemperatur afspejles af den ligeledes høje koldt brugsvandstemperatur forud for tapningen, som vist på figur 10.5. Ovenstående afspejles ligeledes, at temperaturen $t_{VBV,teknik}$ falder i løbet af tapningen, fordi veksleren ikke kan opretholde denne temperatur, efterhånden som den ophobede varme bliver opbrugt. Efter endt tapning

forekommer et efterløb af fjernvarmen, hvilket opvejer for en del af ubalancen i energiforbruget.

På figur 10.3 kan det ses, at der er en væsentlig forskel på energien ved tapstedet sammenlignet med energien på henholdsvis vekslerens primær- og sekundærside. Energien på primær- og sekundærsiden opnår et nogenlunde konstant niveau efter få minutter, hvor energien ved tapstedet er stigende over en længere tidsperiode. Denne længere tidsperiode for tapstedets energistigning skyldes et større energitab for de rør, der forløber mellem teknikrummet og tapstedet. Derudover fremgår det ved sammenligning af figur 10.3 og 10.5, at tapstedets energiforbrug følger temperaturkurven for det varme brugsvand ved tapstedet. Denne sammenhæng skyldes, at der er anvendt et gennemsnitligt flow for tapstedet, som det fremgår af figur 10.4.

Af figur 10.5 fremgår det, at det varme brugsvand gennemgår fire faser undervejs i tapningen, hvor temperaturen ændrer sig med forskellige krumninger.

Fase 1 - Lokal varmeoptagelse

Der forekommer en lille temperaturstigning med maksimumtemperatur 23 sekunderefter tapningens start, hvilket skyldes lokal varmeoptagelse, formentligt fra et køleskabeller temperaturlagdeling i lokalet. At der er tale om en lokal varmeoptagelse, underbygges af det hurtige fald, hvor temperaturen efter yderligere 29 sekunder er faldet til samme startniveau. Denne lokale temperaturstigning fremkommer ligeledes ved tapning 1 og 6, som er foretaget ved samme tapsted.

Fase 2 - Røropvarmning til 37 °C

Temperaturudviklingen, som ses i fase 2, er resultatet af en kombination af rørtab i tapstedets koblingsrør, samt et begrænset cirkulationsflow i rørstrækningen mellem koblingsrøret og en af afgreningerne til blok 2, som vist på figur 10.1.

Som det fremgår af figur 10.5, tilnærmer varmt brugsvandstemperaturen sig ca. 37 °C i fasens slutning, hvilket afspejler den temperatur, som cirkulationsflowet kan opretholde i den førnævnte rørstrækning. Temperaturstigningens krumning er et resultat af rørtabet i koblingsrøret, som udlignes omkring kl. 05:07:05, efterhånden som røret opnår samme temperatur som det varme brugsvand.

Fase 3 - Røropvarmning til maksimum VBV-temperatur

I fase 3 ses en temperaturstigning, som efterfølgende flader ud, hvilket er resultatet af et højere cirkulationsflow mellem teknikrummet og en af afgreningerne til blok 2.

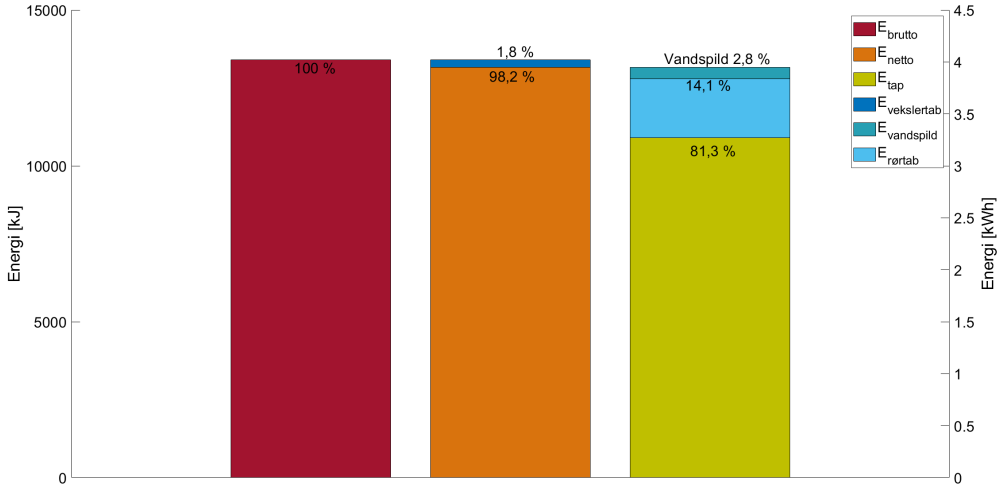
Temperaturstigningen i starten af fase 3 er både mere konstant og med lavere hældning, sammenlignet med temperaturstigningen i fase 2. Dette skyldes en øget varmt brugsvandstemperatur grundet et højere cirkulationsflow i rørstrækningen mellem veksleren og blok 2, hvormed der i fase 3 både er varmetab til grenrørene mellem blok 2 og blok 3, samt til tapstedets koblingsrør. Temperaturens stabilisering i slutningen af fase 3 afspejler, at rørene har opnået samme temperatur som brugsvandet, hvormed rørtabet bliver konstant.

Fase 4 - Semistationære forhold

I fase 4 er rørtabene konstante i de forskellige rørstrækninger mellem veksler og tapsted, hvilket ses ved, at temperaturkurverne for varmt brugsvand ved tapsted og i teknikrummet følges ad. De aftagende varmt brugsvandstemperaturer skyldes, at veksleren fortsat har noget akkumuleret varme tilbage, som benyttes til varmt brugsvandsproduktion. Først når varmeakkumulationen er opbrugt, vil varmt brugsvandstemperaturen flade ud i henholdsvis teknikrum og ved tapsted, hvorved der vil opstå stationære forhold.

Summerede energiforbrug- og tab

Tapning 3's totale energiforbrug og -tab, samt disses andelsmæssige fordeling, er vist på figur 10.6.

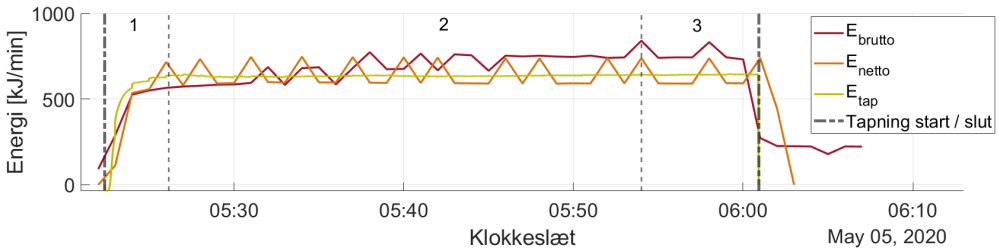


Figur 10.6. Energiforbrug og -tab forårsaget af tapningen i køkken 3.2 d. 16/4-2020.

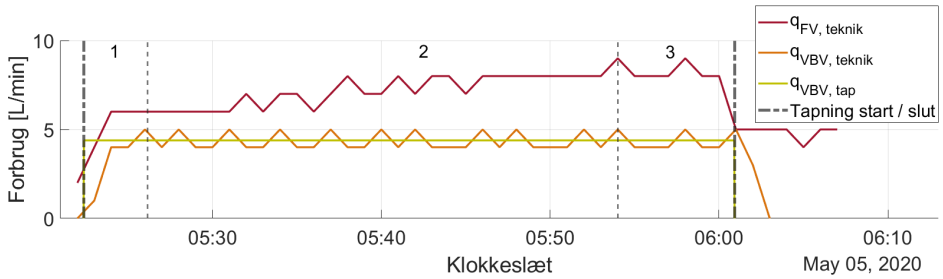
Af E_{tap} på figur 10.6 fremgår det, at det totale energitab for hele tapningen er 18,7 % svarende til 0,75 kWh. Heraf udgør vandspildet 0,11 kWh svarende til 9,52 L, fra tapningens start til opnåelse af en varmt brugsvandstemperatur på 30 °C. Da dette er en længere tapning i forhold til de typiske tapninger i køkkenet, i henhold til den statistiske analyse i kapitel 7, er det forventeligt, at vandspildet og rørtabet i de fleste tilfælde vil udgøre en større andel af det samlede energitab, end for den viste tapning. Det lille tab over veksleren hænger formentligt sammen med den førnævnte varmeakkumulation, som gør veksleren i stand til at overføre forholdsmæssigt mere energi til det varme brugsvand, i forhold til fjernvarmen, som tilføres i det tidsrum, som tapningen pågår.

10.2.2 Tapning 5, køkken 2.1

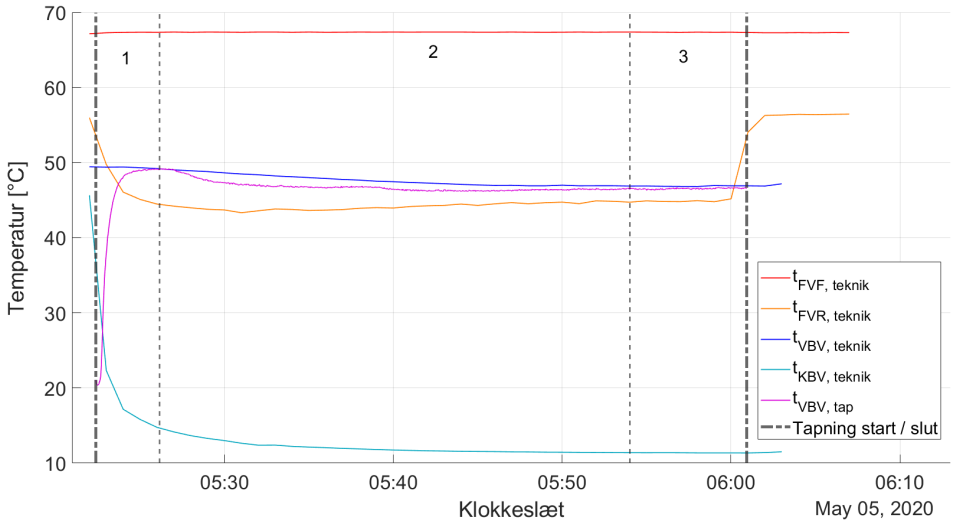
Tapning 5 er udført i køkken 2.1, kl. 05:22:22 - 06:00:55 d. 5/5-2020, hvor det gennemsnitlige forbrug er bestemt til 4,39 L/min , som vist i tabel 10.1. Figur 10.7, 10.8 og 10.9 viser henholdsvis forbrugkurver temperaturkurver, som forekommer i forbindelse med tapning 5.



Figur 10.7. Energiforbrug for tapning 5, køkken 2.1 d. 5/5-2020. $q_{VBV,tap}$ og E_{tap} er vist med en opløsning på 1/sekund. Resten er vist med opløsning på 1/minut.



Figur 10.8. Fjernvarmeforbrug og varmtvandsforbrug for tapning 5, køkken 2.1 d. 5/5-2020. $q_{VBV,tap}$ og E_{tap} er vist med en opløsning på 1/sekund. Resten er vist med opløsning på 1/minut.



Figur 10.9. Temperaturprofiler for tapning 5, køkken 2.1 d. 5/5-2020.

Af figur 10.7 fremgår det, at fjernvarmeforbruget er højere end varmtvandsforbruget, ligesom det var tilfældet for tapning 3. Dette stemmer overens med observationerne for vekslerens effektivitet, om at det volumenmæssigt kræver mere fjernvarme at producere en tilsvarende volumen af varmt brugsvand, som vist i kapitel 9.

Derudover stiger energiforbruget væsentligt hurtigere for tapning 5, der stabiliserer sig efter 3 minutter, sammenlignet med tapning 3, som stabiliserer sig efter 9 minutter. Forskellen

på stabiliseringstiden forventes at skyldes et begrænset cirkulationsflow i rørstrækningen mellem blok 2 og blok 3, som beskrevet i kapitel 8.

Som det fremgår af figur 10.9, stiger varmt brugsvandstemperaturen hurtigt, hvormed det besværliggøres at få et detaljeret indblik i temperaturstigningens krumning. Derfor er perioden mellem tapningens start til vandet opnår sin maksimale temperatur, vist i en højere opløsning på figur J.1 i Appendiks J.

På baggrund af temperaturens udvikling, som fremgår af figur 10.9, er det valgt at inddele tapningen i tre faser, som er gennemgået i det følgende.

Fase 1 - Opvarmning af rør

Af figur J.1 fremgår det, at der kun er én krumning for varmt brugsvandstemperaturen for tapning 5, sammenlignet med tapning 3. Forskellen i antal krumninger er vurderet til at skyldes, at der kun forekommer ét cirkulationsflow i rørstrækningen mellem veksleren og tapstedet, da begge tapsteder har samme længde uisolerede koblingsrør. Førnævnte betyder, at cirkulationen formentligt fungerer som det skal i rørstrækningen hen til køkken 2.1. Dette underbygges af, at bøjningen for røropvarmning har en varighed på 5 minutter for tapning 3, imens samme bøjning for tapning 5 kun har en varighed på 2,5 minutter, hvilket tyder på, at der opvarmes en længere rørstrækning ved tapning 3 end ved tapning 5.

Fase 2 - Semistationære forhold

I denne fase forekommer samme mønster som for de semistationære forhold under tapning 3, hvor der er et konstant rørtab og vekslerens varmeakkumulation aftager over tid. Dette fremgår af figur 10.9 ved, varmt brugsvandstemperaturen er faldende i både teknikrum og ved tapsted

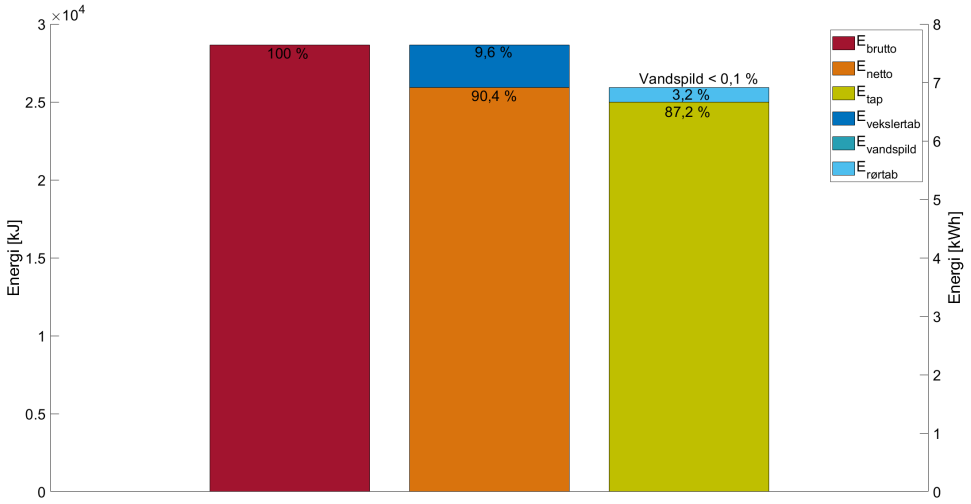
Fase 3 - Stationære forhold

Som den eneste af de seks analyserede tapninger, opnås der stationære forhold, hvilket her er fastsat til en maksimal forskel mellem varmt brugsvandstemperaturen i teknikrum og ved tapsted på $\pm 0{,}25\,^{\circ}\mathrm{C}$. Temperaturforskellen i tapningens stationære fase fremgår af figur J.2 i Appendiks J.

På baggrund af de stationære forhold, mellem temperaturen for det varme brugsvand i teknikrum og ved tapsted, er det konstante rørtab mellem teknikrum og tapsted bestemt til 107,1 W. Med en rørlængde på 30 m mellem teknikrum og tapsted, svarer førnævnte til et rørtab på 3,06 W/m, hvoraf størstedelen af rørtabet forekommer i de uisolerede koblingsrør.

Summerede energiforbrug- og tab

Figur 10.10 viser de totale energiforbrug og -tab for tapning 5 i køkken 2.1 d. 5/5-2020.



Figur 10.10. Energiforbrug og energitab forårsaget af tapning 5, køkken 2.1 d. 5/5-2020.

Af figur 10.10 fremgår det, at der er et totalt energitab på 12,8 %, svarende til 0,98 kWh. Fra tapningen påbegyndes til der opnås en varmt brugsvandstemperatur på 30 °C, forekommer der et vandspild på 2,0 L, svarende til $2{,}90 \times 10^{-4}$ kWh, hvilket er under en fjerdedel af vandspildet for tapning 3, beskrevet i afsnit 10.2.1. Den væsentlige forskel på vandspild for tapning 3 og 5 underbygger, at cirkulationen ikke har samme flow i hele strækningen mellem teknikrum og køkken 3.2, hvor tapning 3 blev foretaget.

10.2.3 Sammenligning af analyserede tapninger

På baggrund af beregningerne, foretaget for de seks tapninger, er der foretaget en sammenligning af resultaterne med henblik på at udlede generelle tendenser i forhold ventetid og rørtab. Resultaterne for de analyserede tapninger er vist i tabel 10.3. Det "negative" tab ved tapning 1 skyldes, at det ikke har været muligt at fastlægge størrelsen af fjernvarmeefterløbet for denne tapning, grundet en begrænset tidsperiode imellem udførelse af tapning 1 og 2, hvorved det ikke er muligt at bestemme det totale fjernvarmeforbrug relateret til tapning 1.

Tapning Nr.	**Køkken** Nr.	**Varighed** [MM:SS]	**E_{brutto}** [%]	**Vekslertab** [%]	**E_{netto}** [%]	**Rørtab** [%]	**E_{tap}** [%]	**Vandspild** [L]	**Ventetid** [sek.]
1	3.2	15:22	100	-7,15	107,15	30,4	76,75	10,64	142
2	2.1	05:23	100	11,23	88,77	11,35	77,42	2,18	27
3	3.2	18:17	100	1,81	98,19	16,89	82,30	9,52	111
4	2.1	06:28	100	12,33	87,67	9,35	78,32	2,08	31
5	2.1	38:33	100	9,57	90,43	3,23	87,20	1,97	27
6	3.2	34:07	100	11,29	88,71	10,18	78,53	21,33	216

Tabel 10.3. Energiforbrug og tab for de forskellige tapninger er angivet i [%] i forhold til E_{brutto}.

Af tabel 10.3 fremgår det, at der generelt overføres 76,75 - 87,20 % af den tilførte fjernvarmeenergi til tapstedet, på tværs af tappevarighed og køkkenplacering. På baggrund af den lille afvigelse mellem overført fjernvarmeenergi, vurderes det derfor, at dette er repræsentativt for tapninger med en varighed svarende til de foretagede.

Ved sammenligning af de andelsmæssige vekslertab for tapning 3 og 4 ses det, at tapning 3 har et væsentligt lavere, andelsmæssigt vekslertab, hvilket formodes at skyldes varmebidrag fra varmeakkumulation i veksleren. I den efterfølgende tapning, tapning 4, kan det ses, at det andelsmæssige vekslertab er væsentligt større, hvilket formentligt er et resultat af, at varmeakkumulationen er opbrugt i forbindelse med tapning 3. På baggrund af denne sammenligning, samt de øvrige tapninger, vurderes det andelsmæssige vekslertab derfor at være afhængig af varigheden, hvori veksleren har skullet producere varmt brugsvand.

Ud fra en sammenligning af de andelsmæssige rørtab for de forskellige tapninger, fremgår det, at de andelsmæssige rørtab for køkken 3.2 er væsentligt større end for køkken 2.1. Heraf fremgår det ligeledes, at de andelsmæssige rørtab for hvert individuelt køkken, er afhængige af varigheden, hvor en lang varighed medfører et lavere, andelsmæssigt rørtab. Forskellen på de andelsmæssige rørtab for de to køkkener afspejles ligeledes af ventetiderne og dertilhørende vandspild. De lange ventetider for køkken 3.2 stemmer overens med konklusionerne beskrevet i kapitel 8, omhandlende cirkulation, hvor der blev påvist et begrænset cirkulationsflow i blok 3, hvilket ligeledes stemmer overens med de to observerede krumninger, beskrevet i det forudgående afsnit.

På baggrund af den væsentlige forskel på ventetid for de to køkkener kan det derfor konkluderes, at ventetiden afhænger af køkkenernes placering, hvilket viser, at cirkulationssystemet ikke er balanceret.

10.3 Tømningstider for udvalgte rørstrækninger

På baggrund af en visuel inspektion, er rørdimensioner og rørlængder estimeret, som vist i Appendiks K. I kombination med formel (10.4), er disse rørinformationer anvendt til estimering af tømningstider for rørstrækningerne vist i tabel 10.4. For at opnå så præcise estimater som muligt, er formlens oprindeligt definerede flow på 0,2 L/sek. erstattet med de gennemsnitlige målte varmtvandsforbrug i [L/sek.] for de pågældende tapninger.

Tabel 10.4 viser de estimerede tømningstider, på baggrund af formel (10.4). Estimaterne i tabel 10.4 angiver den forventelige tid for udskiftning af vand i rørstrækningerne, uden cirkulation. Eftersom at der er cirkulation på hoved- og grenrør på Aalborgkollegiet, som går på langs og på tværs af bygningen, svarer den forventelige ventetid derfor til tømningstiden for koblingsrørene.

Tapning Nr.	**Tapsted**	**Flow, q** [L/sek.]	**Tømningstid for rørstrækning [sek.]**	
			Koblingsrør - tap	**Afgrening gang 2.2 - tap**
1	Køkken 3.2	0,07	25	448
2	Køkken 2.1	0,08	22	35
3	Køkken 3.2	0,09	19	349
4	Køkken 2.1	0,07	25	40
5	Køkken 2.1	0,07	25	40
6	Køkken 3.2	0,10	17	314

Tabel 10.4. Estimerede tømningstider for forskellige rørstrækninger, dvs. tid det tager, før at alt vand i rørstrækningen er skiftet ud. "Ovenlys" refererer til T-stykket, som fører brugsvand til gang 2.1, som vist på figur 10.1.

På baggrund af en sammenligning med de registrerede ventetider, vist i tabel 10.3, kan det derfor konkluderes, at køkken 2.1 tilnærmelsesvist overholder den forventede ventetid, omend den viste ventetid blot er for 30 °C fremfor 45 °C, som er foreskrevet for køkkener i henhold til [Dansk Standard, 2009]. På den baggrund kan det konkluderes, at der med stor sandsynlighed forekommer cirkulationsflow i gang 2.1, men at cirkulationsflowet formentligt ikke er tilstrækkeligt til at opretholde en ubesværende ventetid for en varmt brugsvandstemperatur på 45 °C. Efter samme princip kan det konkluderes, at køkken 3.2's ventetider er væsentligt længere end de estimerede, hvilket underbygger de tidligere konklusioner angående begrænset cirkulationsflow i blok 3. Ud fra den estimerede tømningstid for alle koblingsrørene, kan det desuden konkluderes, at koblingsrørenes længde ikke gør det muligt at overholde tommelfingerreglen om maksimalt 10 sekunders ventetid.

10.4 Gennemsnitlige tapninger

I afsnit 10.2 blev tapninger med en varighed mellem ca. 5,5 og 38,5 minutter analyseret, med henblik på at undersøge varmt brugsvandssystemets energitab under tapninger. I henhold til den statistiske analyse i kapitel 7, er medianen for tappevarighed i køkkenerne dog langt kortere, end varigheden af de seks tapninger, beskrevet i afsnit 10.2, hvilket fremgår af tabel 10.5. For at afdække energitabene ved gennemsnitlige tapninger, er der foretaget en undersøgelse af rørtab for en gennemsnitlig tapning for hvert tapsted, vist på figur10.1.

Tapsted	**Placering**	**Varighed** [MM:SS]	**Rørtab** [%]
Køkkenvask	Køk. 2.1	00:21	23,6
	Køk. 3.2	00:19	34,8
Håndvask	Vær. 3	01:58	50,9
	Vær. 43	00:27	69,9
Bruser	Vær. 39	05:00	17,9
	Vær. 43	30:48	9,5

Tabel 10.5. Resultater for gennemsnitlige tapninger.

Ved sammenligning af tabel 10.5 og 10.3 fremgår det, at det andelsmæssige rørtab for tapninger ved køkkener og håndvaske er højere for tapningerne i tabel 10.5. Forskellen i de andelsmæssige rørtab er vurderet at skyldes den kortere varighed for tapningerne i tabel 10.5, hvorved rørene ikke opnår semistationære forhold.

10.4.1 Opsummering

På baggrund af den foretagede analyse kan det konkluderes, at mellem 76,75 - 87,20 % af den tilførte fjernvarmeenergi blev overført til tapstedet, for de seks foretagede tapninger i køkken 2.1 og køkken 3.2.

Der blev påvist en sammenhæng mellem et øget vekslertab og længerevarende, sammenhængende tappevarigheder, hvori veksleren skal producere varmt brugsvand, grundet at vekslerens varmeakkumulation opbruges efter en begrænset tidsperiode,

hvorefter vekslerens fjernvarmeforbrug øges. Derudover kan det konkluderes, at køkken 3.2 har væsentligt større andelsmæssige rørtab end køkken 2.1, hvilket ligeledes afspejles af de registrerede ventetider og dertilhørende vandspild. Årsagen til forskellen mellem køkkenernes ventetider, er vurderet at skyldes, at der kun er et begrænset cirkulationsflow i rørstrækningen mellem afgreningen til gang 2.2 og blok 3. I modsætning hertil, er der et højt cirkulationsflow mellem afgreningen til gang 2.2 og teknikrummet, hvilket underbygger konklusionerne i kapitel 8 angående cirkulation. Forskellen på de to køkkener blev ligeledes påvist ved en sammenligning med estimerede rørtømningstider. For køkken 2.1 blev der observeret overensstemmelse mellem den forventede rørtømningstid for koblingsrøret og den registrerede ventetid for en varmt brugsvandstemperatur på 30 °C. For køkken 3.2 var de registrerede ventetider derimod tættere på den estimerede tømningstid for rørstrækningen mellem tapsted og afgrening til gang 2.1, end på de estimerede tømningstider for koblingsrør.

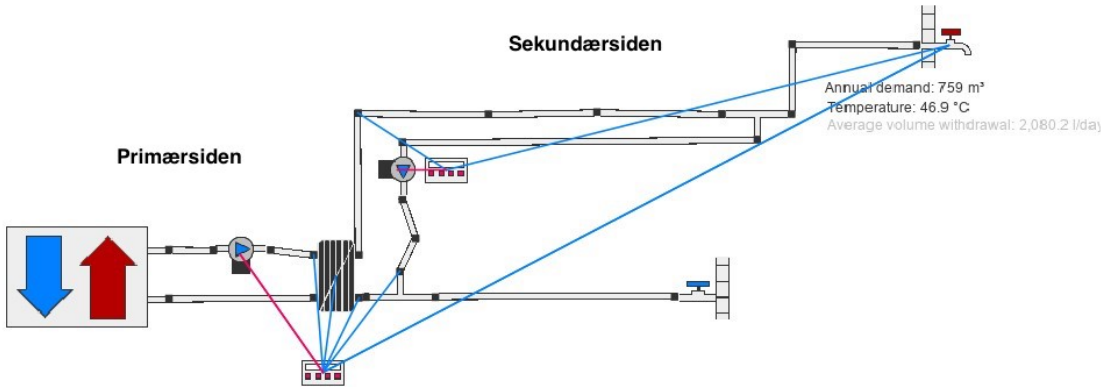
En sammenligning af rørtabene for de individuelle køkkener viste desuden, at længere tappevarigheder generelt fører til lavere andelsmæssige rørtab, hvilket underbygges af undersøgelsen af de gennemsnitlige tapninger, baseret på median- og gennemsnitsværdier. Sammenhængen mellem tappevarighed og rørtab skyldes, at størstedelen af rørtabene forekommer i starten af tapningerne, hvor tapstedet koblingsrør opvarmes.

Effektiv veksler 11

I ingeniørbranchen bliver det kontinuerligt mere almindeligt at anvende simuleringsprogrammer i dimensioneringsøjemed, da disse er stærke værktøjer, som kan foretage komplicerede beregninger på kort tid sammenlignet med traditionelle beregningsmetoder. Dette kapitel beskriver anvendelsen af Polysun til simulering af optimeringsforslag til Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem. Under udarbejdelsen af optimeringsforslagene, blev der observeret begrænsninger relateret til simulering af detaljerede varmt brugsvandssystemer med flere tapsteder og cirkulation, hvilke er beskrevet i AppendiksL. Grundet disse begrænsninger, har det ikke været muligt at foretage simuleringer af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem med tilstrækkelig detaljegrad til at opnå realitetstro resultater. Det er derfor valgt at anvende en simplificeret model til at undersøge forskellige vekslere, med udgangspunkt i konklusionerne om vekslerens dårlige fjernvarmeafkøling, beskrevet i kapitel 9. Til udførelse af Polysunsimuleringerne, er der udarbejdet kunstige forbrugsprofiler med udgangspunkt i måledata fra Aalborgkollegiet.

11.1 Opbygning af Polysun-model

Til simulering af forskellige vekslere, er der anvendt en simplificeret model med ét tapsted for hele Aalborgkollegiet Polysun-modellen er opbygget efter samme princip som et typisk varmt brugsvandssystem, med veksler og dertilhørende primær- og sekundærside, samt tapsted. Den anvendte Polysun-model er vist på figur 11.1.



Figur 11.1. Simplificeret Polysun-model af Aalborgkollegiet.

Primærsiden består af en energikilde der simulerer en fjernvarmetilslutning. Fjernvarmeflowet, og dermed energitilførslen til veksleren, er styret af en pumpe, der reguleres af en variabel hastighedescontroller. Controlleren regulerer flowet på primærsiden med henblik

på at opnå et ønsket temperatursetpunkt ved tapstedet. På figur 11.1 fremgår controllerens inputværdier som blå linjer og output som røde linjer.

Sekundærsiden består af tapstedet og en cirkulationspumpe, hvor cirkulationspumpen er indstillet til en fast flowværdi i overensstemmelse med pumpeindstillingen på Aalborgkollegiet. For tapstedet er der anvendt et kunstigt forbrugsprofil, fremstillet på baggrund af måledata fra Aalborgkollegiet, hvilket er beskrevet i dette kapitel.

Inputværdierne til alle delelementerne for den simplificerede Polysun-model, vist på figur 11.1, er beskrevet i Appendiks K.

11.1.1 Betydning af simplificeringen

Simplificeringen af Polysun-modellen for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, hvor alle tapsteder reduceres til ét tapsted, medfører en afvigelse fra de tilsvarende værdier bestemt ud fra måledataene. Denne afvigelse skyldes, at simplificeringen påvirker følgende parametre:

- Rørtab
- Fjernvarmeforbrug
- Eftervisning af temperaturudvikling for enkeltstående tapsteder

For at simplificere Polysun-modellen for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, er systemets totale rørlængde reduceret, så placeringen af Polysun-modellens ene tapsted svarer til det midterste tapsted i bygningen. Reduktionen af Polysun-modellens rørlængder medfører, at rørtabet afviger fra de reelle rørtab på Aalborgkollegiet. Da Polysun-modellen blot indeholder ét tapsted, er tapninger, der foretages i samme tidsrum, sammensat til én tapning. Sammensætningen af tapningerne reducerer det simulerede rørtab i koblingsrørene, idet der foretages flere tapninger ved samme koblingsrør. Derudover medvirker reduktionen af tapsteder til en væsentligt reduceret rørlængde for koblingsrørene.

Fjernvarmeforbruget påvirkes direkte af rørtabets størrelse, da veksleren skal kompensere for rørtabet ved at overføre mere energi. Grundet det reducerede rørtab, medfører simplificeringen et reduceret fjernvarmeforbrug, sammenlignet med Aalborgkollegiets faktiske fjernvarmeforbrug til varmt brugsvandssystemet.

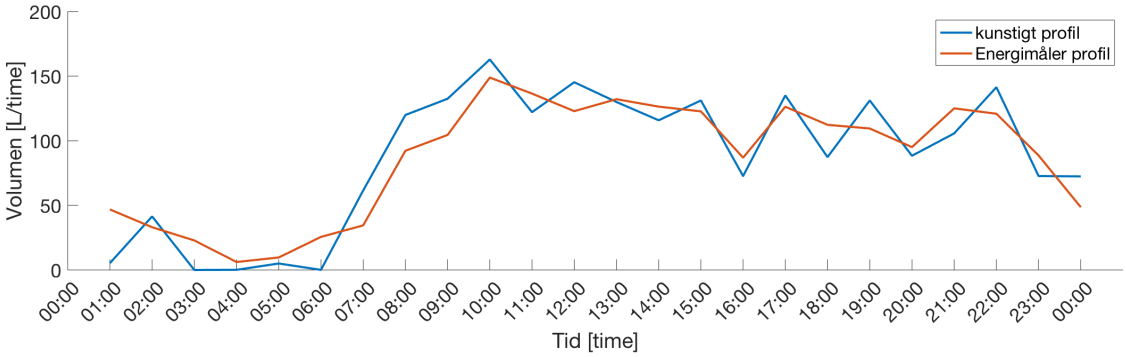
Sammensætningen af alle Aalborgkollegiet 108 tapsteder påvirker ligeledes temperaturen af det varme brugsvand på tapstedet. I henhold til den statistiske analyse i kapitel 7, varierer varmt brugsvandstemperaturen afhængigt af tapstedets placering. Variationen i varmt brugsvandstemperaturer ved tapsteder skyldes en kombination af forskellige faktorer såsom tappevarighed, tappetidspunkt og ventetid for det pågældende tapsted. Grundet den nødvendige simplificering af Polysun-modellen, kan de varierende varmt brugsvandstemperaturer dog ikke eftervises for de enkelte tapsteder, hvorfor det ligeledes ikke er muligt at fastsætte ventetiden.

11.2 Kunstige forbrugsprofiler til simulering

For at simulere et forbrugsmønster svarende til Aalborgkollegiets, er der anvendt måledata fra Brunata energimålere og Huba flowmålere til fremstilling af kunstige forbrugsprofiler for varmt brugsvand. De anvendte måledata er fra måleperiode 2, der strækker sig fra den 13/3 - 24/3-2020, hvor Danmark var under Coronanedlukning, hvorfor de anvendte måledata ikke er repræsentative for Aalborgkollegiets typiske forbrugsmønstre. I det følgende præsenteres forbrugsprofiler for et døgn, hvilke antages af være repræsentative for et helt år, hvorfor profilet ganges op til et årsprofil.

11.2.1 Varmt brugsvandsprofiler

Kunstige profiler, der skal repræsentere Aalborgkollegiets daglige varmtvandsforbrug, er fremstillet ved anvendelse af det totale varmtvandsforbrug samt forbrugsmønstrene og varighederne præsenteret i kapitel 6.2. Her blev det fundet, at Aalborgkollegiet anvender 41,56 L/pers./døgn i måleperiode 2, hvorfor de kunstige forbrugsprofiler til Polysun-modellen er fremstillet til overholdelse af dette. På figur 11.2 ses det gennemsnitlige profil for fordeling af varmt brugsvand for Aalborgkollegiet målt med Brunata energimålerne samt et samlet profil for de kunstige profiler.



Figur 11.2. Fordeling af det gennemsnitlige varmt brugsvandsforbrug ud fra måledata for måleperiode 2 for Brunata energimålerne og det kunstige profil.

Fordelingen af det kunstige profil, vist på figur 11.2, er som udgangspunkt bestemt ud fra måledata for de udvalgte tapsteder. Dog har det været nødvendigt at fordele brusebadene mere, end hvad måledataene for de udvalgte brusere underbygger, for at opnå overensstemmelse med Aalborgkollegiets gennemsnitlige forbrugsprofil på timebasis for måleperiode 2. Dette skyldes, at brusebadene har de største volumenforbrug pr. tapning grundet deres varighed.

Tabel 11.1 viser en sammenligning af det totale varmtvandsforbrug pr. person bestemt ud fra henholdsvis gennemsnitlige Brunata energimålerdata for måleperiode 2 og de kunstige profiler.

Profil	Forbrug [L/pers./døgn]
Kunstigt	41,60
Energimåler	41,57

Tabel 11.1. Varmtvandsforbrug for henholdsvis gennemsnitlige Brunata energimålerdata fra måleperiode 2 og det kunstige forbrugsprofil.

Varmtvandsforbruget på 41,60 L/pers./døgn for det kunstige profil er bestemt ud fra en antagelse om, at der for henholdsvis blok 1 og kælderen mangler en beboer pr. døgn, og at der for henholdsvis blok 2 og 3 mangler 3 personer pr. døgn. Dermed er varmtvandsforbruget for 8 beboere fjernet for hele Aalborgkollegiet. Fjernelsen af nogle beboeres varmtvandsforbrug blev foretaget på baggrund af besvarelser fra forbrugerundersøgelsen, præsenteret i Appendiks C. Her blev det observeret, at 5 ud af 16 beboere, svarende til 31 %, kun havde været hjemme mellem 0 - 5 dage i perioden d. 13/3 - 19/4-2020. Yderligere 4 personer havde kun været hjemme i 18 - 26 dage. Ud fra forbrugerundersøgelsen blev det derfor vurderet acceptabelt og retvisende, at fjerne 8 beboeres varmtvandsforbrug fra de kunstige profiler.

Håndvask og Brusebad

Profilet for håndvask og brusebad er fremstillet med den antagelse, at der altid er maksimalt flow, hvilket blev bestemt til henholdsvis 0,046 og 0,075 L/sek. under verificering af Huba flowmålerne, beskrevet i Appendiks E. Måledata for de udvalgte håndvaske og brusere viste stor spredning i tappevarigheden. Derfor antages det, at hvert af disse tapsteder svarer til henholdsvist den øvre og nedre grænse for gennemsnitlige tappevarigheder, for henholdsvis håndvaske og brusere. Tappevarigheden og volumen for gennemsnittet af måledataene for hvert pågældende tapsted kan ses i tabel 11.2 og 11.3 under betegnelsen "kort" og "lang" tappevolumen. På baggrund af måledataene, og med antagelsen om, at de udgør yderpunkterne for Aalborgkollegiets tappevarigheder og tappevolumener, er måledataene anvendt til at bestemme en middelværdi for tappevarigheden og tappevolumen, hvilket ligeledes kan ses i tabel 11.2 og 11.3 under betegnelsen "mellem".

Tappevarighed	Håndvask [sek.]	Bruser [sek.]	Spredning
Kort	24	104	Nedre grænse
Mellem	65	453	Middel
Lang	106	801	Øvre grænse

Tabel 11.2. Gennemsnitlige tappevarigheder for en håndvask og bruser for henholdsvis kort, mellem og lang tappevarighed.

Tappevolumen	Håndvask [L/pers./døgn]	Bruser [L/pers./døgn]	Spredning
Kort	4,45	7,80	Nedre grænse
Mellem	12,0	33,7	Middel
Lang	19,6	59,7	Øvre grænse

Tabel 11.3. Gennemsnitlige tappevolumener for en håndvask og bruser for henholdsvis kort, mellem og lang tappevarighed.

For bruseren er det valgt at have 1 bad/pers./døgn, hvorfor tappevolumenet er bestemt som én gennemsnitsværdi for alle døgn i måleperiode 2 og ikke blot døgn med tapninger. Derfor

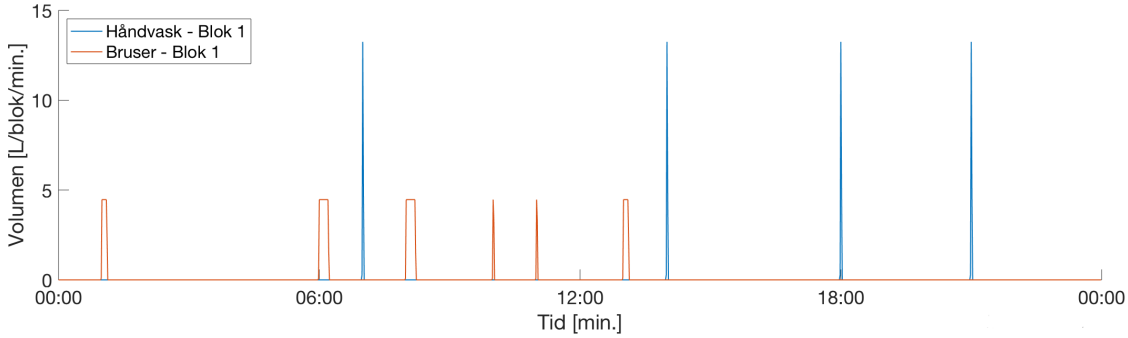
er der i profilet flere brusetapniger, men med kortere tappevolumen, sammenlignet med måledataene. Dette er valgt, da det ud fra forbrugerundersøgelsen, præsenteret i kapitel C, blev set af 50 % af de adspurgte bader hver dag.

De tre forskellige tappevarigheder for henholdsvis håndvaske og brusebade er, så vidt muligt, fordelt ligeligt på beboerne for de respektive blokke. Fordelingen for hele Aalborgkollegiet kan ses i tabel 11.4.

Blok**Tappevolumen**	**Kort [stk.]**	**Mellem [stk.]**	**Lang [stk.]**
Blok 1	2	2	2
Blok 2.1	3	2	3
Blok 2.2	3	1	3
Blok 3.1	3	2	3
Blok 3.2	3	1	3
Kælder	2	0	2

Tabel 11.4. Fordeling af beboere med de tre forskellige tappemønstre, for de forskellige gange på Aalborgkollegiet.

Figur 11.3 viser et kunstigt forbrugsprofil for henholdsvis håndvaske og brusere med udgangspunkt i værdierne fra tabel 11.3. Figuren viser profilet for blok 1, hvor 6 ud af 7 personer antages at være hjemme.



Figur 11.3. Kunstigt profil for henholdsvis håndvask og bruser for blok 1.

I henhold til medianen for antal håndvasktapninger pr. døgn i den statistiske analyse i kapitel 7, er det antaget, at den samlede tappevolumen for håndvasktapningerne i tabel 11.3, er fordelt på 4 tapninger pr. døgn, hvilket er vist på figur 11.3. Tappetidspunkterne for håndvaskene er henholdsvis kl. 7:00, 14:00, 18:00 og 22:00, og er bestemt ud fra den statistiske analyse af hyppighed. Tappetidspunkterne er antaget at være ens for alle beboere, hvorfor figur 11.3 viser de summerede værdier for alle 6 beboere i blok 1. Tappetidspunkterne er bestemt ud fra, hvornår der hyppigst forekommer håndvasktapninger, hvilket er undersøgt ved benyttelse af statistisk analyse i kapitel 7.

Brusebadene er, som tidligere nævnt, fordelt mere tilfældigt, for at opnå overensstemmelse mellem det samlede, kunstige forbrugsprofil og Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug, præsenteret i figur 11.2. Hver stigning for brusere på figur 11.3 illustrerer et brusebad, hvor tappevolumen ses at nå samme niveau, men med varierende tappevarighed.

Køkken

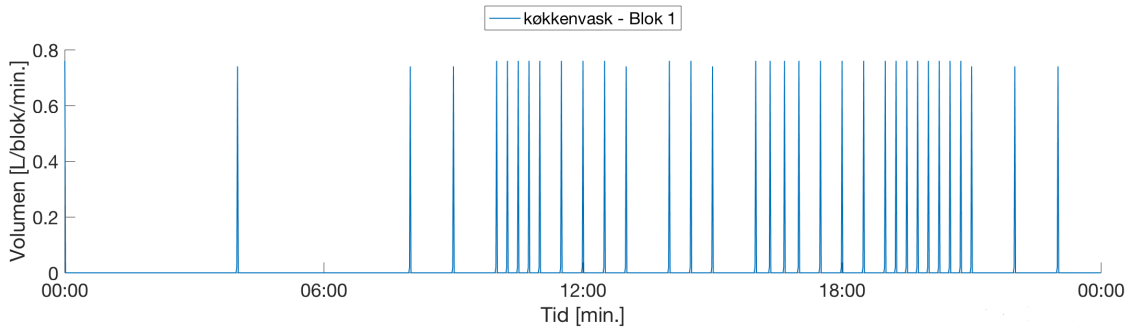
Ud fra en undersøgelse omhandlende hvor hyppigt det maksimale flow, målt ved verificeringen, indtræffer, nævnt i kapitel 6.3, er det observeret, at der kun er registreret maksimale flows for en begrænset del af tapningerne. Det maksimale flow, der er benyttet i formel (11.1), er derfor reduceret ud fra den procentandel, gennemsnitsflowet udgør af den reelle maksimale måleværdi i måleperioden for Huba flowmåleren.

$$\text{Volumen[L]} = \text{Varighed[sek.]} \cdot \text{Flow[L/sek.]} \tag{11.1}$$

Reduktionen er henholdsvis 67 og 88 % for de 2 målte køkkenvaske.

En gennemsnitsværdi for de to Huba flowmålere, placeret ved køkkenvaskene, er anvendt til at bestemme varmtvandsforbruget. Det gennemsnitlige varmtvandsforbrug er bestemt til 4,35 L/pers./døgn. Den procentvise fordeling af varmtvandsforbruget er bestemt for hver time, ud fra hyppigheden af, hvor mange tapninger der startes i den pågældende time, i henhold til statistisk analyse i kapitel 7 på side 61. Det gennemsnitlige antal tapninger, foretaget for de to køkkenvaske, er 34 tapninger pr. døgn, som er fordelt ud på timer med tapninger i overensstemmelse med de fundne hyppigheder. Hvis der forekommer flere tapninger for en time, er disse fordelt jævnt over timen.

Tappeprofilet for en køkkenvask, placeret i blok 1, har en fordeling som vist på figur 11.4.

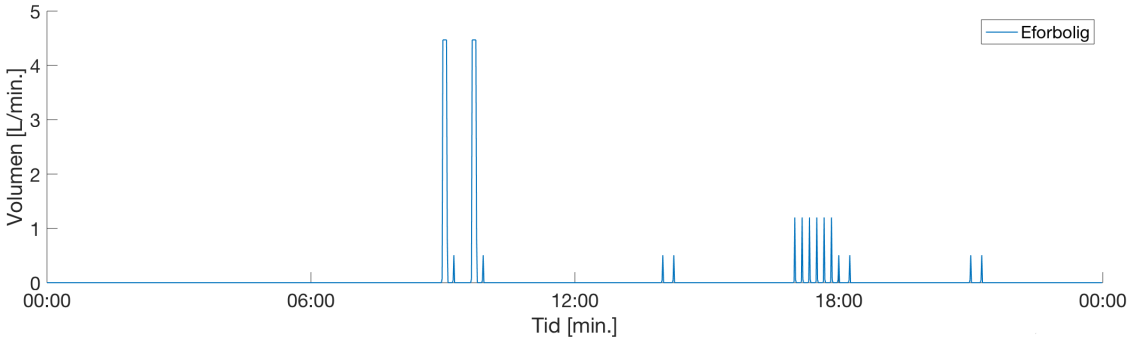


Figur 11.4. Kunstigt profil for køkkenvasken i blok 1.

Det antages at der, uafhængig af antallet af beboere pr. blok, foretages samme antal tapninger pr. døgn. Derfor er værdierne, vist i figur 11.4, en summeret tappevolumen pr. tapning pr. blok.

Eforbolig

Grundet manglende måledata for eforboligen, er varmt vandsforbruget her antaget at svare til 67,5 L/døgn, for boligens 2 bebore. Dette er fundet med udgangspunkt i anvisninger fra [Aggerholm, 2018], hvor der for boliger maksimalt er et varmtvandsforbrug på 60 m^3/år pr. bolig, svarende til 4 personer, hvorfor denne er halveret. En ydeligere reduktion på 15 L/døgn har dog været nødvendigt for at opnå et samlet varmtvandsforbrug for de kunstige profiler, som stemmer overens med måledata fra Aalborgkollegiet. Det samlede profil for eforboligen kan ses i figur 11.5.



Figur 11.5. Kunstigt profil for eforboligens samlede forbrug.

Den procentvise fordeling af varmtvandsforbruget på 67,5 L/døgn, til henholdsvis køkken, bruser og håndvask, er bestemt ud fra [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019], som fandt følgende fordeling for en typisk familie, der går i bad om morgenen og laver aftensmad derhjemme:

- Køkken: 9,24 %
- Håndvask: 5,08 %
- Brusebad: 85,67 %

Ud fra ovenstående procentmæssige fordeling, er den samlede tappevolumen fordelt på tidspunkter med størst hyppighed for den pågældende type tapning. Ligesom for kollegieværelserne, har det her været nødvendigt at tilpasse tidspunkterne for brusebadene, for at sikre overensstemmelse med måledataene for Aalborgkollegiets samlede forbrugsprofil pr. time ikke overstiger det målt med energimålerne.

11.3 Verificering

Dette afsnit beskriver den foretagede verificering af den simplificerede Polysun-model af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, på baggrund af de tilgængelige måledata. Formålet med verificeringen er, at sikre overensstemmelse mellem de faktiske forhold på Aalborgkollegiet og de simulerede forhold i en Polysun-model, som skal fungere som reference ved sammenligning med simulerede optimeringsforslag med forskellige vekslere. Derved øges sandsynligheden for, at eventuelle forbedringer, påvist med simuleringer, ligeledes vil have samme effekt, hvis de overføres til virkeligheden.

Til verificeringen er der anvendt måledata fra Aalborgkollegiet, med fokus på temperaturer og fjernvarmeforbrug relateret til varmt brugsvandsproduktionen. Disse verificeringskriterier er valgt, da de alle relaterer direkte til Aalborgkollegiets veksler, som skal optimeres i de efterfølgende simuleringer. Verificeringen er udført ved at anvende den beskrevne, simplificerede Polysun-model med dertilhørende inputværdier, beskrevet i Appendiks K, samt de kunstige forbrugsprofiler, beskrevet i det forudgående afsnit. Efterfølgende er der foretaget gentagne simuleringer, hvor der gradvist er justeret på rørisoleringen for de forskellige rørstrækninger, indtil der er opnået overensstemmelse mellem måledataene og simuleringsresultaterne.

Tabel 11.5 viser verificeringskriterier, fastlagt ud fra måledata, samt resultaterne for reference-modellen, bestemt ved simulering af de tilnærmede, aktuelle forhold på Aalborgkollegiet.

Verificeringsparametre	Verificeringskriterier	Simulering
Fjernvarme, fremløbstemperatur	70,8 °C	70,7 °C
Fjernvarme, returløbstemperatur	54,9 °C	55,7 °C
Fjernvarmeforbrug	46 892 kWh	44 306 kWh
Varmt brugsvandstemperatur fra veksler	48,8 °C	48,1 °C
Varmt brugsvandstemperatur ved tapsted	46,5 °C	46,6 °C
Cirkulationstemperatur til veksler	47,1 °C	47,1 °C

Tabel 11.5. Verificeringskriterier bestemt ud fra måledata og simulerede Polysun-værdier ved simulering af den simplificerede reference-model.

Som det fremgår af tabel 11.5, er der generelt god overensstemmelse mellem verificeringskriterierne og resultaterne for den simulerede reference-model. Den gode overensstemmelse ses særligt ved varmt brugsvandstemperaturen ved tapsted samt cirkulationstemperaturen til veksleren, hvor der er en maksimal afvigelse på 0,1 °C. Den største afvigelse mellem verificeringskriterierne og reference-modellen forekommer ved fjernvarmeforbruget, hvor der er en afvigelse på ca. 4,26 %, samt ved fjernvarmens returløbstemperatur og varmt brugsvandstemperaturen fra veksleren, som begge afviger med ca. ±1,5 %. De omtalte afvigelser er vurderet til at skyldes måleusikkerhed i måledataene, som er anvendt til bestemmelse af vekslerens overførselstal, beskrevet i Appendiks K, samt usikkerheder grundet behovet for simplificering af modellen.

Eftersom at den største afvigelse mellem verificeringsværdierne og den simulerede referencemodel er 4,26 %, er det vurderet, at der er god overensstemmelse mellem reference-modellen og de reelle forhold på Aalborgkollegiet, i forhold til at simulere optimeringsforslag med vekslere.

11.4 Optimeringsforslag vedrørende veksler

I kapitel 9 vedrørende effektivitet blev det påvist, at Aalborgkollegiets veksler har en dårlig fjernvarmeafkøling, hvilket er vurderet til enten at skyldes en mulig tilkalkning eller et lavt overførselstal. På baggrund af måledata er det desuden observeret, at varmt brugsvandstemperaturen fra veksleren aldrig kommer over 50 °C, hvilket medfører en øget risiko for legionella. [Dansk Standard, 2009]

På baggrund af ovenstående konklusioner, er der derfor foretaget simuleringer med mulige, nye vekslere, med henblik på at forbedre fjernvarmeudnyttelsen for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem. For at sikre øget komfort og legionellabekæmpelse, er simuleringerne udført med henblik på at opnå en varmt brugsvandstemperatur på minimum 55 °C ved tapsteder. For at fremtidssikre de simulerede optimeringsforslag, er simuleringerne desuden foretaget med en fremløbstemperatur for fjernvarmen på 60 °C. For at gøre den eksisterende veksler sammenlignelig med de mulige, nye vekslere, er de alle simuleret med samme fremløbstemperatur på 60 °C og med et temperatursetpunkt på 55 °C ved tapstedet.

Der er foretaget en sammenligning mellem den eksisterende veksler, samt tre forskellige vekslere fra fabrikanten Buderus Heiztechnik GmbH, hvor vekslerne er sammenlignet på baggrund af de parametre, som fremgår af tabel 11.6. Den eneste forskel på de simulerede vekslere er overførselstallene, hvor et højt "xxH"-tal tilsvarer et højt overførselstal. Dertil er der minimale forskelle på vekslernes ydre dimensioner. Værdierne i tabel 11.6 er bestemt ved anvendelse af den simplificerede Polysun-model. Den høje returtemperatur, som ses for alle vekslere, skyldes cirkulationssystemet, da det er en gennemsnitsværdi for hele det simulerede år.

Simuleringsparametre	Eksisterende	CB 52-30H	CB 52-40H	CB 52-50H
Fjernvarme forbrug [kWh/år]	41373	40937	42190	43171
Overførselstal [W/K]	348	3000	4500	6500
Fjernvarme, returløbstemperatur [°C]	53,7	54,8	54,8	54,7
Varmt brugsvandstemperatur fra veksler [°C]	45,7	57,8	58,2	58,6
Varmt brugsvandstemperatur ved tapsted [°C]	44,3	52,4	53,8	54,8
Tilgængelighed af varmt brugsvand [%]	76,1	93,9	96,6	98,3

Tabel 11.6. Resultater for de fire veksler, simuleret i Polysun. Rødt tal: Behov for varmt brugsvand er ikke opfyldt.

Af tabel 11.6 kan det ses, at de forskellige vekslere opretholder forskellige varmt brugsvandstemperaturer ved tapstedet, hvilket ligeledes afspejles i tilgængeligheden af, hvornår der kan opnås en temperatur på setpunktet, 55 °C. Derudover fremgår det, at den eksisterende veksler ikke er i stand til at opretholde det ønskede temperatursetpunkt ved tapstedet, i en acceptabel grad, ved en fjernvarmefremløbstemperatur på 60 °C. På baggrund af denne observation, kan det konkluderes, at den eksisterende veksler ikke vil være tilstrækkelig til dækning af Aalborgkollegiets behov for varmt brugsvand, hvis der skal foretages legionellasikring, samt ved overgangen til næste generationsfjernvarme, med en fremløbstemperatur på 60 °C. På den baggrund opfordres der til at udskifte den eksisterende veksler til en nyere model med et bedre overførselstal.

Ved sammenligning af de tre, nye vekslere, fremgår det, at der er en sammenhæng mellem et øget overførselstal og en øget tilgængelighed af varmt brugsvand, samt en højere, opretholdt temperatur ved tapstedet. Dertil overholder alle tre vekslere de forudsatte krav til legionellasikring. På den baggrund kan det konkluderes, at alle vekslere vil kunne opfylde Aalborgkollegiets varmtvandsbehov ved en fremløbstemperatur for fjernvarmen på 60 °C, hvormed de alle kan anvendes. Hvilken veksler, der bedst opfylder de ønskede krav, afhænger af, hvilken tilgængelighed af varmt brugsvand, der anses for at være tilstrækkelig.

Diskussion 12

Tidligere danske studier har påvist betydelige afvigelser fra standardværdien på $250\,\mathrm{L/m^2/år}$, som anvendes til estimering af varmtvandsforbrug i energirammeberegninger for boliger. Dette stemmer overens med måleresultaterne for Aalborgkollegiet, hvor det målte varmtvandsforbrug var væsentligt højere end standardværdien. På baggrund af måledataene fra Aalborgkollegiet, vurderes det, at standardværdien på $250\,\mathrm{L/m^2/år}$ ikke er repræsentativ for boliger af typen kollegium. Afvigelsen skyldes formentligt en høj beboertæthed, som er typisk for denne boligtype.

Der er observeret en overensstemmelse mellem Aalborgkollegiets typiske varmtvandsforbrug i [L/pers./døgn] og den øvrige litteratur for boligejendomme. Dog ligger Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug en smule højere, hvilket er vurderet til at kunne skyldes tre parametre, herunder nationale forskelle, Aalborgkollegiets metode for afregning af varmt brugsvand, samt sæsonvariationer. For at kunne foretage en generalisering af måleresultaterne for Aalborgkollegiet, samt be- eller afkræfte indflydelsen af sæsonvariationer, er det nødvendigt at foretage målinger i minimum et år. Dertil vil det være nødvendigt, at foretage nye målinger i perioden 13/3 - 19/4-2020, idet der blev påvist en signifikant reduktion af varmtvandsforbruget, som følge af en national nedlukning grundet en pandemi.

En sammenligning af Aalborgkollegiets typiske forbrugsprofiler og profiler beskrevet i litteraturen, blev der påvist en overensstemmelse i morgentimerne, idet der forekommer en morgenspidsbelastning i alle de undersøgte profiler. Dog blev der påvist en afvigelse mellem Aalborgkollegiet og den øvrige litteratur, idet Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug er væsentligt mere jævntfordelt i dag- og aftentimerne, sammenlignet med de udvalgte boligtyper.

Måleresultaterne for Aalborgkollegiets cirkulationssystem stemte overens med de typiske cirkulationstab for boligejendomme, beskrevet i studiet [Bøhm, 2009]. Dog afveg den målte, gennemsnitlige fjernvarmeafkøling fra studiet, da gennemsnitsværdierne var under intervallerne fra boligejendomme, og i stedet stemmer overens med typiske afkølinger for erhvervsejendommme. Grundet bygningens alder og store spredning i forbrugsmønstre, er der behov for flere målinger af tilsvarende bygninger og beboersammensætninger, til at kunne sammenligne med.

Ud fra en undersøgelse af simuleringsprogrammet Polysun, er det vurderet, at Polysun ikke er egnet til simuleringer af varmt brugsvandssystemer, hvor der er behov for at foretage detaljerede inddelinger af tapsteder og dertilhørende cirkulation.

Konklusion 13

Med henblik på at opnå indsigt i forbrugsmønstre for kollegieboliger, er der foretaget målinger for varmt brugsvandssystemet på et dansk kollegium i Aalborg. Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug har, i dette projekt, været påvirket af en national nedlukning af offentlige institutioner og universiteter, grundet en pandemi med virussen SARS-CoV-2. Denne nedlukning er omtalt som "Coronanedlukningen".

Før Coronanedlukningen formodes det, at Aalborgkollegiets beboere havde et typisk forbrugsmønster, hvor det gennemsnitlige varmtvandsforbrug blev bestemt til 47,1 L/per./døgn. For det typiske hverdagsprofil blev der observeret en tydelig morgenspidsbelastning i tidsrummet 07:00 - 09:00 efterfulgt af et jævntfordelt forbrug i resten af dag- og aftentimerne. For det typiske weekendprofil blev der ikke observeret nogen spidsbelastninger, men i stedet et jævntfordelt forbrug i størstedelen af døgnet.

Under Coronanedlukningen rejste nogle af Aalborgkollegiets beboere væk, hvilket medførte, at Aalborgkollegiets gennemsnitlige varmtvandsforbrug faldt til 42,1 L/pers./døgn. Derudover overgik mange beboere til at arbejde eller studere hjemmefra, hvilket bevirkede, at morgenspidsbelastningen for det gennemsnitlige hverdagsprofil udeblev. Hverdagsprofilet fik istedet samme karakter som weekendprofilet, med et jævntfordelt varmtvandsforbrug frem til kl. 23:00. På den baggrund anses det gennemsnitlige hverdagsprofil under Coronanedlukningen for at være atypisk. Til sammenligning blev der kun observeret en minimal afvigelse mellem de to gennemsnitlige weekendprofiler. Dermed kan det konkluderes, at Coronanedlukningen kun har haft en betydelig indvirkning på Aalborgkollegiets hverdagprofil.

På baggrund af tappeprofiler fra seks udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, blev der påvist en stor spredning i måledataene, hvilket underbygger, at Aalborgkollegiet er en beboelsesejendom med mange beboere, hvor der forekommer forskellige forbrugsmønstre, jævnfør Aalborgkollegiets jævntfordelte varmtvandsforbrug. Yderligere viste en statiske analyse stor spredning i antal tapninger pr. døgn, hvoraf der dog forekommer flest ved køkkenvaskene. For køkkenvaske bliver tapningerne generelt foretaget med en jævn fordeling i dag- og aftentimerne, hvilket ligeledes afspejles af en generelt kort tidsperiode mellem hver tapning. Ved analyse af ventetid blev det påvist, at en betydelig del af de foretagede tapninger ikke opnår den ønskede temperatur i henhold til [Dansk Standard, 2009], og at kun et begrænset antal tapninger overholder tommelfingerreglen på maksimalt 10 sekunders ventetid. Der forekommer stor variation i ventetid afhængigt af tapstedets placering og tappetidspunkter, hvilket indikerer, at cirkulationssystemet ikke fungerer optimalt.

Ved en sammenligning med den udvalgte litteratur, kan det konkluderes, at Aalborgkolle-

giets typiske, gennemsnitlige varmtvandsforbrug i [L/pers./døgn] tilnærmelsesvist stemmer overens med de gennemsnitlige varmtvandsforbrug for boligejendomme, dog er Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug en smule højere. Den observerede afvigelse mellem måleresultaterne og litteraturen, er vurderet til at kunne skyldes nationale forskelle, Aalborgkollegiets afregningsmetode for varmtvandsforbrug, samt påvirkning af sæsonvariationer. Derudover er der foretaget en sammenligning mellem Aalborgkollegiets typiske, gennemsnitlige forbrugsprofiler og gennemsnitlige forbrugsprofiler for henholdsvis boligejendomme og et enfamiliehus. Sammenligningen viste en stor afvigelse mellem Aalborgkollegiets typiske hverdagsprofil og de undersøgte boligtyper, idet der for Aalborgkollegiet forekommer et jævntfordelt forbrug i størstedelen af dag- og aftentimerne. Den eneste overensstemmelse mellem hverdagsprofilerne er, at de alle har en morgenspidsbelastning i nogenlunde samme tidsrum. På baggrund af ovenstående kan det derfor konkluderes, at varmtvandsforbruget for et kollegium som Aalborgkollegiet, tilnærmelsesvist kan sidestilles med en boligejendom i forhold til varmtvandsforbruget i [L/pers./døgn], dog med den undtagelse af forbrugsprofilet for typiske hverdage er væsentligt mere jævntfordelt.

Udover ovennævnte, er der foretaget en sammenligning af Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug på 419,4 $\mathrm{L/m^2/år}$ og standardværdien på 250 $\mathrm{L/m^2/år}$ anvendt til energirammeberegninger for boliger. På baggrund af den væsentlige afvigelse mellem Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug og standardværdien for boliger, kan det konkluderes, at standardværdien ikke er repræsentativ for et kollegium som Aalborgkollegiet. Afvigelsen skyldes formodentligt Aalborgkollegiets høje beboertæthed, som er typisk for boligtypen kollegium.

På baggrund af måledata for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem er det observeret, at cirkulationssystemet har en væsentlig indflydelse på varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug. Cirkulationstabet medfører, at der altid er et minimumforbrug af fjernvarme på 2-3 L/min, svarende til ca. 127 L/time. På baggrund af observerede variationer i cirkulationsflows, henholdsvis under og udenfor perioder med varmtvandsforbrug, er det estimeret, at mellem 28,19 - 49,28 % af varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug går til dækning af cirkulationstab. Ud fra visuelle inspektioner og måledata, er det vurderet, at Aalborgkollegiets cirkulationssystem hverken er balanceret eller reguleret, hvilket bevirker, at der kun opnås en ubesværende ventetid i en begrænset del af bygningen, samt at den gennemsnitlige fjernvarmeafkøling er meget lav, svarende til 15,38 - 16,08 °C. Til optimering af Aalborgkollegiets cirkulationssystem, foreslås det at balancere systemet for at sikre ubesværende ventetid for alle bygningens beboere.

På baggrund af måleresultaterne blev den gennemsnitlige effektivitet for hele Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem bestemt til at ligge mellem 33,56 - 36,67 % i den samlede måleperiode. Til sammenligning blev effektiviteten for Aalborgkollegiets varmt brugsvandsproduktion, eksklusiv cirkulation, estimeret til at svinge mellem 44,56 - 66,22 %, hvormed det kan konkluderes, at Aalborgkollegiets cirkulationssystem har en stor påvirkning på effektiviteten. En analyse af forskellige parametres påvirkning på effektiviteten, for hele Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem, viste, at varmtvandsforbruget har den mest signifikante indflydelse. Varmtvandsforbrugets påvirkning på effektiviteten skyldes en kombination af, at varmt brugsvandstapninger medfører et reduceret cirkulationsflow og at der opnås en større fjernvarmeafkøling ved produktion af nyt varmt brugsvand, fremfor ved recirkulering.

På baggrund af en analyse af energiforbrug og -tab i forbindelse med seks foretagede tapninger, blev der påvist en sammenhæng mellem et øget vekslertab og længerevarende, sammenhængende tappevarigheder, hvori veksleren skal producere varmt brugsvand, grundet at vekslerens varmeakkumulation opbruges efter en begrænset tidsperiode, hvorefter vekslerens fjernvarmeforbrug øges. Derudover blev der påvist en stor forskel mellem ventetider for to forskellige køkkener. En sammenligning af rørtabene for de individuelle køkkener viste, at længere tappevarigheder generelt fører til lavere andelsmæssige rørtab. Sammenhængen mellem tappevarighed og rørtab skyldes, at størstedelen af rørtabene forekommer i starten af tapningerne, hvor tapstedets koblingsrør opvarmes.

Udover ovenstående blev der foretaget simuleringer med simuleringsprogrammet Polysun, hvor forskellige vekslere blev undersøgt. På baggrund af de foretagede simuleringer kan det konkluderes, at Aalborgkollegiets eksisterende veksler ikke vil være tilstrækkelig ved overgangen til næste generations fjervarme med en fremløbstemperatur på 60 °C. I forbindelse med simuleringerne blev tekniske begrænsninger observeret, hvilket bevirker, at det pågældende simuleringsprogram ikke er egnet til simulering af detaljerede varmt brugsvandssystemer med mange tapsteder.

Litteratur

Aggerholm, **2018**. Søren Aggerholm. *SBi-Anvisning 213 - Bygningers Energibehov*, 2018.

Anna Marszal-Pomianowska et al., **2019**. Anna Marszal-Pomianowska et al. *High resolution measuring system for domestic hot water sonsumption. Development and fiels test.* 2019.

Bøhm, **2012**. Benny 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.* Elsevier, 2012.

Bøhm, **2009**. Schrøder F. Bergsøe N. C Bøhm, B. *Varmt brugsvand - Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger.* SBi 2009:10, 2009.

Brunata, **2006**. Brunata. *Technical Manual for HGQ and HGs-series - Volume, Flow and Energy Meters.* Brunata, 2006.

Bygningsreglementet, **2008**. Bygningsreglementet. *Bygningsreglementet 2008.* Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2008. URL `https://historisk.bygningsreglementet.dk/br07_02/0/42`.

Bygningsreglementet, **2010**. Bygningsreglementet. *Bygningsreglementet 2010.* Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2010. URL `https://historisk.bygningsreglementet.dk/br10_05/0/42`.

Bygningsreglementet, **2015**. Bygningsreglementet. *Bygningsreglementet 2015.* Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2015. URL `https://historisk.bygningsreglementet.dk`.

Bygningsreglementet, **2018**. Bygningsreglementet. *Bygningsreglementet 2018.* Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2018. URL `http://bygningsreglementet.dk`.

Castelo, **2019**. Jeremiah Castelo. *What is the Percentage of Drinkable Water on Earth?* 2019.

Dansk Standard, **2009**. Dansk Standard. *DS 439 Norm for vandinstallationer*, 2009.

DANVA, **2019**. Dansk Vand-og Spildevandsforening DANVA. *Vand I Tal*, 2019.

E. Fuentes, **2017**. J. Salom E. Fuentes, L. Arce. *A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis.* Elsevier, 2017.

Energistyrelsen, **2007**. Energistyrelsen. *Energistatistik 2007*, 2007.

Gregersen, **2019**. Kim Gregersen. *Hvor meget kan du spare med en sparebruser?* 2019.

Huba Control, **2019**. Huba Control. *Flow sensor type 236 for liquid media.* Huba Control, 2019.

Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen. Varmt brugsvand i parcelhuse. mathesis, Aalborg Universitet, 2019.

Kaiser Ahmed, **2015**. Jarek Kurnitski Kaiser Ahmed, Petri Pylsy. *Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings.* Elsevier, 2015.

Kaiser Ahmed, **2016**. Jarek Kurnitski Kaiser Ahmed, Petri Pylsy. *Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings.* Elsevier, 2016.

Peter Kaarup Olsen et. al., **April 2014**. Peter Kaarup Olsen et. al. *Guidelines for Low-Temperature District Heating.* Energistyrelsen, COWI A/S, Teknologisk Institut, Dansk Fjernvarme, Danmarks Tekniske Universitet, Danfoss, Logstor A/S, Høje Taastrup Fjernvarme a.m.b.a, AffaldVarme Aarhus, Boligforeningen Ringgården, Kamstrup A/S, og Ribe Jernindustri A/S, 2014. EUDP 2010-II projekt journal nr. 64010-0479.

Standard. *Dansk Standard.*

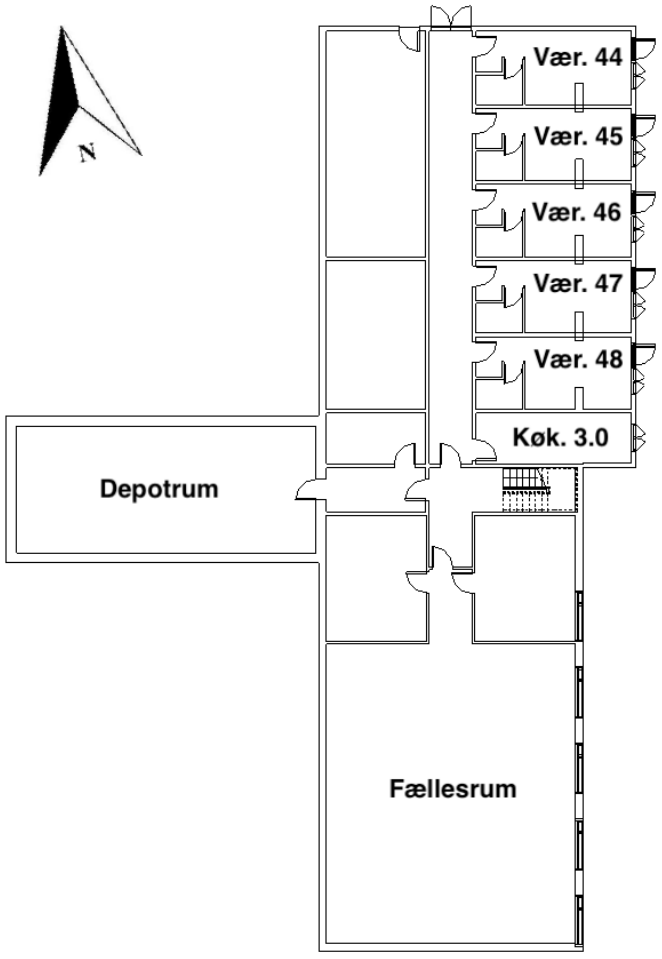
Toode, **2006**. Teet-Andrus Kõiv Alvar Toode. *Trends in domestic hot water consumption in Estonian apartment buildings.* 2006.

Casebygning og Måleplan A

I det følgende Appendiks vises en plantegning for Aalborgkollegiets kælder samt placeringen af temperatursensorer for en af de anvendte Brunata energimålere, placeret i teknikrummet.

A.0.1 Plantegning

Figur A.1 viser en plantegning for kælderen der er placeret i blok 3.

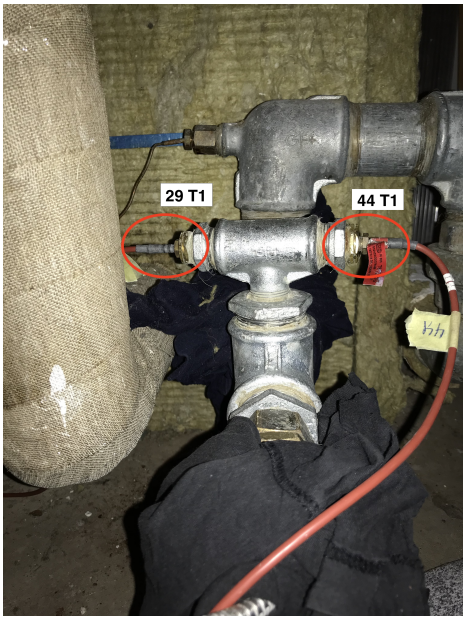


Figur A.1. Plantegning for kælderen placeret i blok 3.

A.0.2 Sensorplacering for varmt brugsvand

Grundet varmt brugsvandrørets udformning, er Brunata energimåler nr. 29 og 44's temperatursensorer, *29 T1* og *44 T1*, placeret i et T-stykke kort fra varmt brugsvandsrørets

tilslutning til veksleren, hvilket er vist på figur A.2 og A.3, henholdsvis uden og med rørisolering.



Figur A.2. T-stykke med de to varmt brugsvands temperaturer uden isolering

Figur A.3. T-stykke med de to varmt brugsvands temperaturer med isolering

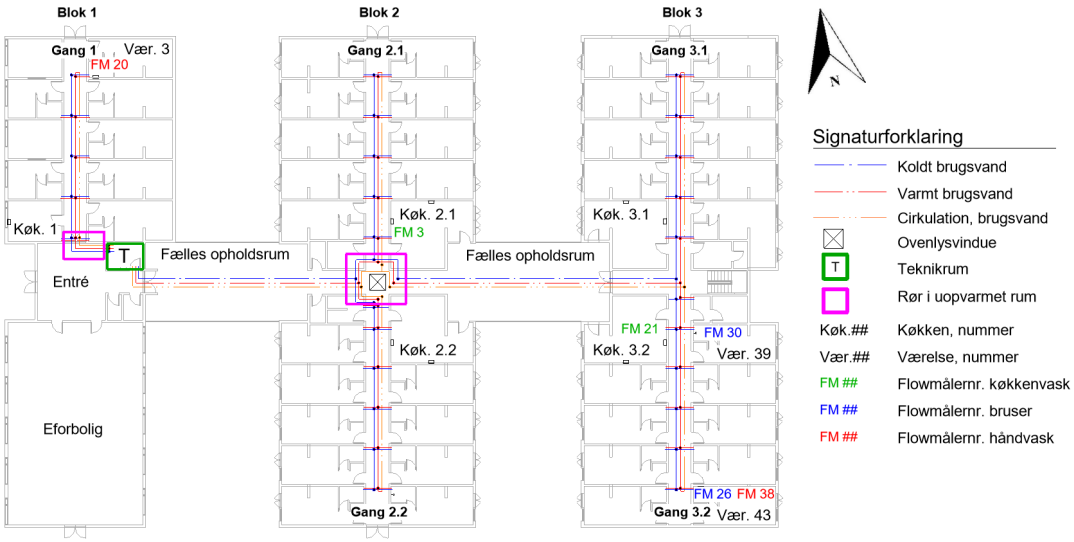
Principdiagram - Aalborgkollegiets brugsvandssystem

B

Forbrugerundersøgelse C

Dette appendiks redegør for en forbrugerundersøgelse, vis formål er at belyse Aalborgkollegiets beboeres overordnede syn på varmt brugsvandssystemet i perioden d. 13/3 - 19/4-2020. Denne periode er valgt med henblik på at undersøge, hvor mange beboere der har været hjemme, da der er observeret et fald i det samlede varmtvandsforbrug, beskrevet i kapitel 6. Informationen fra forbrugerundersøgelsen danner grundlag for de kunstige profiler, beskrevet i kapitel 11.

Forbrugerundersøgelsens fokus er beboernes subjektive oplevelse og bevidsthed angående hyppighed, varighed og ventetid i forbindelse med bad. Besvarelserne er sammenlignet med måledata fra de to udvalgte brusere, vist på figur C.1, med henblik på at vurdere, hvor repræsentative, de målte tappeprofiler er, i forhold til de øvrige beboere på Aalborgkollegiet.



Figur C.1. Oversigt over relevante rum og placering af flowmålerne angivet ud fra de tilsluttede Huba flowmålere.

Forbrugerundersøgelsen gav 16 besvarelser, hvilket svarer til 32 % af Aalborgkollegiet samlet antal beboere inklusiv eforboligen. Forbrugerundersøgelsen består af følgende 5 spørgsmål:

1. Hvor mange dage har du været hjemme på Aalborgkollegiet i perioden d. 13/3 - 19/4-2020?
2. Hvor ofte bader du typisk?
3. Hvor lang tid tager dine bade i gennemsnit?

4. Hvor lang tid går der oftest, fra du tænder for bruseren, til vandtemperaturen er acceptabel og badet kan påbegyndes?
5. Hvad er dit værelsesnummer? (valgfri)

Spørgsmålene fra 2 til 4 har indeholdt svarmuligheder, der præsenteres sammen med besvarelserne i det følgende.

Spørgsmål 5 var valgfrit for at tilbyde anonymitet til de beboere der ønskede dette, hvorfor 3 af besvarelserne ikke indeholder værelsesnummer.

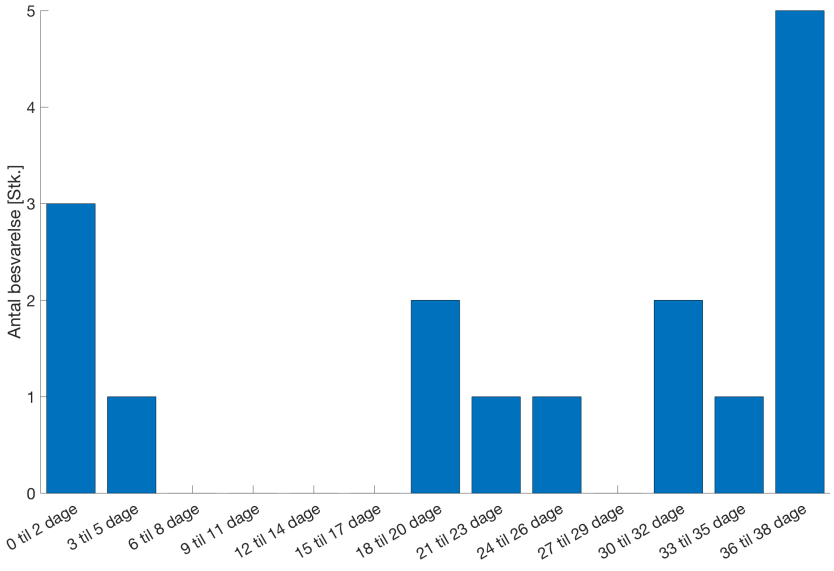
C.0.1 Analyse

Følgende afsnit redegør for besvarelserne for forbrugerundersøgelsens fire spørgsmål. Spørgsmål nr. 5, omhandlende værelsesnummer, er anvendt til at sammenholde måledata med besvarelserne.

Spørgsmål 1 - hvor mange beboer er hjemme

Antallet af beboere, som er hjemme på Aalborgkollegiet, har en stor indflydelse på Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug og dermed hvor retvisende, de beregnede forbrug i [L/person/døgn] er. Måleperioden består totalt set af 38 døgn, hvoraf 12 døgn er weekender, og 3 døgn er helligdage.

Figur C.2 viser, hvor mange døgn de adspurgte beboere har været hjemme i perioden 13/3 - 19/4-2020, svarende til måleperiode 2 og 3, hvor Aalborgkollegiets beboere er påvirket af Coronanedlukningen.



Figur C.2. Besvarelse på spørgsmål 1: Hvor mange dage har du været hjemme på Aalborgkollegiet i perioden d 13/3 - 19/4-2020?

I henhold til besvarelserne, vist på figur C.2, fremgår det, at besvarelserne overordnet falder inden for tre grupperinger, som vist i tabel C.1. Antagelsen om grupperingen for "Bortrejst i weekender og ferie" i tabel C.1, er foretaget på baggrund af en overensstemmelse mellem

antal weekend- og feriedage i perioden, samt grupperingen af besvarelser, som er hjemme på Aalborgkollegiet mellem 18-26 døgn, i henhold til figur C.2.

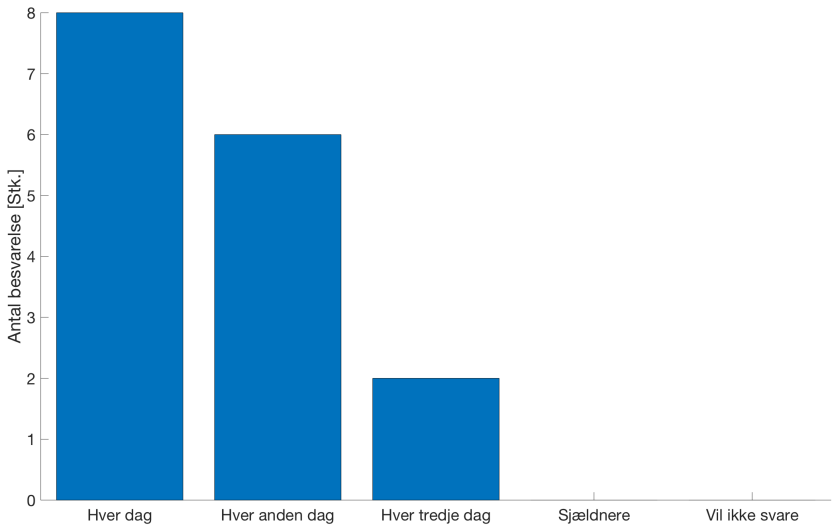
Antal døgn på Aalborgkollegiet	**Andel besvarelser [%]**	**Gruppering**
0 - 5	25	Primært bortrejst
18 - 26	25	Bortrejst i weekender og ferie
30 - 38	50	Sjældent bortrejst

Tabel C.1. Andel af besvarelser på spørgsmål 1: Hvor mange dage har du været hjemme på Aalborgkollegiet i perioden d 13/3 - 19/4-2020?

Grundet den tydelige gruppering i henhold til weekend- og feriedage, formodes det, at 75 % af de adspurgte er hjemme i hverdagene. På baggrund af, at så stor en gruppe af de afspurgte er hjemme, i hvad der svarer til antallet af hverdage, vurderes dette at være repræsentativt for de øvrige beboere på Aalborgkollegiet.

Spørgsmål 2 - Hyppighed

Formålet med følgende spørgsmål er at opnå øget indsigt i spredningen af måledataene for de to udvalgte brusere, vist på figur C.1. Derudover er måledataene og besvarelserne fra beboerne med de to udvalgte brusere sammenholdt, for at undersøge overensstemmelse. Figur C.3 viser fordelingen af besvarelser for, hvor ofte beboerne på Aalborgkollegiet bader.



Figur C.3. Besvarelse på spørgsmål 2: Hvor ofte bader du typisk?

Af figur C.3 fremgår det, at 50 % af de adspurgte bader dagligt og 37,5 % bader hver anden dag. Dette står i kontrast til de tappemønstre for brusere, der er målt med Huba flowmålerne. Resultaterne for måledataene og forbrugsundersøgelsen, for henholdsvis kollegieværelse 39 og 43, er vist i tabel C.2.

Placering	Måledata	Forbrugerundersøgelse	Antal døgn hjemme
værelse 39	Hver 3 - 5 dag	Hver tredje dag	37
værelse 43	Hver 2 - 3 dag	Hver anden dag	34

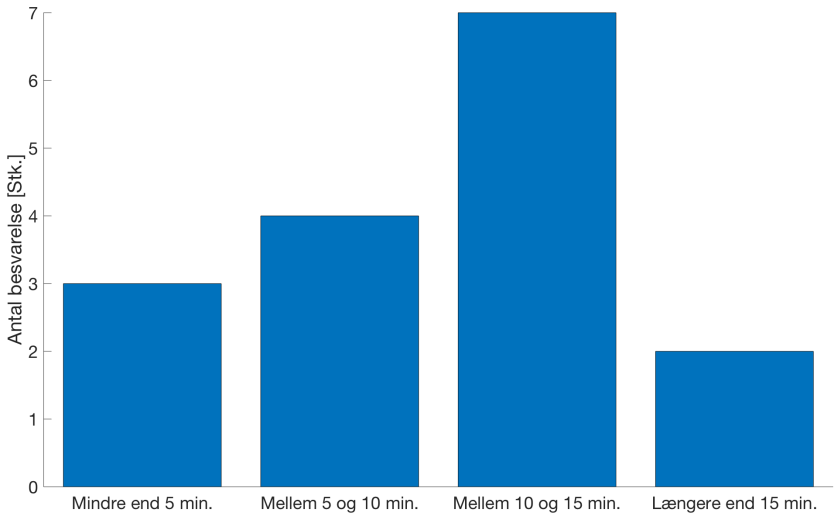
Tabel C.2. Sammenligning af hyppigheden for brusebadstapninger ud fra måledata og forbrugerundersøgelsen.

På baggrund af sammenligningen i tabel C.2 er det vurderet, at der er god overensstemmelse mellem besvarelserne og de målte hyppigheder, i forhold til forbrugerundersøgelsens svarmuligheder.

Spørgsmål 3 - Varighed

Som for spørgsmål 2 vedrørende hyppighed, er formålet med spørgsmål 3 at opnå øget indsigt i spredningen af måledataene for de to udvalgte brusere, vist på figur C.1. Ligeledes er måledataene og besvarelserne fra beboerne med de to udvalgte brusere sammenholdt, for at undersøge overensstemmelse. Det forventes, at det er de færreste personer, som registrerer eller er bevidste om deres præcise badevarighed, hvorfor det forventes, at besvarelserne i det følgende er påvirket af en vis usikkerhed.

Forbrugerundersøgelsen gav følgende besvarelser angående tappevarighed, som vist i figur C.4.



Figur C.4. Besvarelse på spørgsmål 3: Hvor lang tid tager dine bade i gennemsnit?

Det fremgår af figur C.4, at der er en stor spredning på beboernes selvopfattede badevarighed. Dog ses det, at størstedelen vurderer at have en badevarighed mellem 10-15 minutter.

Til vurdering af, hvor bevidste beboerne er omkring deres varmtvandsforbrug, samt til vurdering af, hvor repræsentative måledataene er, er der foretaget en sammenligning af måledata og besvarelserne fra beboerne på kollegieværelse 39 og 43, vist i tabel C.3.

Placering	Måledata	Forbrugerundersøgelse
Kollegieværelse 39	7 min.	5 - 10 min.
Kollegieværelse 43	32 min.	Længere end 15 min.

Tabel C.3. Sammenligning af varigheden for brusebadstapninger ud fra måledata og forbrugerundersøgelsen. Varigheden i henhold til måledataene er bestemt ud fra et gennemsnit af alle tapninger for hver flowmåler.

På baggrund af sammenligningen i tabel C.3 er det vurderet, at der er god overensstemmelse mellem de to beboeres måledata og besvarelser. Ved sammenligning af resultaterne for kollegieværelse 43, ses en væsentligt større varighed end den højeste mulige svarmulighed på over 15 minutter. Det kan dermed konkluderes, at inddelingen af svarmuligheder har været for grov, hvilket medfører en generel usikkerhed for besvarelserne, dog er usikkerheden størst for de to besvarelser på "Længere end 15 min." vist på figur C.4.

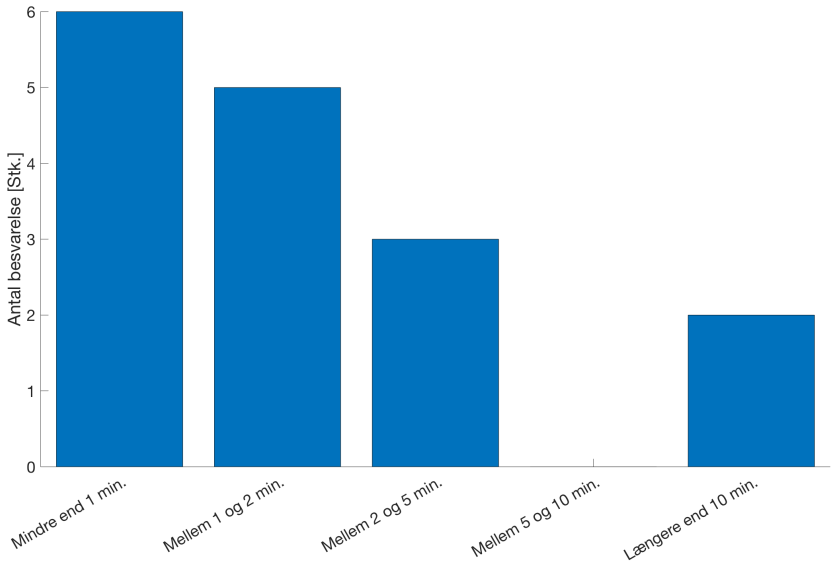
Ved sammenligning af de målte, gennemsnitlige badevarigheder, vist i tabel C.3 og besvarelserne på figur C.4, er det vurderet, at måledataene for kollegieværelse 43 repræsenterer et yderpunkt i forhold til den forventede spredning, som ikke afspejler den generelle badevarighed for beboerne på Aalborgkollegiet. Måledataene for kollegieværelse 39 har en større overensstemmelse med de øvrige besvarelser, det er dog ligeledes vurderet, at disse måledata ikke er repræsentative for Aalborgkollegiets beboeres generelle badevarighed. Ovenstående baserer på, at den gennemsnitlige, målte badevarighed for kollegieværelse 39, ligger under middel.

Spørgsmål 4 - Ventetid

Grundet den observerede variation i ventetid, i henhold til analysen af energitab i Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem i kapitel 10 på side 91 og statistisk analyse i kapitel 7 på side 61, er beboernes opfattelse af ventetiden for varmt brugsvand undersøgt i forbindelse med bade. Spørgsmålet om ventetid er specificeret i forhold til bade, da det forventes, at beboerne her venter med at benytte det varme brugsvand, indtil den ønskede varmt brugsvandstemperatur er opnået.

Det oprindelige formål var at undersøge mulige sammenhænge mellem ventetid og kollegieværelsernes placering, dog viste en sammenligning af måledataene og besvarelserne for kollegieværelse 43 en stor uoverensstemmelse, hvilket giver de øvrige besvarelser en stor usikkerhed.

Besvarelserne angående ventetid ved bade, fremgår af figur C.5. Svarmulighederne er præciseret på baggrund af måledata fra de udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet.



Figur C.5. Besvarelse på spørgsmål 4: Hvor lang tid går der oftest, fra du tænder for bruseren, til vandtemperaturen er acceptabel og badet kan påbegyndes?

Af figur C.5 fremgår det, at over halvdelen af beboerne oplever længere ventetid end 1 minut, hvilket underbygger observationerne om mulig tilstopning eller dårlig regulering af cirkulationssystemet, som beskrevet i kapitel 10.

Sammenligningen af måledata og besvarelser for kollegieværelse 39 og 43 er vist i tabel C.4. Ventetiden for måledataene er bestemt i henhold til de angivne temperaturer i [Dansk Standard, 2009], på henholdsvis 40 og 45 °C.

Placering	Måledata - ventetid til 40 °C	Måledata - ventetid til 45 °C	Forbrugerundersøgelse
Kollegieværelse 39	1,14 min.	2,94 min.	1 - 2 min.
Kollegieværelse 43	3,30 min.	6,42 min.	Mindre end 1 min.

Tabel C.4. Sammenligning af ventetiden for brusebadstapninger ud fra måledata og forbrugerundersøgelsen. Ventetiden er bestemt ud fra de tapninger der opnår den ønskede temperatur.

På baggrund af tabel C.4 er der stor forskel mellem overensstemmelsen for måledataene og besvarelserne for henholdsvis kollegieværelse 39 og 43. Resultaterne for kollegieværelse 39 har god overensstemmelse, hvorimod der er en væsentlig afvigelse for kollegieværelse 43. Afvigelsen af resultaterne for kollegieværelse 43 kan enten skyldes, at beboeren ikke er bevidst om ventetiden og derfor fejlvurderer det, eller at beboeren finder en koldere starttemperatur end 40 °C acceptabel. Grundet den store afvigelse i resultaterne for kollegieværelse 43 er det vurderet, at der er en stor usikkerhed på de øvrige besvarelser, angivet på figur C.5.

C.0.2 Opsummering

På baggrund af den forudgående analyse af forbrugerundersøgelsen, er det vurderet, at beboerne på Aalborgkollegiet generelt er bevidste omkring deres hyppighed og varighed af bade. Størstedelen af beboerne er vurderet til at være hjemme på Aalborgkollegiet i

hverdagene, på baggrund af en stor overensstemmelse mellem besvarelserne og antallet af weekend- og feriedage. Ved sammenligning af måledata og besvarelser, er det vurderet, at de udvalgte brusere, hvor der foretages dataopsamling, ikke er repræsentative for de hyppigst forekommende forbrugsmønstre for bade, men derimod er eksempler på to vidt forskellige forbrugsmønstre mht. bade.

Kalibrering D

Formålet med kalibrering er at bestemme målenøjagtigheden for det pågældende måleudstyr, for at kunne tage højde for dette i databehandlingen og dermed reducere usikkerheden af resultaterne. I dette appendiks præsenteres den anvendte metode og databehandling til kalibrering af henholdsvis Brunata energimålere og Huba flowmålere, med henblik på at fremstille dertilhørende kalibreringsligninger.

D.1 Brunata energimålere

Der er anvendt Brunata energimålere af modellerne HGQ3 og HGQ1. Afhængigt af Brunata energimålerens model, er der foretaget målinger for forskellige flowniveauer. Begge modeller er kalibreret inden for samme temperaturinterval.

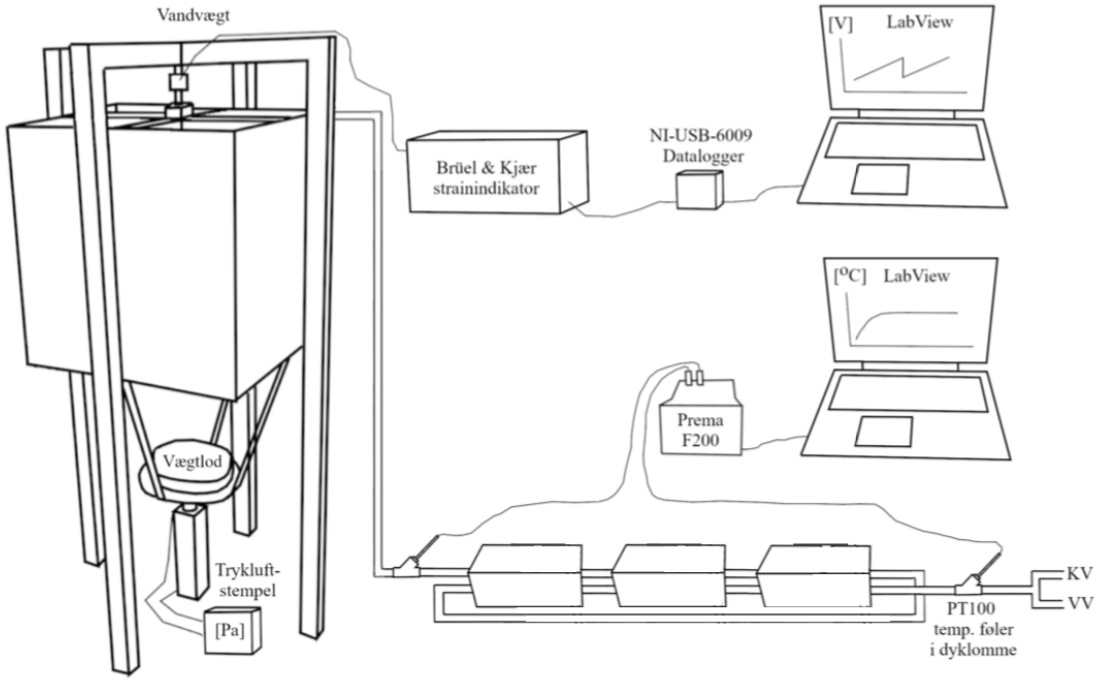
D.1.1 Kalibreringsopstilling

Til kalibreringen er der benyttet følgende udstyr og software:

- 2 Brunata energimålere af typen HGQ3-R3-184/1B0M24
- 1 Brunata energimåler af typen HGQ1-R0-184/1B0M24
- Vandvægt med aftagelige vægtlodder og et trykstempel
- 2 Dykpumper
- Vandtank, volumen på 0,8 m^3
- Bosch EL-vandvarmer 4500T 30 L
- NI-USB-6009-datalogger
- Data Collection Unit, DCU
- 2 PT100 temperatursensorer
- Prema F200 Præcisionstermometer
- Brüel & Kjær Strainindikator
- Computer
- LabView software
- ENERGY-NET 2.3.2.2 software

Som det fremgår af figur D.1, er Brunata energimålernes temperatursensorer placeret imellem præcisionstermometerets to PT100 temperatursensorer, der logger og sender måledataene til en tilsluttet computer med LabView. Derfra løber vandet over i en vandvægt, hvorefter det løber i et afløb eller en vandtank, alt efter kalibreringsmetode. Vandvægten er udstyret med aftagelige vægttlodder, hver på cirka 9,994 kg/stk, og et trykstempel til at løfte og sænke de aftagelige vægtlodder. Vandvægten er tilsluttet en Brüel & Kjær strainindikator, som måler spændingen forårsaget af vægtpåvirkningen fra

vægtlodder og vand i vandvægten. Straindikatoren er desuden tilsluttet en computer, der logger spændingen med LabView. Figur D.1 viser et principdiagram for forsøgsopstillingen.



Figur D.1. Principdiagram for kalibrering af Brunata energimålernes flow- og temperatursensorer. [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen [2019], Redigeret].

Figur D.1 viser, hvordan Brunata energimålerne er serieforbundet på rørføringen hvor temperaturen og flowet måles, hvilket muliggør kalibrering af alle Brunata energimålere af samme model på én gang. Måledata fra Brunata energimålerne overføres til en datalogger, som overfører det til en pc med LabView.

Ved kalibrering af både flow og temperatur er der benyttet to forskellige metoder til forsyning af vand:

1. Åbent kredsløb: Anvendelse af laboratoriets afløb og vandforsyning fra brugsvandsrør
2. Lukket kredsløb: Vandforsyning ved anvendelse af dykpumpe tilsluttet en vandtank

Ved kalibrering af temperatursensorerne med metode 2, opvarmes vandet til den ønskede temperatur med en EL-vandvarmer tilsluttet vandtanken.

Ved kalibrering af henholdsvis Brunata energimåler HGQ1 og HGQ3, blev der anvendt to forskellige typer dykpumper. Udskiftningen af dykpumpen skyldes registrering af udfald på spændingskurven ved den først anvendte dykpumpe, hvilket blev udbedret ved anvendelse af den anden pumpe.

D.1.2 Metode og databehandling

I det følgende redegøres der for metoden til kalibrering af henholdsvis Brunata energimålernes temperatur- og flowsensorer, samt den efterfølgende databehandling til

bestemmelse af de dertilhørende kalibreringsligninger.

Kalibrering af flowsensorer

Kalibrering af Brunata energimålernes flowsensorer foregår ved at foretage målinger for forskellige flows. Hertil er metode 2 benyttet, som beskrevet i det forudgående afsnit, da denne muliggør et større flow.

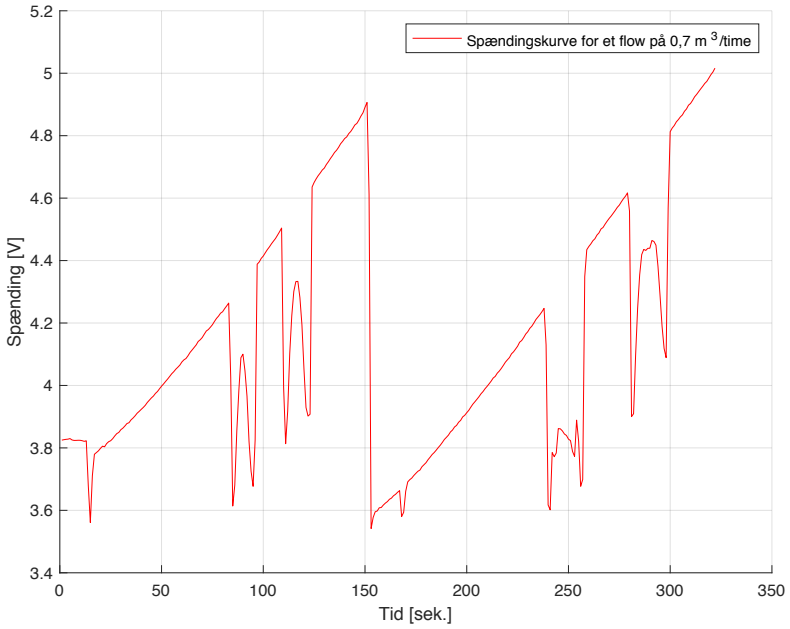
Databehandlingen for flowmålingerne omfatter beregning af det sande flow ud fra spændingsmålingerne med Brüel & Kjær strainindikatoren som er tilsluttet en computer med LabView. Ved lineær regression af spændingsmålingerne opnås to spændingskurver, som efterfølgende anvendes til at bestemme tiden mellem to ens spændingsniveauer, svarende til to ens vandmasser. Vandmasserne bestemmes ud fra massen af vægtlodderne, hvorefter flowet kan bestemmes. Et eksempel på den lineære regression er vist på figur D.3.

Før målinger startes, skal et passende antal vægtlodder placeres over vandvægtens trykstempel. Jo flere vægtlodder, des langsommere vil spændingen stige og dermed give flere målepunkter på spændingskurverne til bestemmelse af den pågældende kalibreringskurve. Ved målingens start skal trykstemplet være nede, således at vægtlodderne bæres af vandvægten alene. Når temperatur og flow er konstant, lukkes vandvægtens afløbsventil og målingen påbegyndes.

Når det ønskede antal målinger for spændingkurven er opnået, og der ses en konstant stigning, skal trykstemplet aktiveres så det løfter vægtlodderne fri af vandvægten. Førnævnte resulterer i et brat spændingsfald på spændingskurven, hvilket kan ses på figur D.2. Grundet et konstant flow, vil der fortsat være en lineær spændingsstigning efter spændingsfaldet. Når spændingsniveauet har opnået samme maximumværdi, som før vægtlodderne blev løftet, er målingen færdighvorved det sande flow kan beregnes ud fra vægten af vandet og tiden, det tager at opnå samme spændingsniveau. Beregningen at det sande flow er beskrevet i det følgende.

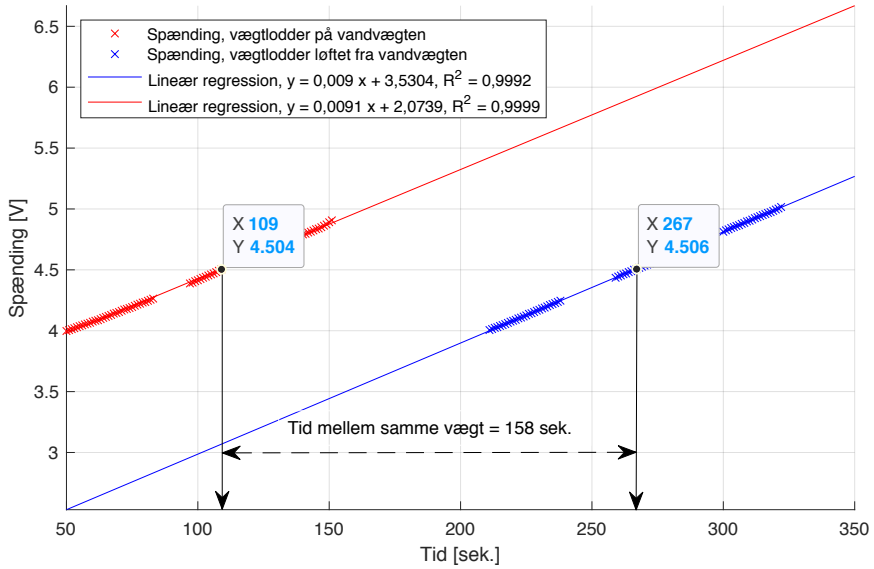
Inden næste måling startes skal vandvægten tømmes, og trykstempel skal ned, så vægtlodderne igen hviler på vandvægten.

Som eksempel er der i det følgende beskrevet en udførelse af databehandlingen for et ønsket flow på $0{,}7\,\mathrm{m}^3$/time, hvoraf spændingenskurven fremgår af figur D.2.



Figur D.2. Spændingskurven for et ønsket flow på $0{,}7\,\mathrm{m}^3/\mathrm{time}$.

Af figur D.2 fremgår det, at der er udfald på spændingskurven, hvilket, som tidligere nævnt, formentlig skyldes den først anvendte pumpe, da der ikke var lignende udfald ved målinger efter at pumpen blev udskiftet. Da kurven er lineær før og efter spændingsudfaldene, kan dataene stadig bruges ved at ekskludere udfaldene fra datamængden, som benyttes til at lave lineær regression. Resultatet af denne dataeksklusion og den lineære regression kan ses på figur D.3, som viser databehandlingen for et ønsket flow på $0{,}7\,\mathrm{m}^3/\mathrm{time}$.



Figur D.3. Lineær regression for spændingskurven uden udfald for et ønsket flow på $0{,}7\,\mathrm{m}^3/\mathrm{time}$.

Ud fra figur D.3 kan det ses, at de to kurver er lineære grundet en R^2-værdi som næsten er lig 1. Ved at lave en horisontal linje mellem de to kurver, kan to punkter med samme

spændingsniveau findes. Tiden mellem disse spændingsniveauer svarer til den tid det har taget flowmængden at erstatte de løftede vægtlodder med vand. Tabel D.1 viser de nødvendige værdier for beregning af den sande flowmængde, for et ønsket flow på 0,7 m^3/h.

Parameter	Enhed	Værdi
Gennemsnitlig temperatur	[°C]	21,58
Densitet	[kg/m^3]	997,85
Masse	[kg]	29,98
Volumen	[m^3]	0,03
Tid mellem ens masse	[sek]	158
Flow	[m^3/sek.]	0,000189
Flow	[L/sek.]	0,189
Flow	[m^3/time]	0,681

Tabel D.1. De benyttede værdier til beregning af den sande flowmængde for et ønsket flow på 0,7 m^3/time.

Ved at finde den gennemsnitlige temperatur for den pågældende måling, kan vandets densitet findes, hvilket muliggør beregning af vandets volumen. Ved at kende tiden samt massen af de benyttede vægtlodder, og deraf vandets tilsvarende volumen, kan den sande flowmængde beregnes.

En gentagelse af denne proces for forskellige flowmængder, muliggør dannelsen af en kalibreringskurve, og deraf en kalibreringsligning ved hjælp af lineær regression, for hver energimåler. Disse ligninger kan benyttes til fremtidig databehandling for at minimere måleusikkerheden fra dataopsamlingen.

Kalibrering af temperatursensorer

Kalibrering af temperatursensorer foregår ved at foretage målinger for forskellige vandtemperaturer, hvor flowmængden er underordnet. Ved kalibrering af Brunata energimålerne af model HGQ3, blev der anvendt metode 1, hvor der ved kalibrering af Brunata energimålermodel HGQ1 blev anvendt metode 2.

Inden hver måling startes, skal medietemperaturen være konstant og have den ønskede værdi. Når den ønskede temperatur er opnået, logges måledata for Brunata energimålerne og præcisionstermometeret i 5 minutter. Derefter gentages processen for en ny temperatur indtil det ønskede antal målinger er foretaget.

Vandvægten har ingen funktion i forbindelse med kalibrering af temperatursensorer, hvorfor dens afløb skal være åben.

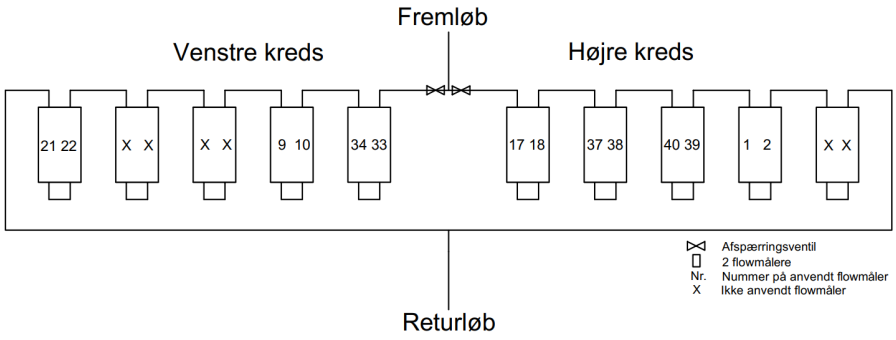
En analyse af præcisionstermometerets måledata for kalibreringerne af Brunata energimålerne af model HGQ3, viste en temperaturforskel på maksimum 0,3 °C mellem frem- og returløb. For Brunata energimålerne var den tilsvarende temperaturforksel maksimalt 0,05 °C. Grundet den minimale forskel er det vurderet at være acceptabelt, at kalibrere begge HGQ3-energimålere samtidig. Ligeledes er det vurderet acceptabelt, at anvende gennemsnitsværdier for henholdsvis de sande temperatursensorer og Brunata energimålernes temperatursensorer. Gennemsnitsværdier for de forskellige målepunkter for henholds-

vis de sande og målte temperaturer, er benyttet til fremstilling af kalibreringsligningerne, præsenteret på figur 4.5 i afsnit 4 på side 27.

D.2 Huba flowmålere

Kalibreringen af Huba flowmålerne er udført efter samme princip som metode 2 for Brunata energimålerne, beskrevet i afsnit D.1.

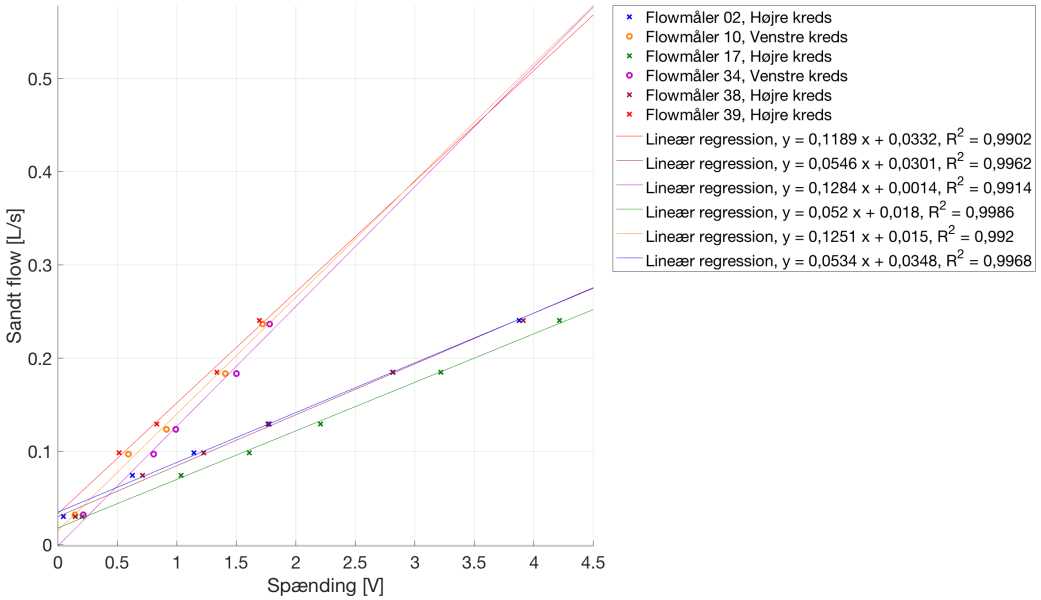
Under kalibreringen var Huba flowmålerne inddelt i to kredse, for at reducere tryktabet og dermed kunne opnå de ønskede flows, samt for at øge målenøjagtigheden. Huba flowmålernes inddeling i to kredse er vist på figur D.4, hvor hvert nummer repræsenterer den pågældende Huba flowmåler. Huba flowmålere markeret med "X" er ikke anvendt i projektet.



Figur D.4. Placering af Huba flowmålere i henholdsvis venstre og højre kreds under kalibrering. Huba flowmålere markeret med "X" er ikke anvendt i projektet.

Ved at inddele Huba flowmålerne i de to kredse, kan flowmålerne kalibreres med samme opstilling, blot over to omgange, hvor afspærringsventilerne, vist på figur D.4, benyttes til at regulere vandforsyningen, så der kun løber vand igennem én flowmålerkreds pr. kalibreringsomgang.

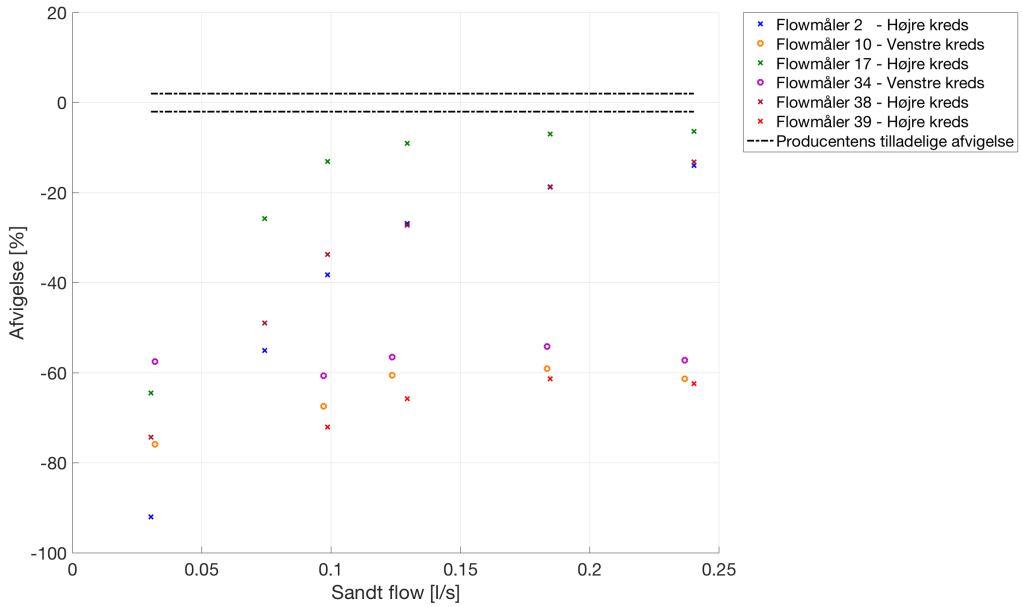
Figur D.5 viser kalibreringskurverne, samt ligninger og R^2-værdier for flow for seks udvalgte Huba flowmålere. Resultaterne for kalibreringen af alle flowmålere kan ses i tabel D.2.



Figur D.5. Kalibreringskurver for udvalgte Huba flowmålere for repræsentativt udvalgte målere.

Det fremgår af figur D.5, at der er betydelig forskel på kalibreringskurverne for de forskellige målere. R^2-værdierne er tæt på 1 og der er derfor en stærk, lineær sammenhæng mellem målepunkterne for de individuelle flowmålere. På baggrund af ovennævnte skyldes afvigelserne mellem højre og venstre kreds formentlig primært forsøgsopstillingen.

Den procentvise afvigelse mellem de sande og målte flows, vist for seks udvalgte Huba flowmålere, på figur D.6, indikerer ligeledes, at en fejl er begået i kalibreringerne. Producentens tilladelige afvigelse er ligeledes vist på figur D.6.



Figur D.6. Procentvis afvigelse mellem det sande og målte flow for seks udvalgte Huba flowmålere, samt prodcentens maksimalt tilladelige afvigelse.

Som det fremgår af figur D.6, er der betydelige afvigelser mellem de sande og målte flows, hvoraf ingen overholder producentens maksimalt tilladelige afvigelse på 2 %. Ved sammenligning af de to kredse fremgår det, at flowmålerne fra højre kreds har den mindste procentvise afvigelse fra de sande flows.

De flowmålere, som har mindst afvigelse, er alle fra højre kreds, hvilket kan betyde, at afspærringsventilen for den venstre kreds er mere tæt, således at flowet igennem højre kreds er tættere på det sande flow. At den højre kreds er mere præcis betyder dog ikke, at den har en tilskrækkelig præcision i forhold til producentens tilladelige afvigelse, da afvigelsen stadig er større end det tilladelige.

D.2.1 Kalibreringsligninger for Huba flowmålere

Resultaterne for kalibrering af Huba flowmålernes flow- og temperatursensorer kan ses i tabel D.2. Kalibreringer af de anvendte Huba flowmålere, som er udført i forbindelse med andre projekter, er præsenteret i tabel D.3.

Flowmåler nr.	Ligning - flowsensor	Ligning - temperatursensor
01	0,0480x + 0,0234	14,662x - 16,670
02	0,0534x + 0,0348	14,772x - 16,910
09	0,1274x + 0,0139	15,063x - 18,112
10	0,1251x + 0,0150	15,190x - 17,926
17	0,0520x + 0,0180	15,283x - 19,527
18	0,0524x + 0,0309	15,265x - 19,319
33	0,1193x + 0,0044	14,946x - 19,775
34	0,1284x - 0,0014	14,862x - 19,467
37	0,0489x + 0,0165	15,203x - 18,948
38	0,0546x + 0,0301	15,260x - 19,114

Tabel D.2. Kalibreringsligninger for Huba flowmålernes flow- og temperatursensorer. Kalibreringen er udført i forbindelse med dette projekt.

Flowmåler nr.	Ligning - flowsensor	Ligning - temperatursensor
03	0,0553x + 0,0260	15,142x - 18,920
04	0,0548x + 0,0265	15,234x - 18,939
11	0,0557x + 0,0266	15,325x - 18,642
12	0,0571x + 0,0270	15,365x - 18,728
15	0,0538x + 0,0338	15,835x - 18,832
16	0,0530x + 0,0335	15,814x - 18,770
19	0,0564x + 0,0258	15,415x - 18,953
20	0,0552x + 0,0265	15,425x - 19,098
21*	0,0552x + 0,0265	15,369x - 19,028
22*	0,0552x - 0,0265	15,369x - 19,028
23	0,0556x + 0,0247	15,271x - 19,047
24	0,0548x + 0,0259	15,291x - 19,024
25	0,0552x + 0,0230	15,835x - 18,832
26	0,0543x + 0,0234	15,123x - 19,599
29	0,0554x + 0,0211	15,033x - 19,774
30	0,0553x + 0,0200	14,978x - 19,605

Tabel D.3. Kalibreringsligninger for Huba flowmålernes flow- og temperatursensorer. Kalibreret af [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019].

Verificering af flowmålere E

Dette appendiks beskriver udstyr og fremgangsmåde for den foretagede verificering af flowsensorerne for nogle udvalgte Huba flowmålere, monteret på Aalborgkollegiet. Derudover redegøres og dokumenteres der for de fundne resultater.

E.1 Udstyr og opstilling

Til verificeringen af Huba flowmålerne er der benyttet følgende udstyr:

- Huba flowmålere af typen 236 DN10, monteret på tapsteder
- Arduino til dataopsamling
- Vægt, som kan måle minimum 10 kg med 1 grams nøjagtighed
- Balje til opsamling af vand
- Multimeter eller voltmeter
- Stopur
- Ur med sekundviser

Arduinoen tilsluttes den Huba flowmåler, som skal verificeres og tilsluttes strøm, hvor multimeteret benyttes til at kontrollere, at arduinoen virker korrekt, hvilket er beskrevet nærmere i det efterfølgende afsnit. Baljen benyttes til at opsamle vand fra tapstedet, som efterfølgende vejes på vægten. Stopuret og uret med sekundviser benyttes til at bestemme varigheden og tidspunktet for hver måling.

E.1.1 Kontrol af arduino

Inden målinger startes, er det vigtigt at sikre, at arduinoen virker som den skal. Dette afsnit beskriver metode for kontrol af følgende fire punkter:

- Hovedstrømforsyning til arduino
- Strømforsyning til ESP32-board
- Huba flowmålerens ledninger forbundet til arduino
- Dataopsamling og WiFi-forbindelse

De ovenstående punkter skal kontrolleres hver gang arduinoen tilsluttes et nyt tapsted. Acceptkriterierne for, at de forskellige dele virker, fremgår i tabel E.1.

Arduinodel	Acceptkriterium
Hovedstrømforsyning til arduino	Spænding som angivet på strømadapter
Strømforsyning til ESP32-board	Spænding på ca. 6 V
Huba flowmåler, flowsignal	Spænding på ca. 0 V
Huba flowmåler, temperatursignal	Spænding afhængig af vandtemperatur
Huba flowmåler, strømforsyning	Som hovedstrømforsyning
WiFi-forbindelse	Data uploades til server som forventet

Tabel E.1. Acceptkriterier for tjek af de forskellige dele.

Hovedstrømforsyningen til arduinoen tjekkes ved at måle spændingen mellem metaldelene på siden og bagsiden af strømforsyningens hunstik, som er fæstnet til arduinoens hovedboard. For strømforsyningen til ESP32-boardet skal spændingen måles mellem den røde og den sorte ledning, som forbinder ESP32-boardet med arduinoens hovedboard.

Huba flowmåleren har fire ledninger, som er forbundet med arduinoen. En oversigt over de forskellige ledninger til Huba flowmåleren og deres funktion kan ses i tabel E.2.

Ledningens farve	Funktion	Elektrisk polaritet
Sort	Fælles nulpol	-
Blå	Flowsignal	+
Hvid	Temperatursignal	+
Brun	Strømforsyning til flowmåler	+

Tabel E.2. Oversigt over Huba flowmålerens fire ledninger, som er forbundet til arduinoen.

Huba flowmålernes tre ledninger, blå, hvid og brun, tjekkes ved at måle spændingen mellem den pågældende og den sorte ledning. Hvis der måles en forkert spænding for flowmålerens ledninger, imens hovedstrømforsyningen fungerer korrekt, kan det skyldes flowmålerens strømbesparende funktion, hvor flowmåleren sættes på standby i perioder uden flow. Dette kan løses ved at lave en tapning på fx 10 sekunder for at "vække" flowmåleren, hvorefter spændingerne burde kunne måles som normalt.

Arduinoens dataopsamling og WiFi-forbindelse tjekkes ved at foretage en tapning og notere start- og sluttidspunktet. Derefter kontrolleres det, at dataene er uploadet til serveren, som de skal, og at tidsstemplerne for flow- og temperaturdataene stemmer overens med tapningens noterede tidsinterval.

Kontrollen er færdig, når alle acceptkriterier er overholdt, hvorefter verificeringen kan gennemføres.

E.2 Metode og databehandling

Verificeringens formål er at underbygge kalibreringen, hvorfor der kun er udført tre målinger pr. flowmåler, med henholdsvis maksimalt, middel og lavt flow for det pågældende tapsted. Hver måling udføres ved at gøre følgende steps:

1. Vej balje uden vand og notér vægt
2. Placér balje under tapsted

3. Lav tapning på 30-60 sekunder og tag tid med stopur imens
4. Vej balje med vand og notér vægt

Baljen skal vejes uden vand inden hver ny måling begyndes for at tage højde for vanddråber, som ikke kommer ud ved tømning af baljen fra den forudgående måling. Figur E.1 viser vejningen af den tomme balje, som blev benyttet. Efter vejning placeres baljen under tapstedet.

Målingen udføres derefter ved at starte en tapning og stopuret på samme tid. Figur E.2 viser en igangværende måling for en køkkenvask. Jo længere måleperioden er, des flere datapunkter er der, hvilket øger målenøjagtigheden. I denne verificering var måleperioderne 30 eller 60 sekunder, afhængig af flowet, så baljen ikke blev overfyldt. Målingen stoppes ved at lukke for tapningen og stoppe stopuret på samme tid. Derefter vejes baljen med vand på vægten. Baljen tømmes og næste måling kan startes. Dette gentages indtil det ønskede antal målinger for tapstedet er foretaget. Arduinoen kan frakobles strøm og flyttes til næste tapsted, når den er færdig med at lægge måledataene op, da disse ellers vil gå tabt.

Figur E.1. Vejning af tom balje inden start af ny måling.

Figur E.2. Igangværende måling ved en køkkenvask, hvor der tappes brugsvand ned i baljen.

Efter at målingerne for de forskellige flowmålere er foretaget, kan varighed og tappemasse bestemmes ud fra de noterede start- og stoptidspunkter, samt vejninger af baljen med og uden vand. Det sande flow bestemmes for hver måling ved hjælp af formel (E.1).

$$q_{sand} = \frac{(\frac{m}{\rho})}{t} \tag{E.1}$$

q_{sand}	Volumenstrøm for sandt flow	[m^3/sek]
m	Tappemasse	[kg]
ρ	Densitet for vand ved given temperatur	[kg/m^3]
t	Varighed af tapning	[sek.]

Til bestemmelse af densiteten er temperaturdata fra Huba flowmålerne benyttet.

For Huba flowmålernes flowdata, er der først fundet en gennemsnitlig spænding for hver enkelt måleperiode, hvorefter spændingen er omregnet fra [V] til [L/sek.] ud fra to forskellige metoder:

- Uden kalibrering: I henhold til producentens omregningsformel, beskrevet i afsnit 4.2 på side 32
- Med kalibrering: I henhold til de bestemte kalibreringsligninger, vist i Appendiks D.2

Formålet med at anvende ovenstående omregningsmetoder er at verificere, om de omtalte afvigelser i afsnit 4.2 skyldes fejl i Huba flowmålerne eller fejl i forsøgsopstillingen for kalibreringen.

Tabel E.3 viser en oversigt over de flows der er målt under målingerne for de forskellige typer tapsteder. For flowmåler nr. 1, 2 og 18, var tekniske problemer skyld i, at flowmålerdataene ikke var troværdige, hvorfor kun de sande flows er vist i tabellen. Tabel E.4 viser afvigelserne mellem de sande og målte flows, præsenteret i tabel E.3.

Flowmåler	**Tappetype**	**Flow [L/sek.]**		
		Sandt	**Flowmåler u. kalibrering**	**Flowmåler m. kalibrering**
1	Bruser, VBV	0,066	-	-
		0,033	-	-
		0,017	-	-
2	Bruser, KBV	0,139	-	-
		0,048	-	-
		0,016	-	-
17	Bruser, KBV	0,082	0,057	0,074
		0,144	0,120	0,135
		0,033	0,009	0,027
18	Bruser, VBV	0,083	-	-
		0,036	-	-
		0,011	-	-
21	Køkkenvask, VBV	0,088	0,063	0,158
		0,039	0,016	0,075
		0,016	-	-
22	Køkkenvask, KBV	0,064	0,046	0,135
		0,033	0,011	0,068
		0,013	0,012	0,070
33	Håndvask, VBV	0,046	0,025	0,060
		0,042	0,021	0,051
		0,014	-	-
34	Håndvask, KBV	0,050	0,030	0,071
		0,032	0,012	0,027
		0,019	-	-

Tabel E.3. Sande flows og flows målt med Huba flowmålere, med og uden kalibrering, for de forskellige målinger. Flows markeret med rød er udenfor Huba flowmålernes måleinterval.

Flowmåler	Tappetype	Sandt flow	Afvigelse i flow [L/sek.]	
		[L/sek.]	Flowmåler u. kalibrering	Flowmåler m. kalibrering
17	Bruser, KBV	0,082	0,025	0,008
		0,144	0,024	0,009
		0,033	0,024	0,006
21	Køkkenvask, VBV	0,088	0,025	-0,07
		0,039	0,023	-0,036
		0,016	-	-
22	Køkkenvask, KBV	0,064	0,018	-0,071
		0,033	0,022	-0,035
		0,013	0,001	-0,057
33	Håndvask, VBV	0,046	0,021	-0,014
		0,042	0,021	-0,009
		0,014	-	-
34	Håndvask, KBV	0,050	0,020	-0,021
		0,032	0,020	0,005
		0,019	-	-

Tabel E.4. Afvigelser mellem sande flows og flows målt med Huba flowmålere, med og uden kalibrering. Flows markeret med rød er udenfor Huba flowmålernes måleinterval.

Af tabel E.3 fremgår det, at størstedelen af de anvendte lave flows ved verificeringen er udenfor Huba flowmålernes måleinterval, som er mellem 0,03 - $0,53$L/sek..

Derudover fremgår det, at der forekommer store afvigelser for flowene målt med Huba flowmålerne, både med brug af producentens omregningsformel og med kalibreringsligningerne, dog forekommer de største afvigelser ved brug af kalibreringsligningerne.

E.2.1 Mulige usikkerheder

For brusere, blev der observeret en lille forsinkelse, fra en tapning blev påbegyndt, til at der kom vand ud af brusehovedet, hvilket skyldes, at brusehovedet blev flyttet væk fra baljen umiddelbart efter endt tapning. Dette kan resultere i uoverensstemmelser mellem de sande og målte flows. Den mulige fejlkilde betyder, at de målte flows for bruserne formentlig har en smule større afvigelse end det, som er angivet for Huba flowmålerne i tabel E.3.

Integrations- og summeringstider F

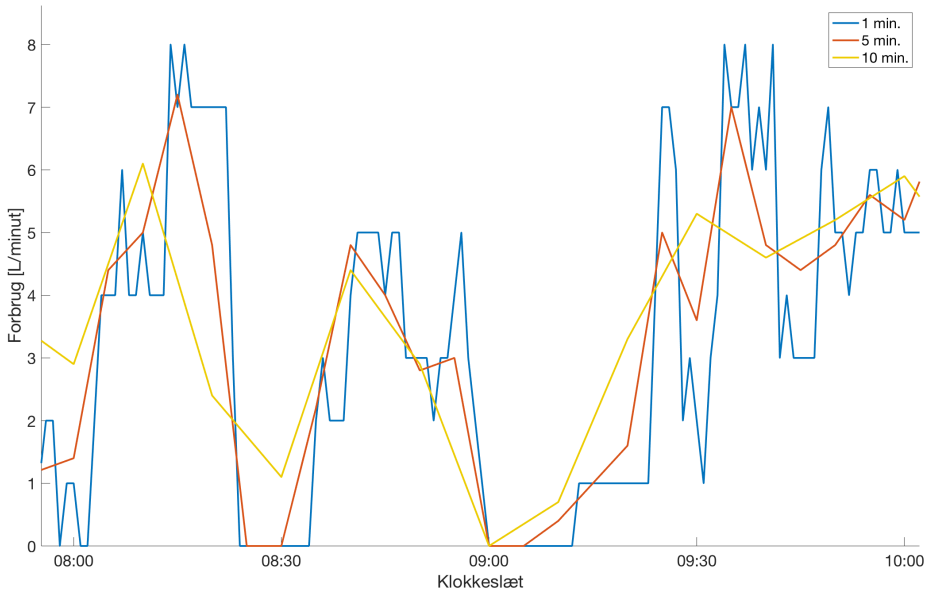
Dette Appendiks redegør for den nødvendige integrationstid eller summeringstid i forhold til undersøgelse af forskellige parametre. Opløsningen er undersøgt på både bygningsniveau og tapstedsniveau, ud fra måledata for henholdsvis Brunata energimålere og Huba flowmålere, i henhold til kapitel 3.2. Opløsningens betydning er undersøgt for følgende parametre:

1. Detaljegrad
2. Identificering af spidsbelastninger
3. Overskuelighed
4. Bestemmelse af reelt antal tapninger

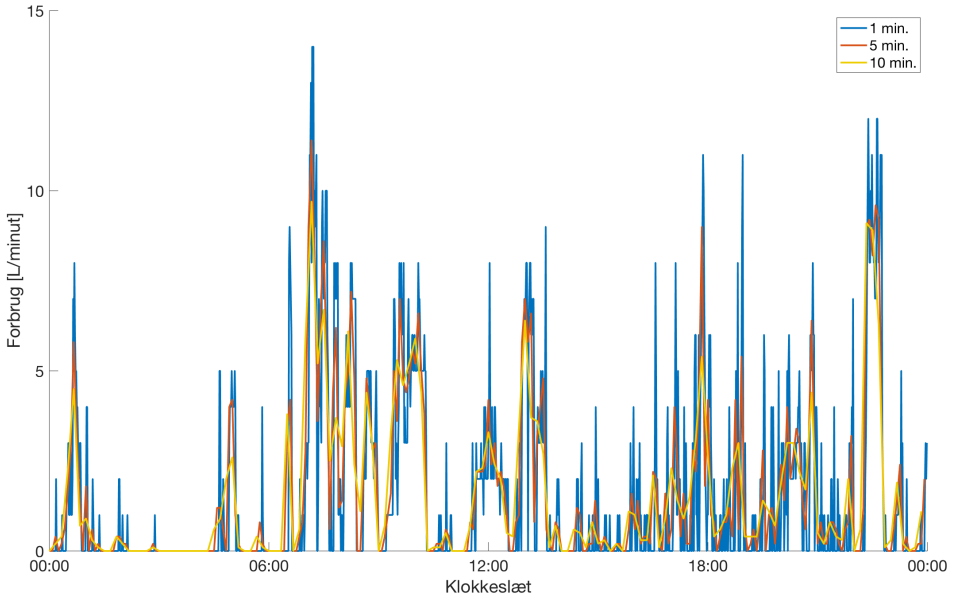
F.0.1 Brunata energimålerdata

Som beskrevet i kapitel 4, har Brunata energimålerne en måleopløsning på 1 minut, som undersøges i det følgende ved en sammenholdning med integrationstider på henholdsvis 5 minutter, 10 minutter, 30 minutter og 1 time. Undersøgelsen er foretaget på baggrund af måledata fra d. 9/3-2020. Eftersom at Brunata energimålerne anvendes til registrering af Aalborgkollegiets samlede varmtvandsforbrug, er parameteren vedrørende bestemmelse af reelt antal tapninger undladt i den følgende analyse.

Figur F.1 og F.2 viser et forbrugsprofil for en hverdag i måleperiode 1, målt med Brunata energimåler 29, hvor den oprindelige måleopløsning på 1 minut er sammenlignet med en integrationstid på henholdsvis 5 minutter og 10 minutter. Figur F.2 viser forbruget i tidsperioden 08:00 - 10:00, og figur F.1 viser forbruget for hele døgnet.



Figur F.1. Sammenligning af forskellige integrationstider for Brunata energimålerdata i en begrænset tidsperiode.

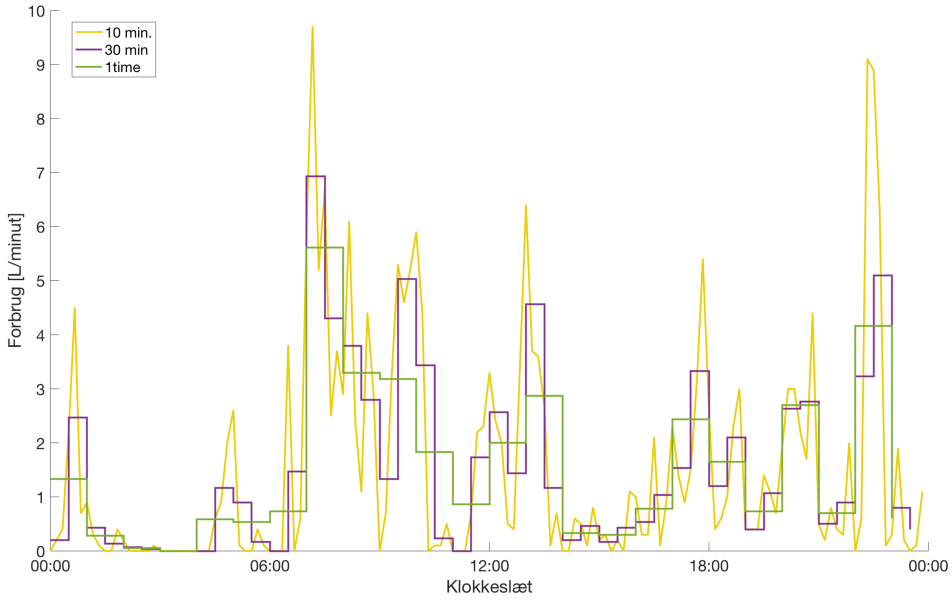


Figur F.2. Sammenligning af forskellige integrationstider for Brunata energimålerdata for et helt døgn.

Af figur F.1 fremgår det, at den oprindelige måleopløsning på 1 minut er anvendelig ved analyse af måledata for en begrænset tidsperiode, idet tendenser fremstår tydeligt og overskueligt. Ved analyse af enkeltstående tapninger, anbefales det derfor at anvende Brunata energimålernes måleopløsning på 1 minut, dog kun for begrænsede tidsperioder, for dermed at bevare den højest mulige detaljegrad uden at gå på kompromis med

overskueligheden.

Ud fra en sammenligning af figur F.1 og F.2, som begge viser måledata med samme integrationstider, er det vurderet, at en højere opløsning gør måledataene uoverskuelige ved analyse af længere tidsperioder, hvor tendenser, samt antal spidsbelastningsperioder og deres varighed, fremgår mindre tydeligt. Det er derfor nødvendigt at anvende en højere integrationstid ved analyse af måledata for længere tidsperioder, for at spidsbelastninger og overordnede tendenser fremstår tydeligt, som det fremgår af figur F.3. Denne figur viser det samme varmtvandsforbrug som figur F.2, hvor der i stedet er anvendt integrationstider på henholdsvis 10 minutter, 30 minutter og 1 time. Integrationstiden på 10 minutter er vist af hensyn til sammenligneligheden.



Figur F.3. Sammenligning af forskellige integrationstider for Brunata energimålerdata for et helt døgn.

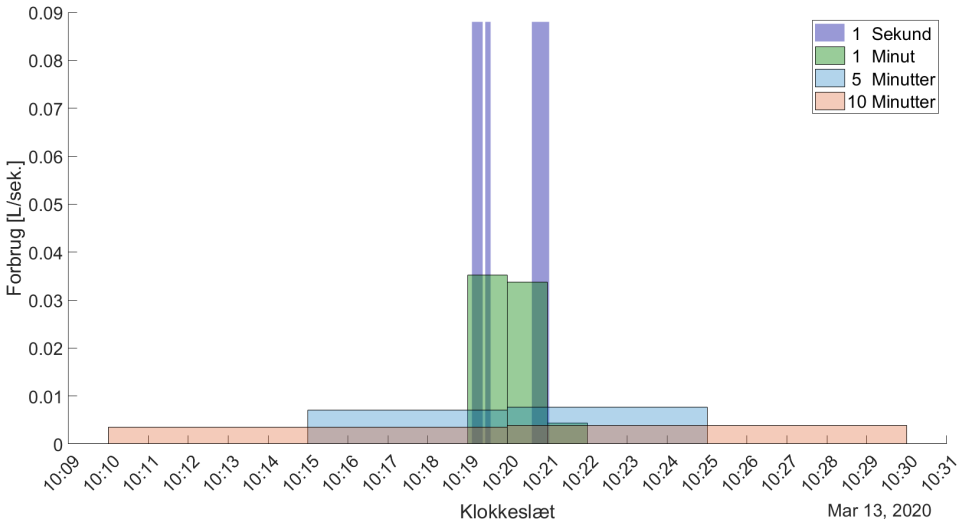
Ved sammenligning af de tre integrationstider på figur F.3 fremgår det, at spidsbelastningerne og de overordnede tendenser fremstår tydeligt ved integrationstider på henholdsvis 30 minutter og 1 time, grundet reduktionen af udsving. På den baggrund er det vurderet, at en integrationstid på henholdsvis 30 minutter og 1 time er egnet til bestemmelse af spidsbelastningsperioder, hvor integrationstiden på 1 time tydeligst viser de helt overordnede tendenser i forbrugsmønsteret.

F.0.2 Huba flowmålerdata

Til undersøgelse af integrationstider for Huba flowmålerne, er der anvendt flowmålerdata fra køkken 3.2 d. 13/3-2020 samt fra køkken 2.1 for alle hverdage i måleperiode 2. Grundet den anvendte metode til bestemmelse af varmtvandsforbruget pr. tapning, beskrevet i Appendiks G.2, er konklusionerne for den foretagede undersøgelse af integrationstider kun repræsentativ for Huba flowmålerdata, hvor varmtvandsforbrug pr. tapning er estimeret efter samme metode.

I projektet [Jacob Scharling Jørgensen og Sofie Sand Knudsen, 2019] blev det konkluderet, at der var en negligerbar forskel mellem Huba flowmålernes måleopløsning på 8/sekund og en integrationstid på 1 sekund. Derfor er der ikke foretaget undersøgelser af integrationstider lavere end 1 sekund.

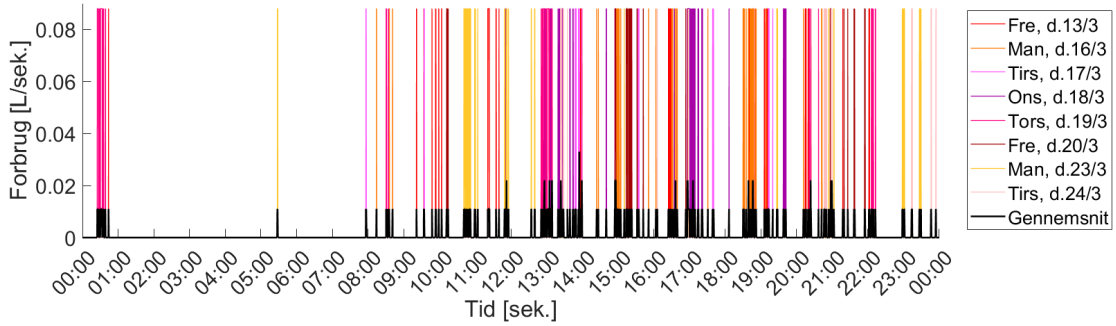
Af figur F.4 fremgår tre tapninger, i tidsrummet kl. 10:10 til 10:30, hvor hver tapning er vist med de forskellige integrationstider; 1 sekund, 1 minut, 5 minutter og 10 minutter.



Figur F.4. Sammenligning af forskellige integrationstider for Huba flowmålerdata.

Af figur F.4 fremgår det, at der ved en integrationstid på 1 sekund er tre tapninger med en varighed på henholdsvis 17, 9 og 27 sekunder, svarende til 53 sekunder totalt set. Ved en integrationstid på 1 minut og højere fremgår det, at tappevarigheden bliver længere og de tre tapninger bliver til 2 tapninger af længere varighed. Ud fra observationerne på figur F.4 kan det dermed konkluderes, at en integrationstid på mindre end 1 minut er nødvendig for at fastlægge det korrekte antal tapninger og deres præcise varighed.

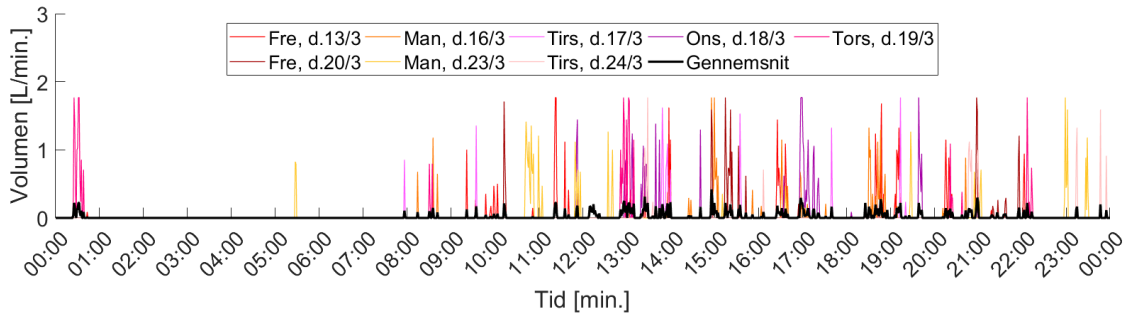
Til bestemmelse af spidsbelastningsperioder og vurdering af overskueligheden, er figur F.5 anvendt, hvilket viser alle tapninger i køkken 2.1 for hverdage med en integrationstid på 1 sekund.



Figur F.5. Tappeprofiler for køkken 2.1 med en integrationstid på 1 sekund, inddelt i henholdsvis hverdage og weekender.

Af figur F.5 fremgår det, at den store spredning i tappetidspunkterne, ved en integrationstid på 1 sekund, besværliggør identificering af spidsbelastningsperioder og generelle tendenser, da disse ikke fremstår tydeligt. Dette afspejles af, at der kun forekommer stigninger i gennemsnitsforbruget i få sekunder ad gangen. Tætheden af den præsenterede måledata i figur F.5 vanskeliggør ligeledes dannelse af et overblik ved sammenligning på tværs af datasæt.

Figur F.6 viser måledataene præsenteret på figur F.5, hvor en integrationstid på 1 minut er anvendt.



Figur F.6. Tappeprofiler for køkken 2.1 med en integrationstid på 1 minut, inddelt i henholdsvis hverdage og weekender.

Af figur F.6 fremgår det tydeligt, hvilke perioder der oftest forekommer sammenhængende tapninger i, hvormed spidsbelastninger kan identificeres.

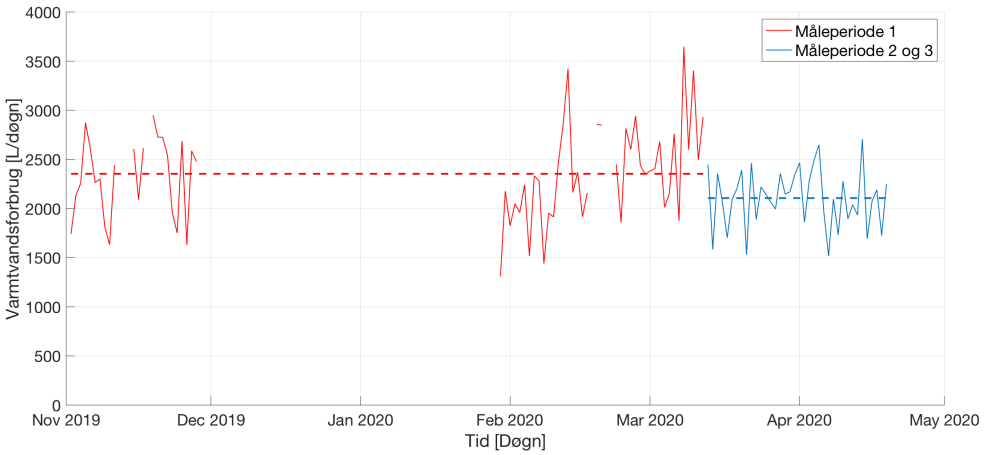
På baggrund af ovenstående er det vurderet, at en integrationstid på under 1 minut er nødvendig til bestemmelse af det præcise antal tapninger samt varigheden af disse. Derimod er det fordelagtigt at anvende en højere integrationstid end 1 sekund ved fastsættelse af spidsbelastningsperioder og sammenligning af forskellige datasæt.

Forbrugsprofiler G

Dette appendiks redegør for Aalborgkollegiets samlede varmtvandsforbrug, henholdsvis før og under Coronanedlukningen. Derudover dokumenteres og redegøres der for metode til aflæsning af de registrerede tappeprofiler for seks udvalgte tapsteder, samt resultaterne heraf.

G.1 Varmtvandsforbrug

Figur G.1 viser udviklingen i varmtvandsforbruget for Aalborgkollegiet før og under Coronanedlukningen, hvor de dertilhørende gennemsnit fremgår af tabel G.1.



Figur G.1. Udvikling i varmtvandsforbruget før og under Coronanedlukningen.

Måleperiode	**VBV-forbrug**
Måleperiode 1 - før Coronanedlukningen	2354 L/døgn
Måleperiode 2 og 3 - efter Coronanedlukningen	2106 L/døgn

Tabel G.1. Gennemsnitlige varmtvandsforbrug for Aalborgkollegiet, henholdsvis før og under Coronanedlukningen.

Af figur G.1 fremgår det, at varmtvandsforbruget er lavere under Coronanedlukningen. På baggrund af observationer og udtalelser fra beboerne, skyldes faldet i varmtvandsforbruget formentligt, at nogle beboere er bortrejst fra kollegiet som følge af nedlukningen, jævnfør spørgeskemaundersøgelsen i kapitel C.

G.2 Metode til identificering af tapninger

Grundet manglende, pålidelig flowdata fra flowmålerne på de forskellige tapsteder, er flowmålernes temperaturprofiler i stedet anvendt til at estimere tidspunkt og varighed for hver tapning. Den manglende pålidelige flowdata fra flowmålerne gør, at de reelle flows, og dermed forbrug, ikke kendes med 100 % nøjagtighed. For at lave et estimat af forbrugene, er der derfor anvendt et gennemsnit af de maksimale flows, der blev målt for den pågældende type tapsted under verificeringen af flowmålerne, beskrevet i Appendiks E. De anvendte gennemsnitflows er vist i tabel G.2.

På baggrund af ovennævnte, er forbrugene estimeret ved at multiplicere tapningernes varighed med det estimerede flow for den pågældende type tapsted, som beskrevet med formel (G.2).

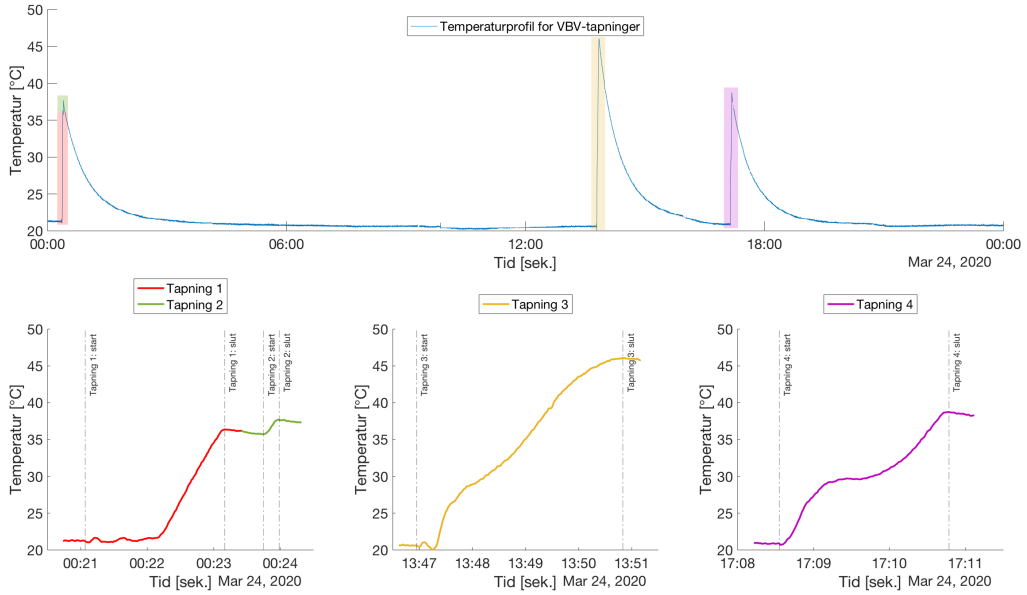
$$\text{Volumen[L]} = \text{Varighed[sek.]} \cdot \text{Flow[L/sek.]} \tag{G.1}$$

Tapsted type	**Flow [L/sek.]**
Køkkenvask	0,088
Håndvask	0,046
Bruser	0,075

Tabel G.2. Gennemsnit af maksimumflows målt ved verificering, beskrevet i Appendix E. Flowene anvendes til estimering af forbrug ved de pågældende tapsteder.

På baggrund af en undersøgelse af variationer i flowdataene for de udvalgte tapsteder, er det vurderet, at der oftest benyttes maksimumflow ved håndvaske og brusere, hvorfor verificeringsværdierne her er anvendt direkte. For køkkenvaske blev der observeret store variationer i forhold til flowmålernes maksimalt registrerede flow, hvorfor der her er taget højde for afvigelsen mellem det gennemsnitlige flow og det maksimalt registrerede flow for hver køkkenvask. Heraf blev det bestemt, at de gennemsnitlige flows udgør 12 og 33,5 % af de maksimalt registrerede flows for henholdsvis køkken 3.2 og køkken 2.1, hvilke er multipliceret med det målte flow på 0,088 L/sek. fra verificeringen.

Identificeringen af tapningerne med varmt brugsvand er foretaget ved manuel aflæsning af temperaturprofilerne for hvert tapsted. Som eksempel viser figur G.2 et temperaturprofil for en håndvask over et døgn, hvor der er registreret 4 tapninger af varmt brugsvand. Hver tapning er markeret med sin egen farve.



Figur G.2. Metode til identificering af varmt brugsvandstapninger ud fra temperaturprofilet.

Som vist på figur G.2, er det vurderet, at en tapning starter, når der er registreret en hurtig ændring i temperaturen, og at tapningen stopper umiddelbart inden temperaturen begynder at falde. Alle tapninger er identificeret på denne måde.

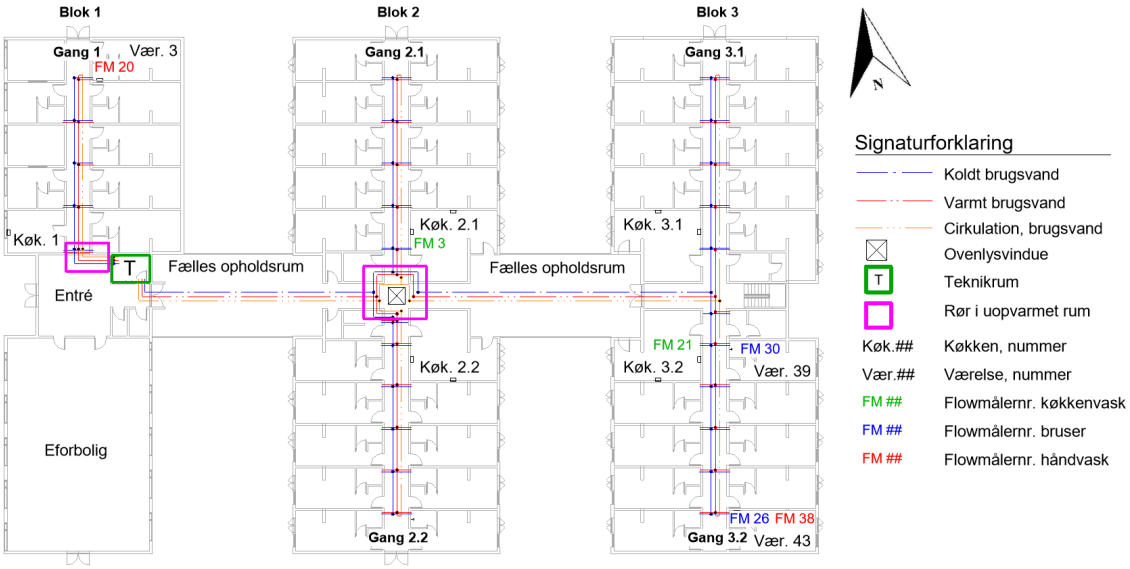
G.3 Analyse af forbrugsmønstre for udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet

Dette appendiks præsenterer Huba flowmålerdata for udvalgte tapsteder på Aalborgkollegiet, herunder to køkkenvaske, to håndvaske og to brusere, som er fordelt på 5 rum. Appendikset har til formål at give eksempler på tappeprofiler, som forekommer på Aalborgkollegiet. Dataopsamlingen er foretaget i perioden 13/3 - 24/3-2020, hvor Coronanedlukningen i henhold til afsnit 6.2 bevirkede, at forbrugsmønstrene ændrede sig for hverdagene.

I henhold til metoden til aflæsning af tapninger, beskrevet i Appendiks G.2, er varmtvandsforbrugene pr. tapning blot et estimat, hvorfor der her er en stor usikkerhed. I modsætning hertil, er både antal, varighed og tidspunkt en reel afspejling af de foretagede tapninger på Aalborgkollegiet.

Huba flowmålerdataene danner grundlag for sammensætningen af de kunstige forbrugsprofiler til simulering af Aalborgkollegiet, beskrevet i kapitel 11.

Figur G.3 viser placeringen af de forskellige Huba flowmålere, som er anvendt til dataopsamling ved tapstederne.



Figur G.3. Oversigt over placering af flowmålere. Dette er samme figur som figur 3.5.

Af figur **??** kan det ses, at der for værelse 43 både er målt bruser og håndvask, imens der for de øvrige rum kun er målt ved ét tapsted pr rum.

G.4 Tappeprofiler - Køkkener

Følgende afsnit præsenterer de generelle tendenser, observeret for køkkenvasken i henholdsvis køkken 2.1 og 3.2 på Aalborgkollegiet i perioden 13/3 - 24/3-2020, vist på figur **??**.

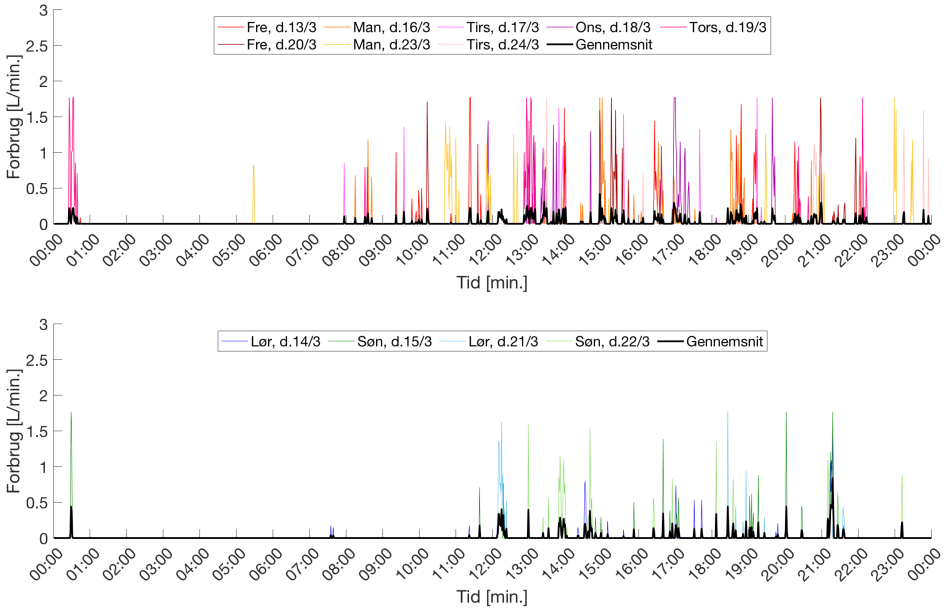
Begge køkkener har det tilfælles, at de benyttes af ni beboere og indeholder to køkkenvaske pr. køkken. Da der for hvert køkken kun måles på én køkkenvask ud af to, viser tappeprofilerne kun et halvt billede af køkkenernes samlede varmtvandsforbrug. Årsagen til denne fordeling skyldes tekniske problemer med Huba flowmålerne på de øvrige køkkenvaske, jævnfør kapitel 3.2. Der er ingen opvaskemaskiner i fælleskøkkenerne. Køkkenvaskene benyttes derfor både til madlavning og opvask.

I overensstemmelse med konklusionen i Appendiks F, er tappeprofilerne lavet med en integrationstid på 1 minut, for at opnå de mestpræcise tappeprofiler, dog er sammenligningen af de to køkkener foretaget med en integrationstid på 1 time, med henblik på at vise de generelle tendenser.

I køkkenet er der foretaget målinger af ventetiden for det varme brugsvand. Da disse tapninger ikke er en del af beboernes naturlige forbrugsmønstre, er tapningerne til måling af ventetid sorteret fra de præsenterede måledata.

Køkkenvask, køkken 2.1

Figur G.4 viser tappeprofilerne for køkken 2.1 inddelt i hverdage og weekender.



Figur G.4. Tappeprofiler for køkken 2.1 med en integrationstid på 1 minut, inddelt i henholdsvis hverdage og weekender.

Af figur G.4 fremgår det, at der er en jævn fordeling af tapningerne, ved sammenligning af samtlige døgn i måleperioden, men at der for de enkelte døgn er stor variation i tappetidspunkter. Derudover ses en tydelig tendens til, at tapningerne primært forekommer i tidsrummet 09:30 - 22:15 for hverdage, og i tidsrummet 11:20-21:30 for weekender, hvor der for både hverdage og weekender er undtagelser for enkelte døgn.

For de enkelte hverdage forekommer der ofte mange tapninger efter hinanden inden for en periode på op til ca. 30 minutter, hvilket kan afspejle følgende to muligheder:

- Den samme beboer anvender køkkenvasken flere gange med kort mellemrum i forbindelse med madlavning og opvask
- Flere beboere anvender køkkenvasken kort mellemrum i forbindelse med madlavning og opvask

Ved sammenligning af forekomsten af tapninger for de forskellige hverdage fremgår det, at der er stor variation i tidsrummene for, hvornår der tappes på de forskellige hverdage. Dette kan skyldes, at nogle af beboere på den dertilknyttede gang er bortrejst i måleperioden, i henhold til spørgeskemaundersøgelsen i kapitel C. Derudover kan det skyldes, at beboerne har benyttet køkkenets anden køkkenvask, hvor der ikke er foretaget dataopsamling.

På tværs af hverdagene forekommer den største koncentration af tapninger i tidsrummet 12:50 - 14:00, hvor beboerne formentligt holder frokostpause.

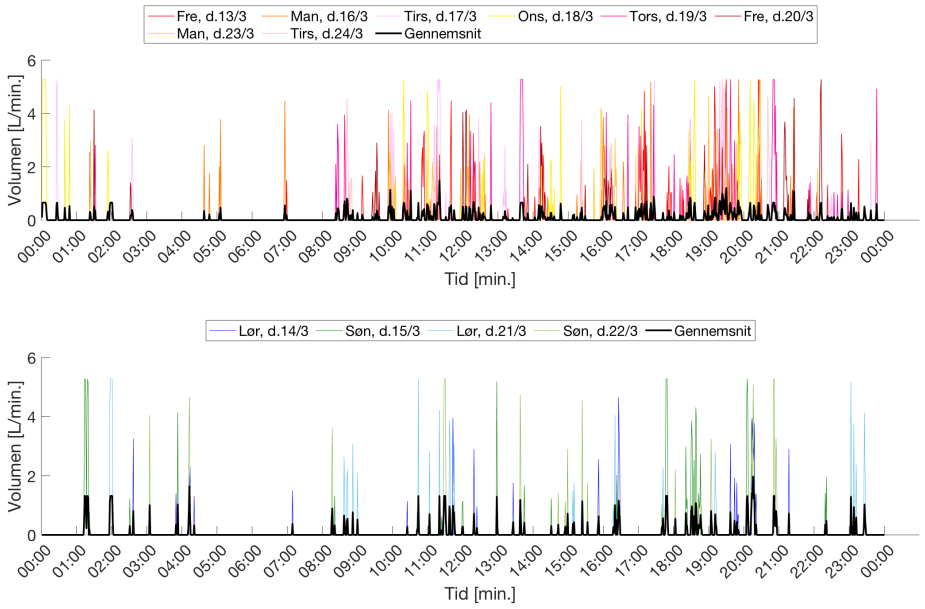
For enkelte hverdage er der desuden observeret tapninger, som tidsmæssigt adskiller sig fra de øvrige tapninger, som for eksempel tapningerne mellem kl. 00:25 - 00:45 fredag d. 13/3 og torsdag d. 19/3-2020, samt tapningerne mellem kl. 23:00 - 00:00 mandag og tirsdag d. 23 - 24/3-2020. Da det kun er enkelte døgn, hvor tapninger forekommer i disse tidsrum, er det sandsynligt at forbrugene skyldes enkelte beboere, som har en anden døgnrytme end

de resterende beboere, eller at forskellige beboere hver har nogle enkelte døgn, hvor de går senere i seng end de plejer.

For weekenderne fremgår det, at spredningen af tapninger er væsentligt mindre, sammenlignet med hverdage, hvilket formentligt skyldes, at beboerne sover længere og ikke har samme faste rutiner som i hverdagene. På tværs af weekenderne forekommer den største koncentration af tapninger i køkken 2.1 mellem kl 21:10-21:35, hvor der forekommer tapninger for alle de afbildede døgn.

Køkkenvask, køkken 3.2

Der er foretaget en analyse af en køkkenvask i køkken 3.2, på samme måde som for køkken 2.1.



Figur G.5. Tappeprofiler på timebasis for køkken 3.2, inddelt i henholdsvis hverdage og weekender.

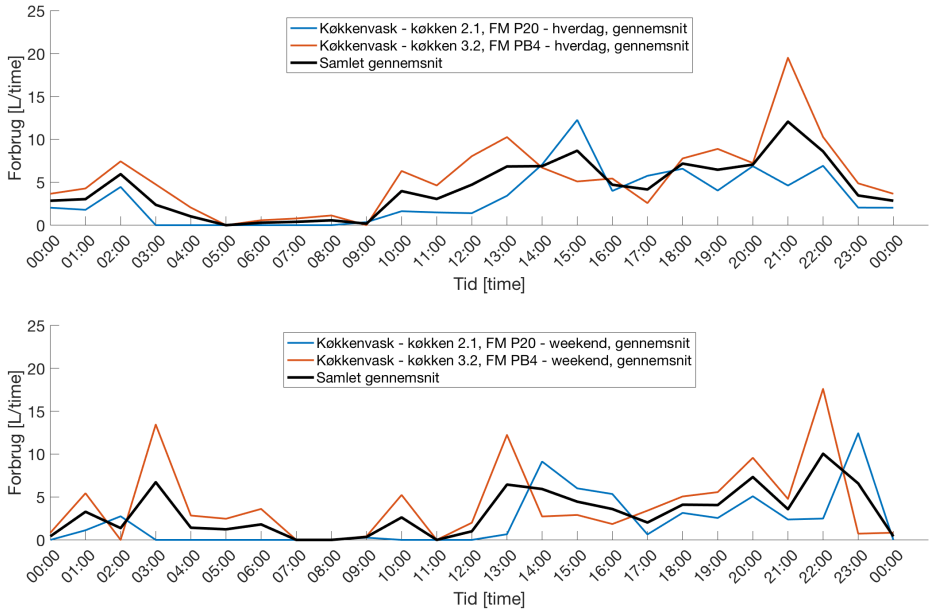
Af figur G.5 fremgår det, at køkkenvasken i køkken 3.2 har en stor koncentration af tapninger og at tapningerne er spredt ud over de fleste timer i døgnet, både for hverdage og weekender. De største koncentrationer af tapninger er observeret for hverdage i tidsrummene 10:30 - 11:15, 12:00 - 12:30 og 19:00 - 20:00, hvoraf den største aftenspidsbelastning forekommer i sidstnævnte tidsrum. Udover de største spidsbelastninger, forekommer der også et forbrug i nattetimerne, her særligt mellem kl. 00:00 - 01:00, men ved sammenligning med de individuelle hverdagsprofiler fremgår det, at dette forbrug primært skyldes tapninger onsdag d. 18/3.

For weekendprofilerne er tapningerne spredt ud over næsten alle døgnets timer. Det største antal tapninger forekommer i tidsrummet mellem kl. 11:30 - 12:00, 18:15 - 19:00 og 20:00 - 20:15, hvoraf sidstnævnte har den største koncentration af tapninger for alle måledagene, hvilket ses ud fra det øgede gennemsnit i denne tidsperiode.

Sammenligning af køkkenvaske

Der er foretaget en sammenligning af køkkenvasken i henholdsvis køkken 2.1 og 3.2 for at udlede, hvilke generelle karakteristika, de to køkkenvaske har tilfælles, og hvilke, der skyldes tilfældigheder i beboernes forbrugsmønstre. Til analyse af generelle tendenser, er det vurderet, at summerede værdier på timebasis giver det bedste overblik.

Figur G.6 viser en sammenligning af det gennemsnitlige hverdags- og weekendprofil for henholdsvis køkken 2.1 og 3.2, hvor profilerne er summeret op pr. time.



Figur G.6. Sammenligning af henholdsvis det gennemsnitlige hverdagsprofil og weekendprofil for køkkenvasken i køkken 2.1 og køkken 3.2.

Af figur G.6 fremgår det, at køkkenvasken i køkken 3.2 har den største spredning, samt det største varmtvandsforbrug på baggrund af den anvendte estimering af varmtvandsforbrug, beskrevet i Appendiks G.2.

Den øgede spredning af tapningerne kan skyldes forskellige årsager, herunder en højere, generel aktivitet i køkken 3.2, at flere af beboerne tilknyttet køkken 3.2 er hjemme, eller at tapningerne er ulige fordelt på hvert køkkens to køkkenvaske. For at verificere, hvad forskellen skyldes, er det nødvendigt at foretage målinger i begge køkkenvaske i hvert køkken, hvilket grundet tekniske problemer desværre ikke har været muligt i dette projekt.

For hverdagsprofilerne forekommer der forbrug i nattetimerne for begge køkkener, hvilket viser, at dette er almindeligt forekommende. Det er vurderet, at denne nataktivitet enten skyldes få beboere med en atypisk døgnrytme, eller at forskellige beboere er sent oppe på forskellige hverdage. For begge hverdagsprofiler sker der en stigning i antallet af tapninger efter kl. 08:00, dog med en væsentlig forskel i enten antal tapninger eller tapningernes varighed. Denne væsentlige forskel ses frem til kl. 15:00. Den største afvigelse forekommer om aftenen, hvor hverdagsprofilet for køkken 3.2 har en spidsbelastning i tidsrummet 19:00-20:00, imens hverdagsprofilet for køkken 2.1 har et jævntfordelt forbrug i samme periode.

For de to weekendprofiler er der observeret en overvejende overensstemmelse i tidsrummet 10:00-22:00, hvor forbrugene i weekendprofilet for køkken 2.1 er forskudt med en time sammenlignet med weekendprofilet for køkken 3.2. Udenfor det førnævnte tidsrum forekommer der til gengæld større spredning for køkken 3.2, end i køkken 2.1, hvilket kan skyldes, at tapninger i køkken 2.1 dette tidsrum er foretaget ved køkkenets anden køkkenvask, eller at beboerne har en mere ensartet døgnrytme og rutine.

På baggrund af ovenstående kan det konkluderes, at begge køkkener primært har tapninger fra kl. 12:00 - 22:00, hvoraf køkken 3.2 har de største spidsbelastninger.

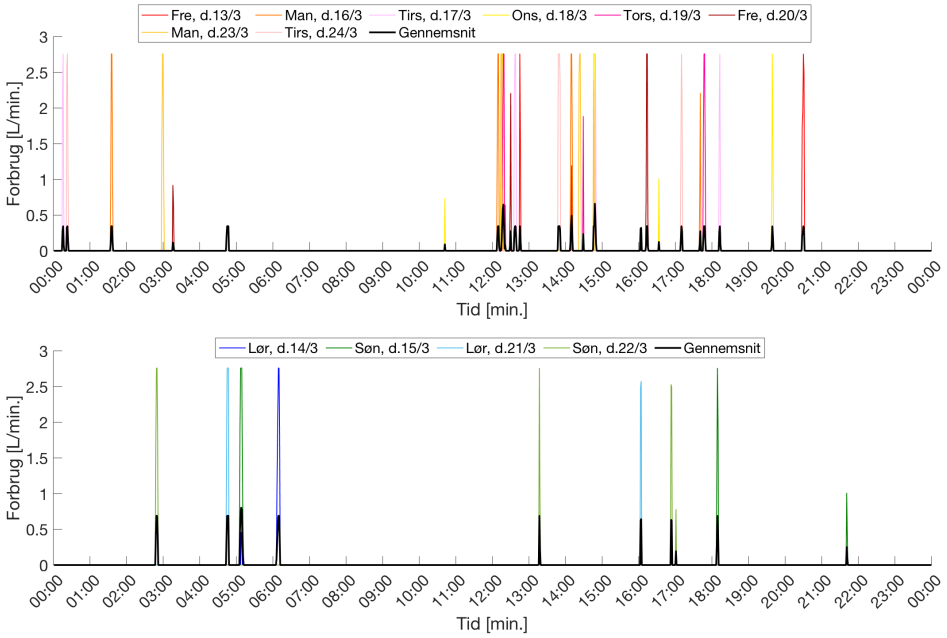
G.4.1 Håndvask

Dette afsnit præsenterer tappeprofilerne for håndvasken i henholdsvis kollegieværelse 3 og 43, vis placering er vist på figur **??**. Håndvaskene på Aalborgkollegiet adskiller sig fra køkkenvaskene ved, at de er placeret på hvert sit kollegieværelse, hvorfor de primært benyttes af den samme person, hvilket giver mere ensartede tappeprofiler. Profilerne i det følgende afsnit vises med summerede værdier på minutbasis, for derved at opnå et detaljeret indblik i beboernes tappeprofiler, med undtagelse af tappevarighed, da denne varierer mellem 12-242 sekunder.

På baggrund af observationerne for de to håndvaske, kan det konkluderes, at tappeprofilerne på henholdsvis kollegieværelse 3 og 43 afspejler to vidt forskellige forbrugsmønstre. Beboeren på kollegieværelse 43 har en typiske arbejdsdag, og er derfor ude af hjemmet i en tidsperiode mellem ca. kl. 7:00 - 15:00, hvorimod beboeren på kollegieværelse 3 går sent i seng og sover til omkring middagstid.

Håndvask, kollegieværelse 3

Tappeprofilerne for håndvasken på kollegieværelse 3 er vist på figur G.7.



Figur G.7. Tappeprofil på minutbasis for håndvasken i kollegieværelse 3, vis placering er vist på figur 3.5. Profilet er inddelt i henholdsvis hverdage og weekender med dertilhørende gennemsnit.

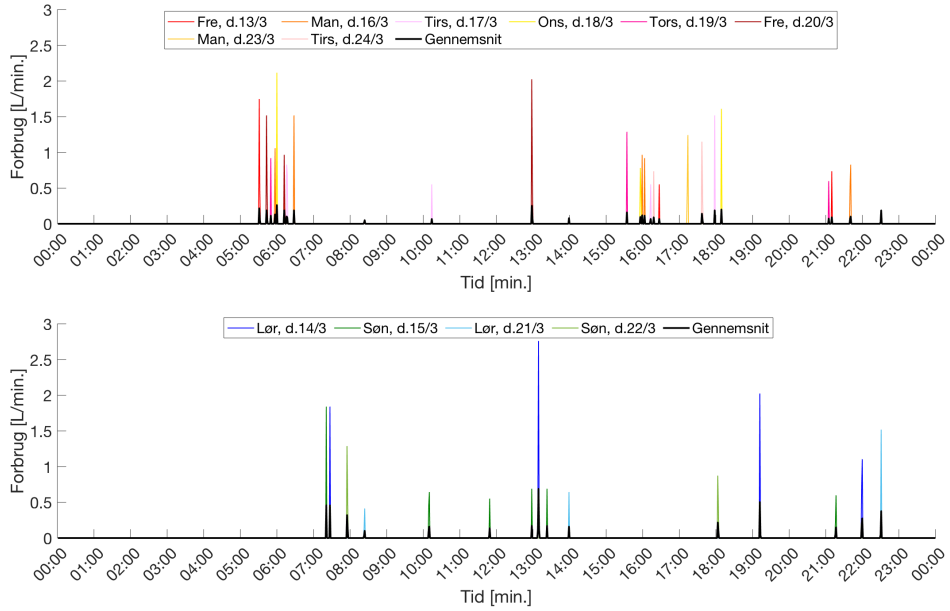
Af figur G.7 fremgår det, er der for hverdage forekommer en generel morgenspidsbelastning for værelse 3 mellem kl. 12:00 - 12:45, hvor der som minimum foretages en tapning i alle hverdage, undtagen én. At dette er en morgenspidsbelastning er vurderet ud fra, at der i 5 ud af 8 døgn, foretages tapninger i nattetimerne, efterfulgt af en periode uden tapninger.

Efter morgenspidsbelastningen ses samme mønster mellem kl. 14:00 - 15:00, dog med større spredning, hvorefter der forekommer der en væsentligt større forskel på tappetidspunkterne for de forskellige hverdage.

På baggrund af det observerede forbrugsmønster for hverdage, kan det konkluderes, at beboeren på kollegieværelse 3 har en atypisk døgnrytme, i forhold til en typisk arbejdsdag, hvor man studerer eller arbejder mellem kl. 08:00 - 16:00. Beboerens døgnrytme kan være påvirket af Coronanedlukningen, som gør, at beboeren arbejder hjemmefra. Det observerede forbrugsmønster for hverdage stemmer overens med, hvad der kan ses i weekenden, dog er beboeren generelt længere oppe og der forekommer ingen spidsbelastning.

Håndvask, kollegieværelse 43

Tappeprofilerne for håndvasken på kollegieværelse 43 er vist på figur G.8.



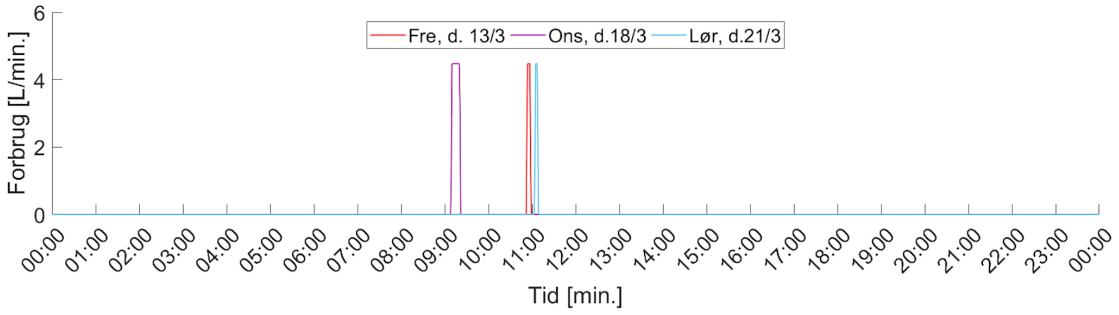
Figur G.8. Tappeprofil på minutbasis for håndvasken i kollegieværelse 43, vis placering er vist på figur 3.5. Profilet er inddelt i henholdsvis hverdage og weekender med dertilhørende gennemsnit.

Af figur G.8 fremgår det, at beboeren på kollegieværelse 43 har en fast morgenrutine mellem kl. 05:30 - 06:30 på hverdage. Ud fra hverdagsprofilernes lave forekomst af tapninger mellem kl. 07:00-15:00, formodes denne beboer at have en beskæftigelse, som ikke er omfattet af Coronanedlukningen, hvilket ligeledes er observeret under testninger foretaget på Aalborgkollegiet om morgenen, hvor beboeren har været iklædt arbejdstøj. Derfor er disse hverdagsprofiler vurderet til at afspejle forbrugsmønsteret for typiske hverdage, hvor beboeren tager hjemmefra mellem kl. 06:00 - 07:00 og kommer hjem kl. 15:30 eller senere. Dette er dog med undtagelse af tirsdag d. 17/3-2020 og fredag d. 20/3-2020, hvilket kan skyldes henholdsvis fridage eller at beboeren har tidligt fri på udvalgte dage. Beboeren foretager kun et begrænset antal tapninger efter kl. 18:00, hvilket enten skyldes, at beboeren går tidligt i seng, eller ikke benytter varmt brugsvand så ofte i dette tidsrum.

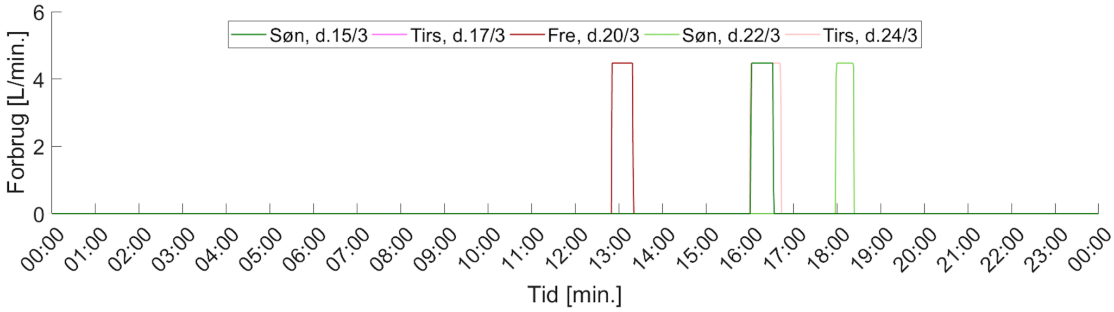
Ved sammenligning af hverdagsprofilerne og weekendprofilerne fremgår det, at morgenspidsbelastningen forsvinder i weekenderne og at forbruget har en større spredning i tappetidspunkterne på tværs af de døgnene.

G.4.2 Bruser

Brusebadstapningerne adskiller sig fra øvrige tappetyper ved, at der her kun er registreret maksimum én tapning pr. døgn pr. kollegieværelse, hvor tapningen generelt er af længere varighed, sammenlignet med de observerede tappevarigheder for køkken- og håndvaske. Af denne årsag er måledataene ikke inddelt i hverdage og weekender. Brusebadene er målt i kollegieværelse 39 og 43, hvorved kollegieværelse 43 både bidrager med måledata for en håndvask og bruser. Figur G.9 og G.10 viser tappeprofilerne for brusebadene for henholdsvis kollegieværelse 39 og 43.



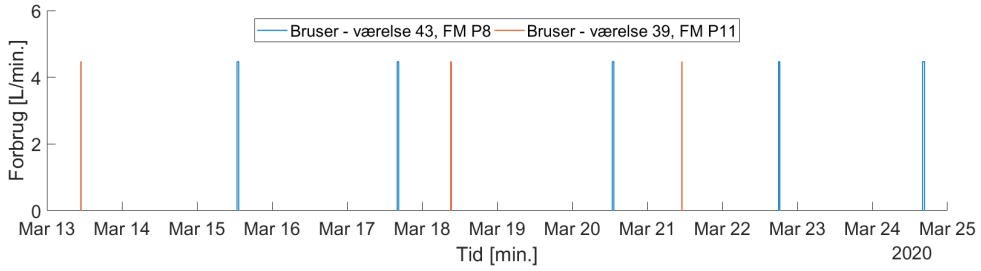
Figur G.9. Tappeprofiler for brusebade på for kollegieværelse 39.



Figur G.10. Tappeprofiler for brusebade på kollegieværelse 43.

Som det fremgår af figur G.9, går beboeren på værelse 39 fortrinsvist i bad om formiddagen, hvor beboeren på værelse 43, vist på figur G.10, går i bad om eftermiddagen. For hver af de to brusere, forekommer der 2 tapninger på forskellige døgn inden for samme tidsrum, hvilket er henholdsvis kl. 11:00 og 16:00. Af de to førnævnte figurer kan der ses en væsentlig forskel i tappevarigheden, hvor der for kollegieværelse 39 og 43 er en gennemsnitsvarighed på henholdsvis 7 og 32 min .

Udover varighederne, er der observeret en forskel i hyppigheden af brusebadene, hvilket kan ses i figur G.11.



Figur G.11. Tappetidspunkter for bruseren i kollegieværelse 39 og 43.

Figur G.11 viser, at der for kollegieværelse 39 typisk går 3-5 døgn mellem hvert bad, hvor det for kollegieværelse 43 kun går 2-3 døgn mellem hvert bad.

Som det fremgår af ovenstående redegørelse, er der stor variation i de to beboeres forbrugsmønstre, både hvad angår tidspunkt, varighed og hyppighed. Dette viser, at der

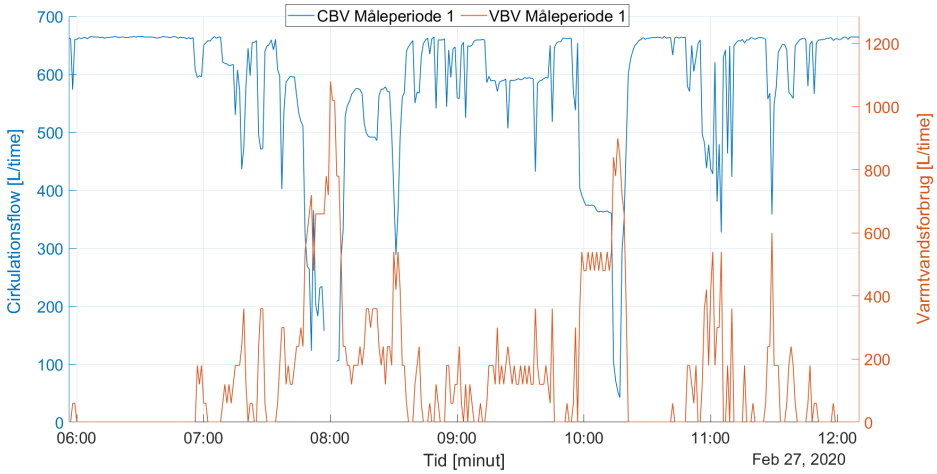
kan være stor variation i forbrugsmønstre afhængigt af de individuelle beboere.

Cirkulation H

I det følgende Appendiks er der præsenteret forskellige figurer, der er anvendt, til undersøgelse af cirkulationen i forhold til parametre såsom cirkulationsflowets udvikling samt bestemmelse af fjernvarme til dækning af cirkulationstab.

Cirkulation og varmtbrugsvand

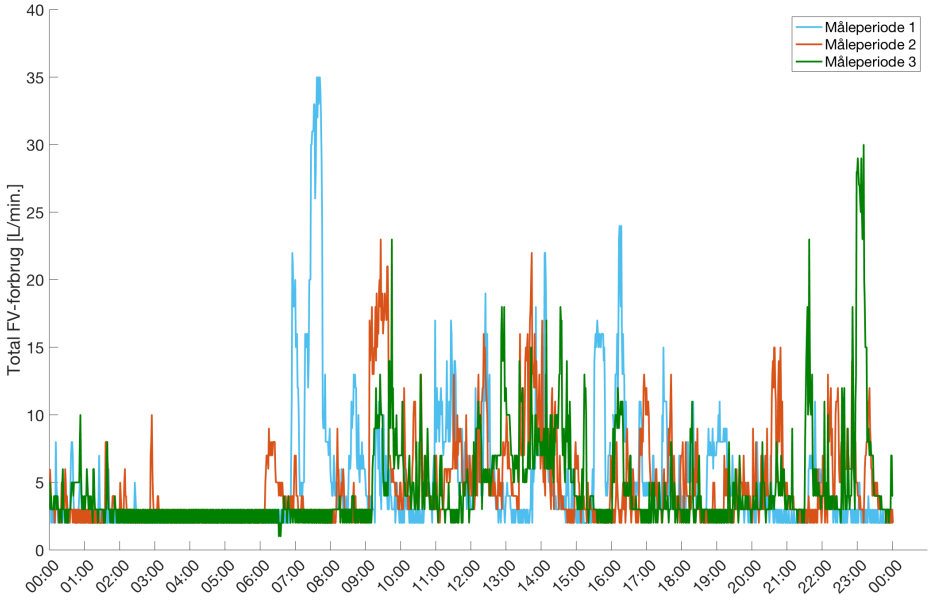
Figur H.1 viser hvorledes cirkulationsflowet varierer ved varmtvandsforbrug.



Figur H.1. Cirkulationsflows og varmtvandsforbrug på minutbasis for en udvalgt tidsperiode i måleperiode 1.

Fjernvarmeforbrug

Figur H.2 viser varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug på minutbasis for tre tilfældige døgn; et for hver måleperiode.



Figur H.2. Fjernvarmeforbrug for Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystem på et udvalgt døgn for hver af de tre måleperioder.

Effektivitet I

I det følgende Appendiks er der præsenteret forskellige figurer, der er anvendt, til undersøgelse og bestemmelse af Aalborgkollegiets varmt brugsvandssystems effektivitet henholdsvis inklusion og eksklusiv cirkulation.

Gennemsnitsværdier for hver måleperiode

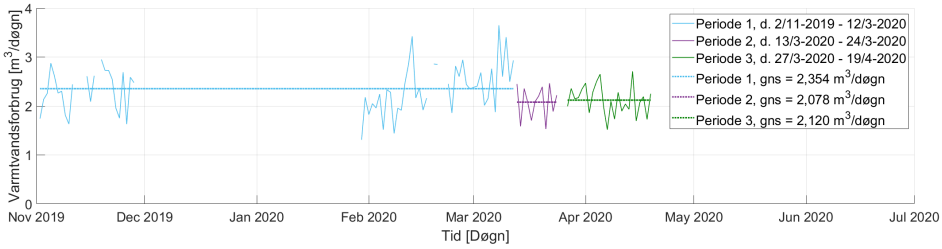
Gennemsnitsværdierne der er afbillede på de følgende figurer for henholdsvis varmt brugsvand, fjernvarmeforbrug fjernvarmeafkøling fremgår af tabel I.1.

Måleperiode	VBV-forbrug m^3/døgn	Total FV til VBV-system m^3/døgn	Fjernvarme afkøling °C
1	2,354	6,42	16,08
2	2,078	6,19	15,94
3	2,120	6,32	15,38

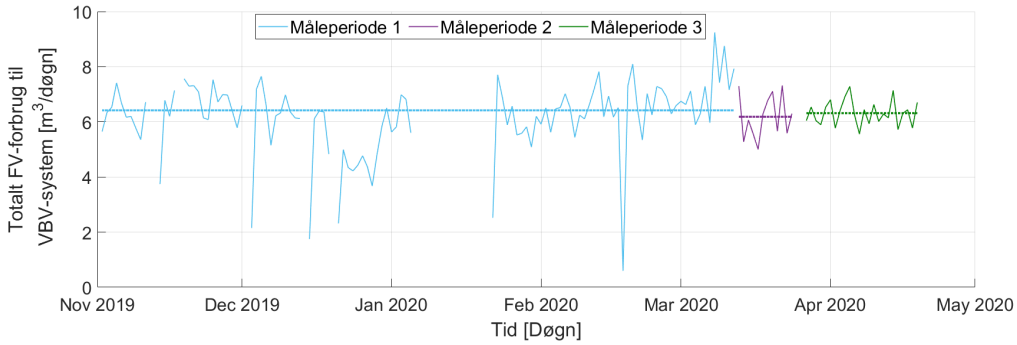
Tabel I.1. Gennemsnitsværdier for varmt brugsvandssystemets varmtvands- og fjernvarmeforbrug, samt fjernvarmeafkøling for de tre måleperioder.

Forbrug af varmt brugsvand og fjernvarme for hver måleperiode

Figur I.1 viser Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug, summeret på døgnbasis samt et gennemsnit heraf, for hver måleperiode, hvor figur I.2 viser varmt brugsvandssystemets fjernvarmeforbrug inklusiv cirkulation.



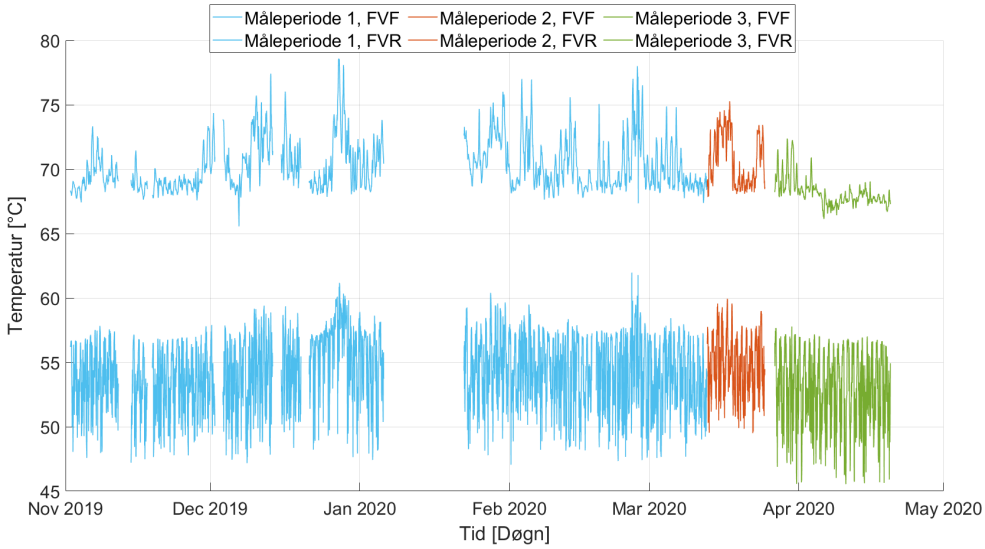
Figur I.1. Aalborgkollegiets varmtvandsforbrug summeret på døgnbasis samt et gennemsnit heraf for henholdsvis hver måleperiode.



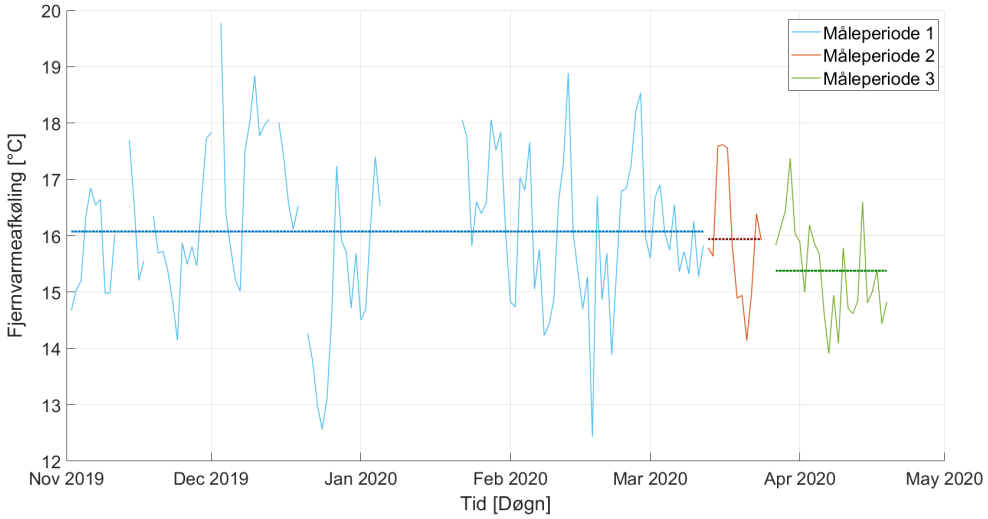
Figur I.2. FV-forbrug til VBV-systemet inklusiv genopvarmning af cirkulation

Fjernvarmetemperatur samt afkøling

Fjernvarmetemperaturerne og vekslerens fjernvarmeafkøling er vist på henholdsvis figur I.3 ud fra gennemsnitlige timeværdier og I.4 på døgnbasis for hver måleperiode.



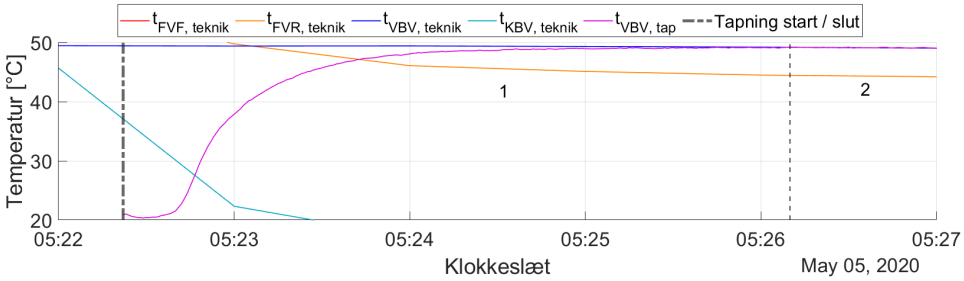
Figur I.3. Frem- og returløbstemperatur for fjernvarme til og fra veksleren.



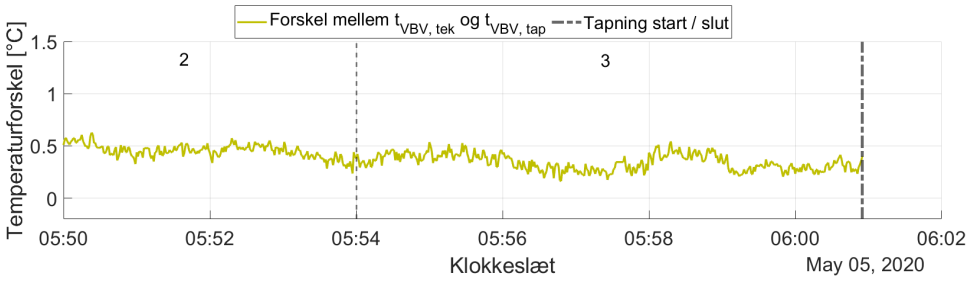
Figur I.4. Vekslerens fjernvarmeafkøling for alle tre måleperioder.

Energiforbrug og -tab, tapning 5

J



Figur J.1. Temperaturprofiler for tapning 5 i tapningens første 4,5 minut.

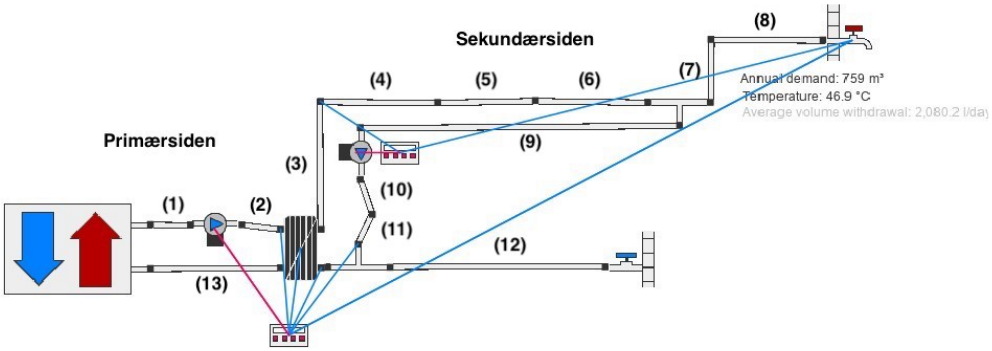


Figur J.2. Temperaturforskel mellem varmt brugsvand i teknikrum og ved tapsted.

Polysun K

Dette Appendiks beskriver de inputværdier, som er anvendt i Polysun-modellen, samt baggrunden, der ligger til grund for disse.

I det følgende præsenteres de anvendte inputværdier til opbygningen af en simpel Polysun-model med ét tapsted for hele Aalborgkollegiet, som er anvendt til simulering af forskellige simuleringsforslag. Modellen er opbygget med udgangspunkt i Aalborgkollegiets eksisterende forhold, hvor de anvendte inputværdier til modellopbygningen er bestemt ud fra visuelle inspektioner og måledata. Den simple Polysun-model kan ses på figur K.1. hvor værdierne i parentes angiver forskellige rørtyper med varierende rørlængder, rørstørrelser samt isoleringstykkelser. De anvendte rørtyper kan ses i tabel K.3 i afsnit K.0.5 på side 180.



Figur K.1. Simpel Polysun-model af Aalborgkollegiet med ét tapsted for hele bygningen.

Rør (5) og (10) er som de eneste placeret i et uopvarmet rum. Placeringen i uopvarmet rum skyldes, at disse rør skal rundt om et ovenlysvindue, hvorfor rørene går op på loftet, som beskrevet i kapitel 3.1, hvor rørføringen i stueetagen ligeledes kan ses.

K.0.1 Varmt brugsvandvand

I Polysun er tapningerne med varmt brugsvand defineret ud fra et tappeprofil, der indeholder et tidsstep på 1 minut og en dertilhørende tappevolumen. Tappeprofilerne er bestemt ud fra en udarbejdelse af kunstige forbrugsprofiler, med udgangspunkt i måledata fra Brunata energimålerne og Huba flowmålerne. Udarbejdelse af de kunstige forbrugsprofiler er beskrevet i afsnit 11.2.

På baggrund af måledata, er Aalborgkollegiets samlede varmtvandsforbrug bestemt til $759\,\mathrm{m}^3$/år, hvor tappetemperaturen er bestemt til 46,5 °C ud fra stationære forhold, omtalt i afsnit 10.2.

K.0.2 Energikilde

Aalborgkollegiet forsynes med fjernvarme til produktion af varmt brugsvand, hvilket i Polysun kan simuleres ved brug af en "Energy sink/source". Inputværdierne for den anvendte "Energy sink/source" er præsenteret i tabel K.1.

Parameter	Inputsværdi
Fremløbstemperatur	70,8 °C
Returløbstemperatur	54,9 °C
Effekt	263 230 W

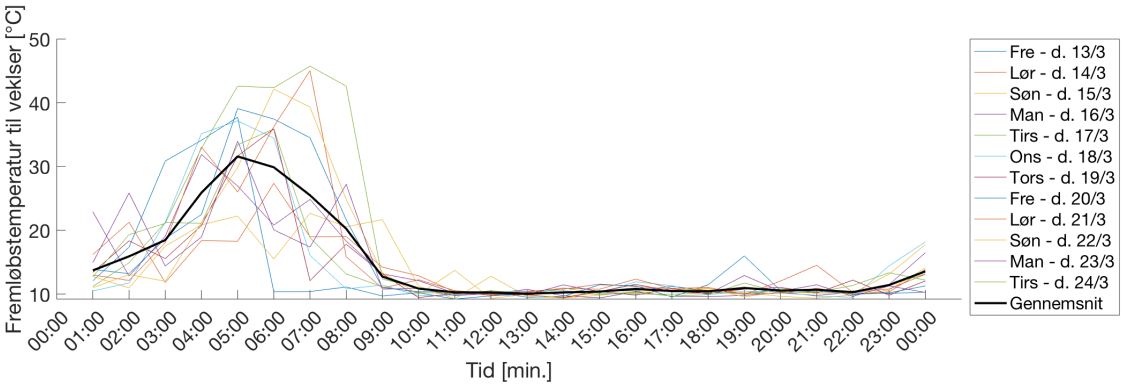
Tabel K.1. Inputværdier for modellering af energikilden "Energy sink/source", som kan fungere som fjernvarme i Polysun.

Fjernvarmetemperaturerne er bestemt ud fra måledata fra Brunata energimåler nr. 30, der er placeret på vekslerens primærside i teknikrummet, som beskrevet i afsnit 3.2. For henholdsvis fjernvarmens frem- og returløb, er der anvendt en gennemsnitsværdi beregnet på tværs af hvert døgn i måleperiode 2, fra d. 13/3 - d. 24/4-2020.

Fjernvarmeeffekten, vist i tabel K.1, er bestemt ud fra den spidsbelastning, som de kunstige forbrugsprofiler kræver af veksleren, samt den gennemsnitlige temperaturforskel mellem varmt og koldt brugsvand.

K.0.3 Koldt brugsvand

For det kolde brugsvand, der leveres til veksleren, er det er valgt at anvende en konstant gennemsnitstemperatur. Gennemsnitstemperaturen er bestemt ud fra den laveste koldt brugsvandstemperatur for hvert døgn, på baggrund af Brunata energimålerdata fra måleperiode 2. Anvendelsen af en gennemsnitstemperatur skyldes, at der er registreret en stigning i koldt brugsvandstemperaturen fra omkring midnat til om morgenen, hvor de første varmt brugsvandstapninger påbegyndes. Stigningen i koldt brugsvandstemperaturen fremgår af figur K.2.



Figur K.2. Måledata for koldt brugsvandstemperaturen, som leveres til veksleren, samt et tilhørende gennemsnit.

Det er vurderet, at stigningen i koldt brugsvandstemperaturen, vist på figur K.2, vil resultere i et forkert resultat i Polysun-simuleringerne, da de kunstige forbrugsprofiler for

varmt brugsvandstapninger, beskrevet i afsnit 11.2, ikke har samme varmtvandsforbrug på nøjagtig samme tidspunkt som de reelle tapninger på Aalborgekollegiet, hvormed det kunstige temperaturprofil for koldt brugsvand enten vil falde for hurtigt eller langsomt afhængig af det pågældende varmtvandsforbrug. Derudover er det observeret, at koldt brugsvandstemperaturen hurtigt falder ved påbegyndelse af tapninger, som det fremgår af måledata fra de individuelle døgn på figur K.2.

Den konstante gennemsnitstemperatur for koldt brugsvand er bestemt til 10,27 °C. Grundet anvendelsen af de laveste koldt brugsvandstemperaturer, repræsenterer den fundne gennemsnitstemperatur derfor det tilfælde, hvor der skal anvendes mest energi til produktionen af varmt brugsvand.

K.0.4 Produktion af varmt brugsvand

Aalborgkollegiet producerer varmt brugsvand med en veksler, som forsynes med fjernvarme, som beskrevet i kapitel 3.1. Veksleren er placeret i bygningens teknikrum, vist på figur 3.4 på side 20.

Inputværdierne til Polysun for veksleren vedrørende geometri, isolering og effektivitet, fremgår af tabel K.2.

	Værdi	Enhed
Varmetab til opvarmet areal	18,5	[%]
Overførselstal	348	[W/K]
Total længde af spiral	22040	[mm]
Bredde	325	[mm]
Højde	760	[mm]
Ribfaktor	1	[mm]
Antal vekslerplader	29	[Stk.]
Lineær faktor	5	[-]
Friktionsfaktor	40	[-]
U-værdi for veksler	0,76	[W/m^2/K]

Tabel K.2. Inputværdier for veksleren placeret i teknikrummet på Aalborgkollegiet.

Vekslerens varmetab til opvarmede arealer, er fundet ud fra måledata fra Brunata energimåler nr. 29 og 30. Her er brutto- og nettoenergiforbrugene bestemt under stationære forhold for tapning 5, beskrevet i afsnit 10.2. Vekslerens overførselstal er ligeledes bestemt under stationære forhold, hvor nettoenergiforbruget, samt temperaturforskellen mellem det varme og kolde brugsvand, er anvendt.

Ribfaktoren er bestemt til 1, da rørene er glatte og dermed antages ikke at have nogen modstand fra riller i rørene. Da rørenes indvendige tilstand ikke kendes, kan dette være en usikkerhed.

Lineær faktor og friktionsfaktor tager højde for tryktab fra henholdsvis bøjninger og elementer, såsom ventiler samt armaturer. Da disse ikke har en væsentlig indflydelse på de ønskede resultater, er der her blot valgt standardværdi fra Polysun.

U-værdien for veksleren er beregnet ud fra tykkelsen på vekslerens isolering, hvilken er

vurderet til at være Rockwool Industribatts 50, hvor varmeledningsevnen er beregnet ud fra formel (K.1).

$$\lambda(T_m) = (3,357 \cdot 10^{-2}) + (1,533 \cdot 10^{-4} \cdot T_m) + (6,221 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^2) \quad \text{(K.1)}$$

$\lambda(T_m)$	Vekslerisoleringens varmeledningsevne ved en given medietemperatur	[W/mK]
T_m	Vekslerens medietemperatur	[°C]

Vekslerisoleringens varmeledningsevne er afhængig af medietemperaturen, der er bestemt ud fra måledata fra Brunata energimåler nr. 29. Den angivne U-værdi i tabel K.2, er et vægtet gennemsnit, beregnet på baggrund af vekslerisoleringens overfladeareal, for at tage højde for det større overfladeareal ved en vandret varmestrøm.

K.0.5 Rør i systemet

Polysun kræver kendskab til rørdimensioner, -isolering og -længder. I tabel K.3 ses rørenes materiale, dimensioner samt den totale rørlængde for de forskellige rørtyper, som er fordelt på de forskellige rørstrækninger i Polysun-modellen.

	Indre diameter [mm]	Ydre diameter [mm]	Rørets ruhed [mm]	Total længde [m]	Anvendt længde [m]	Nr.
FJV, frem	35,5	42,0	0,010	2,22	2,22	(1), (2)
FJV, retur	27,5	34,0	0,010	7,10	7,10	(13)
Hovedrør, VBV	53,5	61,0	0,002	3,45	3,45	(3)
Hovedrør, KBV	53,2	60,5	0,002	3,95	3,95	(12)
Grenrør 1 - VBV	38,3	44,8	0,002	47,1	23,55	(4), (5)
Grenrør 2 - VBV	27,7	34,2	0,002	78,9	7,6	(6)
Grenrør - CBV	27,7	34,2	0,002	130	31,15	(9),(10),(11)
Koblingsrør - VBV	21,2	26,5	0,002	98,4	4,9	(7),(8)

Tabel K.3. Inputværdier vedrørende rørdimensioner. "Anvendt længde" henviser til længden benyttet i den simple Polysun-model, hvor "Nr." henviser til placeringen af den pågældende rørtype i den simple Polysun-model, hvilket kan ses på figur K.1.

De totale rørlængder i teknikrummet er målt, hvor rørene uden for teknikrummet er estimeret ud fra en tegnet Revit-model, der er baseret på visuelle inspektioner af rørføringen. I den simplificerede Polysun-model er rørlængderne reduceret, til de længder der ses i kolonnen "Anvendt længde". Ændringen af rørlængderne er foretaget for at skabe en ligelig fordeling af tapsteder der er placeret tættere og længere fra teknikrummmet.

Den ydre rørdiameter er målt, imens den indre diameter er estimeret ud fra godstykkelsen kombineret med den ydre rørdiameter. Rørets ruhed er estimeret ud fra standardværdier i Polysun, i overensstemmelse med de specifikke rørmaterialer, som rørene er vurderet til at være lavet af, på baggrund af visuelle inspektioner i teknikrummet. Det antages endvidere, at rørføringen for henholdsvis varmt brugsvand og cirkulation anvender samme rørmateriale i hele systemet.

- Fjernvarmerør: Sorte rør
- Hovedrør i teknikrummet: Galvaniserede rør
- Grenrør og koblingsrør: Rustfrit stål

Udover værdierne i tabel K.3, skal der for rør ligeledes defineres parametre såsom højde, afstand, minimum bøjningsradius og bredde af riller. Disse vurderes at have en nulværdi, da det er glatte rør. For lineær faktor og friktionsfaktor er der blot valgt en standardværdi fra Polysun, grundet disse faktorers begrænsede indflydelse på resultaterne, hvilket ligeledes er nævnt tidligere.

Isoleringenstypen samt -tykkelsen for de forskellige rørtyper er defineret som værdierne vist i tabel K.4. Det er antaget, at der er benyttet en *Rockwool Universal Rørskål* til isolering af rørene. Ud fra førnævnte er densitet og varmekapaciteten fundet til henholdsvis 60 kg/m^3 og 800 J/kg/K.

Rørisoleringstykkelsen varierer afhængigt af den dimensionsgivende medietemperatur i røret, samt afhængigt af rørdimensionen for det pågældende rør, hvilket ses i tabel K.4.

	Varmeledningsevne [W/m/K]	Isoleringstykkelse [mm]
FJV, frem	0,048	25
FJV, retur	0,045	20
VBV	0,044	20, 30, 40, 50
KBV	0,039	0
CBV	0,044	40

Tabel K.4. Inputværdier til Polysun vedrørende rørisolering.

Varmeledningsevnen for den anvendte isoleringstype er beregnet ud fra formel (K.2). Medietemperaturen er her, ligesom for veksleren, bestemt ud fra Brunata energimåledataene, hvor en gennemsnitlig temperatur for hver rørføringstype er fundet. Ved at benytte de fundne medietemperaturer, blev rørisoleringens varmeledningsevne fundet til at være imellem 39 og 48 mW/mK, hvilket kan ses i tabel K.4.

$$\lambda(T_m) = (3,663 \cdot 10^{-2}) + (1,19 \cdot 10^{-4} \cdot T_m) + (7,235 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^2) \tag{K.2}$$

$\lambda(T_m)$	Rørisoleringens varmeledningsevne ved en given medietemperatur	[W/mK]
T_m	Rørets medietemperatur	[°C]

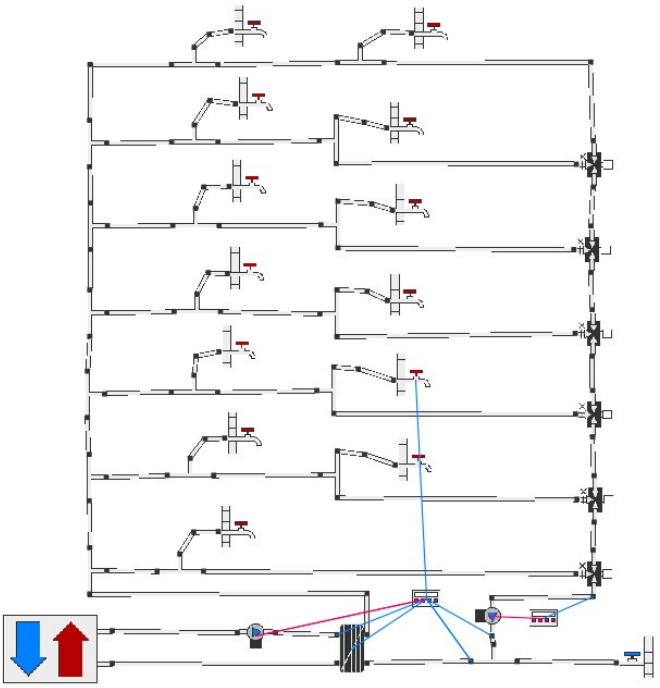
K.0.6 Pumper

Pumpen på cirkulation skal skabe et konstant flow på 700 L/h, hvilket tilsvarer flowindstillingen på cirkulationspumpen på Aalborgkollegiet.

Begrænsninger i Polysun L

Polysun er et dynamisk simuleringsprogram, der er udviklet til planlægning, design og optimering af energisystemer, ved analyse af simuleringer for op til et år. Fokusset for programmet er energisystemer, hvilket blandt andet er solvarme, solceller og varmepumpesystemer ved udnyttelse af jordvarme.

Dette appendiks redegør for de observerede begrænsninger i forbindelse med detaljeret simulering af varmt brugsvandssystemer med cirkulation, hvor der indgår mange tapsteder og hvor formålet er at optimere varmt brugsvandssystemets energiforbrug ud fra de eksisterende varmt brugsvandstemperaturer. Figur L.1 viser et eksempel på en Polysun-model med mange tapsteder og cirkulation.



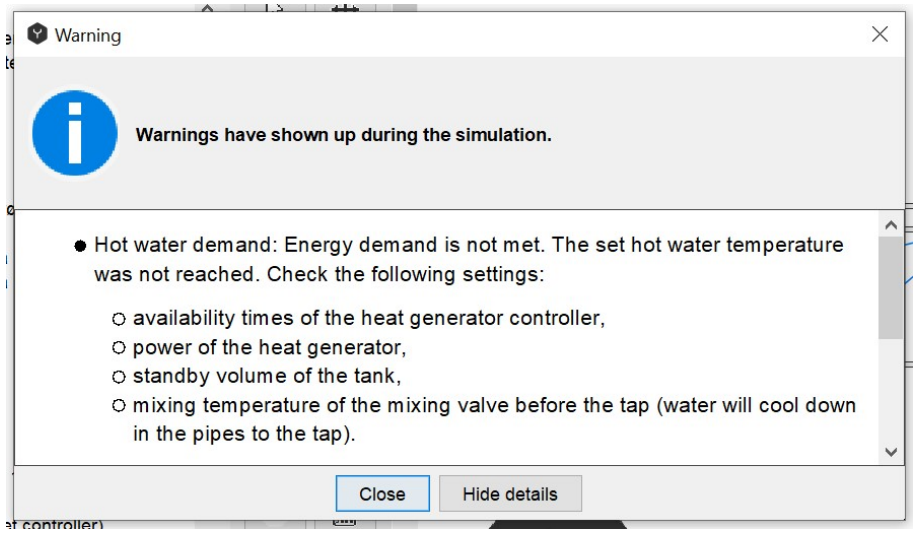
Figur L.1. Oversigt over rørføring i stueplan.

L.0.1 Antal tapsteder

Polysun er designet til simulering af overordnede varme- og brugsvandssystemer, hvor hele den pågældende bygnings varmtvandsforbrug er samlet i ét tapsted. Af denne grund kan controlleren til vekslerens primærside kun tilknyttes ét tapsted, hvorved controlleren ikke kan opretholde den nødvendige energitilførsel til veksleren, som kræves for at forsyne flere tapsteder med en tilstrækkelig varmt brugsvandstemperatur. Hertil kan det vælges

at tilknytte controlleren til det ønskede temperatursetpunkt for varmt brugsvand, som defineres ved hvert tapsted. Controllerens temperatursensor kan ikke tilknyttes et rør, da medietemperaturen i røret er varierende. Ingen af de ovennævnte muligheder giver en tilstrækkelig energitilførsel til veksleren, når der er mere end ét tapsted i varmt brugsvandssystemet.

Ovenstående situation illustreres ud fra fejlmeddelelsen, vist på figur L.2, som fremkommer ved simulering af modellen, vist på figur L.1.



Figur L.2. Fejlmeddelelse i Polysun, ved simulering med flere tapsteder.

Fejlmeddelelsen, vist på figur L.2, betyder, at varmt brugsvandstemperaturen ikke er opnået ved det pågældende tapsted, grundet utilstrækkelig energitilførsel til veksleren. Dette fremgår ligeledes ved parameteren "Availability", som er et udtryk for andelen af tiden med tapninger, hvor den ønskede varmt brugsvandstemperatur opnås. Parameteren "Availability" kan findes under "Hot water demand" i "Component results".

Ved udførelse af fejlmeddelelsens forslag vedrørende "power of the heat generator", opnås ingen forbedring, uafhængigt af, hvor meget vekslerens effekt øges.

Ovenstående betyder, at Polysun ikke er egnet til simulering af detaljerede varmt brugsvands- og cirkulationssystemer, hvor der er flere tapsteder, men at det i stedet egner sig bedre til at simulere for systemer som helhed.

L.0.2 Fastsættelse af maksimum varmt brugsvandstemperatur ved tapsted

I Polysun angives den ønskede varmt brugsvandstemperatur som et setpunkt for det pågældende tapsted, der ved simulering anvendes som den nedre tilladelige temperaturgrænse. Ved undersøgelse af mulige optimeringer af et varmt brugsvandssystem, ændrer den øvre varmt brugsvandstemperatur sig for hvert løsningsforslag, hvormed en direkte sammenligning af de løsningsforslagenes energiforbrug ikke er mulig.