



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Dansk Fjernvarmes F&U-konto

Aftale nr. 2018-01 – afslutningsrapport, juli 2019:

”Effektivisering af fjernvarmeforsyning ved anvendelse af smart meter data og data fra supplerende sensorer”

Smart Fjernvarme



Rapport vedr. projektet "Effektivisering af fjernvarmeforsyning ved anvendelse af smart meter data og data fra supplerende sensorer", der efterfølgende har fået den mere mundrette titel: "Smart Fjernvarme", Dansk Fjernvarmes F&U-konto, aftale nr. 2018-01

Udarbejdet for:

Dansk Fjernvarmes F&U-konto

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Teknologiparken
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Installation og Kalibrering

Forfattere: Jakob Fester, Kaj Bryder, Peter Friis Østergaard og Jan Nielsen, Teknologisk Institut, Juli 2019

Tidsramme:

Perioden fra juni 2018 til juni 2019.

Samarbejdspartnere:

Projektet er udført i samarbejde mellem Teknologisk Institut (projektleder) og fjernvarmeforsyningerne Forsyning Helsingør, Fredericia Fjernvarme, Fjernvarme Horsens samt AffaldVarme Aarhus.

Kontaktinformationer:

Virksomhed: Teknologisk Institut
Projektansvarlig: Jakob Fester, tlf.: 7220 2962, e-mail: jafe@teknologisk.dk

Virksomhed: Fredericia Fjernvarme
Faglig projektleder: Carl Hellmers tlf.: 2348 5922 e-mail: ch@fredericia-fjv.dk

Virksomhed: Fjernvarme Horsens
Faglig projektleder: Bjarne Hunderup tlf.: 3085 1352 e-mail: bjh@fjho.dk

Virksomhed: Forsyning Helsingør
Faglig projektleder: Malthe Jacobsen tlf.: 3030 4254 e-mail: mja@fh.dk

Virksomhed: AffaldVarme Aarhus
Faglig projektleder: Adam Brun, tlf.: 2447 2625, e-mail: adbr@aarhus.dk



Fredericia Fjernvarme a.m.b.a

Indholdsfortegnelse

1. Resumé.....	4
2. Projektformål og afgrænsning	5
2.1. Projektets to spor og de tilhørende cases 1 og 2.....	5
3. Case 1: Digitalt værktøj til fejlfinding på fjernvarmeinstallationer	7
3.1. Research og state-of-the-art	8
3.2. Vurdering- og klargøring af målerdata.....	8
3.2.1. Arbejdsplatforme	8
3.2.2. Datakvalitet.....	8
3.2.3. Fjernelse af fejlflæsninger	10
3.3. Visualisering af målerdata.....	10
3.4. Intelligente algoritmer til automatisk fejlfinding på installationer	11
3.4.1. Clustering	12
3.4.2. Forudsigende modellering	13
3.4.3. Beregnete parametre	14
3.5. Demonstration på forsyningsdata	15
3.6. Feedback og kommentarer fra forsyningerne.....	15
4. Case 2: Supplerende målestationer for temperatur og tryk.....	17
4.1. Opbygning af supplerende målestationer	17
4.1.1. Temperaturmålinger.....	17
4.1.2. Trykmålinger	17
4.1.3. Central computerenhed.....	18
4.1.4. Dataopsamling og visualisering	18
4.2. Demonstration af ekstra målestationer.....	19
4.3. Feedback og kommentarer fra forsyningerne.....	20
5. Formidling	21
6. Konklusion.....	22
7. Perspektiver og videreførelse af projektet resultater	23
8. Referencer.....	24
9. Bilag	24

1. Resumé

Der er i projektet udviklet digitale analyseværktøjer til energi- og ressourceoptimering i driften af distributionsnettet hos fjernvarmeforsyninger.

Projektet er delt op i to parallelle spor: "Smart meter data fra eksisterende fjernvarmemålere" og "Supplerende netværksdata fra ekstra målepunkter".

Projektets hovedspor vedr. udnyttelse af smart meter data har vist, at:

- Data fra fjernaflæste målere kan anvendes til fejlfinding på installationer og hjælp til diagnosticering ved hjælp af intelligente algoritmer.
- Den udviklede prototype af analyseværktøjet kan basere sig på døgnværdier (dvs. er ikke afhængig af timeværdier som kan være af meget svingende kvalitet), hvilket sikrer anvendelsesmulighederne hos langt de fleste små og mellemstore fjernvarmeforsyninger.
- Anvendelsen af døgnværdier er desuden beregningseffektiv og bevirker, at det fulde netværk hos selv mellemstore forsyninger rutinemæssigt kan analyseres.

Værktøjet er demonstreret på målerdata fra de medvirkende forsyninger, og det kan på baggrund af deres kommentarer og tilbagemeldinger konkluderes, at værktøjet er anvendeligt til formålet, samt der er bred interesse og engagement i fremadrettet at få værktøjet implementeret hos de enkelte forsyninger.

I projektets andet spor er udviklet og demonstreret et prisbilligt, mobilt målemodul, som sikrer yderligere diagnosticeringsmuligheder gennem højt tidsopløste målinger af tryk og temperatur strategiske steder i nettet. Løsningen er demonstreret blandt de deltagende forsyninger, sat op med trådløs udlæsning, database og tilhørende visualisering af målerdata til inspektion. Flere eksempler hos værkerne har vist nytteværdien af en sådan løsning, og de medvirkende værker planlægger alle fortsat brug af de fordelte målestationer efter projektets afslutning.

Projektets formål og arbejde blev præsenteret ved Dansk Fjernvarmes 60. landsmøde i oktober 2018. For at orientere en bredere målgruppe bestående af de mange små og mellemstore danske fjernvarmeforsyninger om resultaterne og mulighederne med de nye værktøjer er tillige planlagt præsentation af projektets resultater ved temadagen "Få bedre økonomi i fjernvarmesystemet - optimering med målerdata", som afholdes 12. september 2019 på Teknologisk Institut i Aarhus.

Projektets resultater anvendelse af målerdata og suppling med ekstra målepunkter stilles frit til rådighed for de danske forsyninger. En direkte anvendelse af algoritmerne til analyse af smart meter-data via forsyningernes egne pc'ere forudsætter dog, at der suppleres med en software-løsning, som giver mulighed for lokal eksekvering.

2. Projektformål og afgrænsning

Formålet med projektet er

- at udvikle værktøjer til udnyttelse af eksisterende smart meter data til effektivisering af små og mellemstore fjernvarmeforsyningers forsyningsnet og kundeinstallationer.
- at supplere de eksisterende målerdata med data fra ekstra målepunkter realiseret ved prisbillige temperatur- og tryksensorer med høj tidslig opløsning til analyse af fjernvarmenettets tilstand.

De udviklede løsninger er målrettet særlige behov og ønsker hos fjernvarmeforsyningerne gennem en løbende koordinering mellem udviklingsarbejdet hos Teknologisk Institut og feedback fra de medvirkende forsyninger, der alle har bidraget med den fornødne ekspertviden og erfaring inden for distribution af fjernvarme.

Løsningerne er særligt rettet mod små og mellemstore forsyninger, der ikke selv besidder de nødvendige ressourcer inden for bemanding, økonomi og ekspertise til at udnytte deres målerdata fuldt ud.

2.1. Projektets to spor og de tilhørende cases 1 og 2

I fortsættelse af projektets formål er projektets aktiviteter gennemført via to hovedspor:

1) "Smart meter data fra eksisterende fjernvarmemålere". Der udvikles algoritmer og undersøges i samarbejde med forsyningerne i Fredericia, Helsingør og Horsens, hvorvidt brugere med fejl på installationer kan identificeres automatisk og løbende via intelligente algoritmer. Outputtet fra dette spor vil hjælpe forsyningerne til automatisk at identificere, diagnosticere og efterfølgende udbedre dårlige fjernvarmeinstallationer. Herved kan opnås væsentlige besparelser i mandetimer omkring inspektion af målerdata samt mulighed for en generel sænkning af returtemperaturen i nettet med en reduktion i varmetab til følge.

2) "Supplerende netværksdata fra ekstra målepunkter". Med afsæt i erfaringer fra AVA (AffaldVarme Aarhus) undersøges muligheden for supplerende diagnosteringsmuligheder gennem udvikling af en mobil løsning med prisbillige trådløse temperatur- og tryksensorer til installation strategiske steder i fjernvarmenettet. Sensorerne skal fungere uafhængigt af fjernvarmeselskabernes SCADA-system og udvikles med tilhørende online dataopsamlingsystem. Der opnås herved nye muligheder for at overvåge og evaluere fjernvarmenettets tilstand.

Gennem en indledende besøgsrunde hos de individuelle forsyninger foretog Teknologisk Institut en afdækning af forsyningernes ønsker til værktøjerne samt en udredning af deres tekniske forudsætninger. På baggrund af dette blev indsatsen afgrænset til følgende cases (én inden for hvert hovedspor):

Case 1/Smart meter data fra eksisterende fjernvarmemålere: Udvikling af algoritmer til automatisk overvågning og løbende identifikation af fejl på installationer via målerdata. Værktøjet er udviklet på basis af AffaldVarme Aarhus' database og demonstreret efterfølgende på data fra de medvirkende mellemstore forsyninger.

Case 2/Supplerende netværksdata fra ekstra målepunkter: Udvikling af et samlet mobilt målemodul med tilhørende trådløst dataopsamlingssystem til umiddelbar visualisering og analyse. Løsningen demonstreres ved implementering af en række målepunkter i distributionsnettene hos de medvirkende forsyninger.

3. Case 1: Digitalt værktøj til fejlfinding på fjernvarmeinstallationer

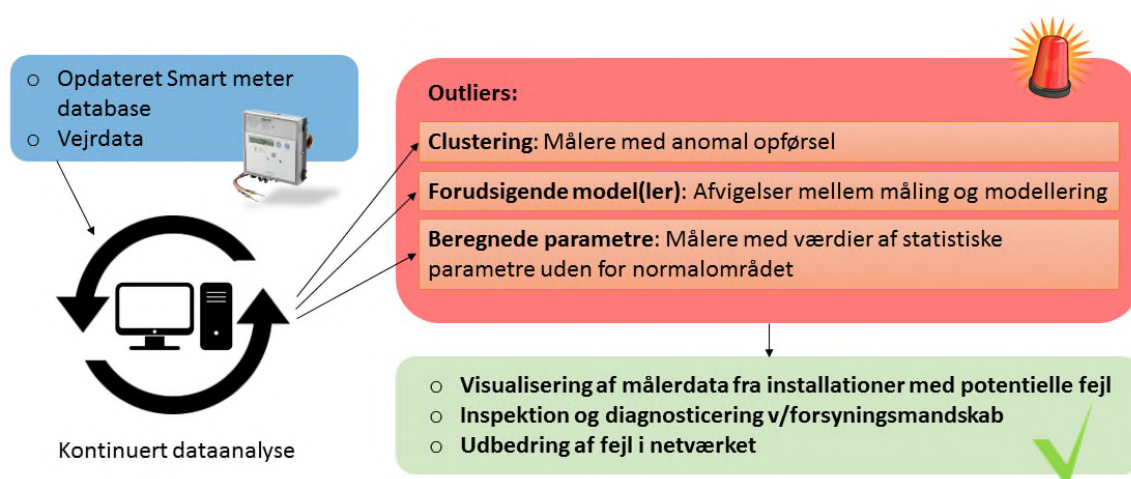
Arbejdet med udvikling af algoritmer i case 1 (projektets hovedspor) er målrettet fejlfinding på individuelle husstandes installationer. Overordnet set kan værktøjet, dets forudsætninger og anvendelse skitseres som vist på Figur 1.

Forudsætningerne for brug hos en forsyning er:

1. Adgang til database med opdateret historiske målerdata med en tidsopløsning på mindst døgn-værdier.
2. Adgang til opdateret vejrarkiv med, som minimum, den lokale daglige gennemsnitstemperatur.

Ud fra dette input udføres løbende (med den af forsyningerne ønskede intervallængde) en dataanalyse som overvåger nettet og grupperer installationerne. Særligt udtrækkes outliers med alarmerende eller afvigende opførsel. Forsyningen tager derefter dette output til efterretning og anvender værktøjets indbyggede visualisering af målerdata til inspektion og diagnosticering forud for eventuel fysisk udbedring af afdækkede fejl.

I nærværende projekt er arbejdet afgrænset til en demonstration af metoden ved kørsel af det digitale værktøj hos Teknologisk Institut, men med forsyningsdata fremsendt af de medvirkende forsyninger. Analyseresultater er efterfølgende rundsendt til feedback fra forsyningerne, og eksempler er givet i Bilag 1: "Demonstration af algoritmer på forsyningsdata – eksempler med feedback og kommentarer fra forsyningerne" (se separat bilgasrapport).



Figur 1 Konceptet bag udviklingsarbejdet i case 1. Forudsætninger (blå), output (rød) og anvendelse (grøn) ved brug af det digitale analyseværktøj.

3.1. Research og state-of-the-art

Som udgangspunkt for udviklingsarbejdet med algoritmer til fejlsøgning på installationer på baggrund af målerdata er der foretaget research i analysemetoder. Inspiration og state-of-the-art fagligt input til arbejdet er bl.a. hentet via deltagelse i fjernvarmekonferencen DHC2018, Hamborg, afholdt i september 2018, hvor relevante metoder blev diskuteret i et internationalt forum. Der er desuden arbejdet parallelt på området og indhentet viden i forbindelse med Teknologisk Instituts deltagelse i det større europæiske projekt RELaTED inden for arbejdsplaner, der omhandler digitalisering og intelligent styring af ultra-lavtemperaturnetværk.

Specielt er der i dette projekt fokuseret på teknikker inden for machine learning/mønstergenkendelse. Litteraturen har tidligere i høj grad fokuseret på data-drevne varmebehovsforudsigelser [1,2], mens det i nærværende sammenhæng er relevant også at kigge på forudsigelse af andre parametre af målerdataene (se afsnit 3.2) samt øvrige metoder til sammenligning mellem et stort antal datasæt. Specifikt er der hentet elementer til de udviklede algoritmer fra bl.a. det svenske studie af Månsson et al [3], hvor forudsigende modeller anvendes til fejlfinding på en enkelt substation/installation (se 3.4.2). I Gadd og Werner [4] foreslås karakteriserende beregnede parametre som ligeledes er inkluderet i afledt form. Derudover tager clustering-algoritmen (afsnit 3.4.1) afsæt i elementer fra en metode, der bl.a. for nylig har været anvendt på smart meter data fra vekslerstationer i nettet hos AffaldVarme Aarhus [5].

Hvor mange af disse studier er af mere akademisk karakter omkring detaljer i metoden og sjældent når helt ud til forsyningerne, ligger fokus i arbejdet i nærværende projekt på anvendelsen af metoderne i praksis og er målrettet effektiv analyse af det fulde netværk samt udvikling i tæt samspil med fageksperter fra fjernvarmeforsyningerne.

3.2. Vurdering- og klargøring af målerdata

3.2.1. Arbejdsplatforme

Målerdata er tilgået via to forskellige lukkede og sikrede arbejdsplatforme af hensyn til persondataforordningen (GDPR):

1. Udviklingsarbejdet er i første fase udført via personbegrænset adgang for Teknologisk Institut til AVA's maskiner og SQL-database med adgang til målerdata for 56.000 installationer med en historik på 1-2 år. Som analyseredskab er programmet Matlab® installeret.
2. Den fortsatte demonstration af værktøjet på forsyningsdata foregik på en lukket arbejdsplatform ved Teknologisk Institut. Forsyningsdata (se Tabel 1) er eksporteret fra Forsyning Helsingør, Fredericia Fjernvarme og Fjernvarme Horsens og derefter overført til det lukkede miljø før analyse.

3.2.2. Datakvalitet

Tabel 1 opsummerer formatet af målerdata som Teknologisk Institut har modtaget fra forsyningerne og arbejdet med. Generelt ligger et skel mellem gennemsnitsværdier typisk beregnet fra akkumulerede parametre (søjlerne 2-4) og punktvis aflæsninger (søjlerne

5-7). Derudover skelner tabellen mellem time- og døgnværdier. Data fra Forsyning Helsingør stammer fra en kampagne med udbedring af fejl på installationer.

Tabel 1 Forsyningsdata inkluderet i projektet. *: Anvendelsesmulighederne er her kompromitterede pga. afrunding til bl.a. hele kWh i databasen. **: Tidsstempler afviger i meget høj grad fra hele klokkeslæt og kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes målere imellem, hvilket komplicerer anvendelsen af clustering-teknikken (se afsnit 3.4.1). ***: Eksempler på installationer med kendte/udbedrede fejl i pågældende periode.

	Akkumuleret forbrug + flow	Akkumulerede temp.-vægtede flows	Temp. Frem/retur (mid-del)	Temp. Frem/retur (punktaflæsninger)	Flow, l/h (punktaflæsninger)	Effekt, kW (punktaflæsninger)	Antal målere	Periode
AVA	X (time)	X (time)	X (time*)				56.000	1-2 år
Fredericia	X (døgn)	X (døgn)	X (døgn)	X (døgn)	X (døgn)	X (døgn)	9.663	1 år
Horsens	X (time)			X (time**)	X (time**)		11.124	1 år
Helsingør	X (døgn)	X (døgn)	X (døgn)				14***	1 år

Omkring brugen af timeværdier (leveret af AVA samt Fjernvarme Horsens) fandt projektgruppen at datakvaliteten og kompletheden af de historiske data hos forsyningerne generelt endnu ikke har nået et niveau, som er fuldt ud egnet som basis for algoritmer til fejlfinding. Dette skyldes hovedsageligt 2 forhold:

1. At data hos AVA er lagret som afrundede værdier (eksempelvis hele kWh), hvilket kompromitterer opløsningen, specielt ved lavt forbrug i sommerperioden. Problemet afhjælpes ved sammenlægning af datapunkterne til hele døgn.
2. Manglende datapunkter, som skyldes sendeforhold og forsyningernes individuelle setup's til dataoverførsel fra fjernaflæste målere til database. Eksport af timedata fra Horsens resulterede således i en performance (dvs. komplethed) på henholdsvis 45 % og 58 % for de to halvår af 2018 (11.124 målere). Som konsekvens af de aktuelle sendeforhold ses også inkonsistens i datalogningstidspunktet for timeaflæste værdier i målerdataene. Dette ses i udpræget grad i data fra Horsens, men er ikke tilfældet hos AVA. Variation i tidsstemplerne betyder samtidig at selv døgnværdier ikke lader sig aflede direkte uden interpolering omkring midnat.

Døgnværdier fra Fredericia (1 år, 9663 målere) indikerer et væsentligt bedre datagrundlag sammenlignet med timeværdier med få manglende datapunkter som udgangspunkt. 96,9 % af målerne har komplette datasæt med aflæsninger alle periodens 366 dage og 99,0 % har mere end 300 dage aflæst, hvilket skønnes tilstrækkeligt til analyse.

Af disse årsager samt de generelle overvejelser resumeret i

Tabel 2 er der arbejdet ud fra døgnværdier i første version af værktøjet, dog sådan at de samme metoder senere let kan overføres til anvendelse på timeværdier gennem mindre modifikationer.

Tabel 2 Fordele og ulemper ved henholdsvis time- og døgnværdier i forbindelse med eksekvering af algoritmer på målerdata.

	Timeværdier	Døgnværdier
Komplethed	Ofte en høj procent af datapunkterne mangler	Kun få manglende datapunkter
Synkronisering af data	Tidsstempler kan kompromittere synkronisering mellem enkelte målere og begrænse anvendelsen af bestemte analysemetoder	Let at synkronisere data ud fra dato
Beregningshastighed	Den totale mængde af data kan betyde væsentlig beregningstid	Relativt lille mængde af data stiller ikke store krav til særlig beregningskapacitet og muliggør opskalering til at inkludere samtlige målere hos mellemstore (og større) forsyninger.
Tilgængelighed	Ikke alle forsyninger har logget historiske timeværdier	Døgnværdier kan antages at være tilgængelige hos langt de fleste forsyninger med fjernaflæsning
Diagnosticeringsmuligheder	Gode muligheder for detaljeret diagnosticering af fejl og kortlægning af daglige forbrugsmønstre	Begrænsning i diagnosticeringsmuligheder. Dog mulighed for efterfølgende at visualisere med timeværdier hvis disse er tilgængelige.

3.2.3. Fjernelse af fejlaflæsninger

Et typisk datasæt indeholder, udover manglende datapunkter, også fejlaflæsninger som skal frasorteres inden påbegyndt analyse. Dette gøres indledningsvist i det udarbejdede værktøj og baserer sig på en række filtre. Åbenlyse fejl såsom negative temperaturer, flows- og forbrug frasorteres først, hvorefter store positive værdier, der ligger helt uden for et udvidet normalområde ligeledes fjernes.

Som konsekvens reduceres kompletheden af datasættet herved yderligere, f.eks. fra de nævnte 1 % målere med færre end 300 aflæste dage i de analyserede data fra Fredericia til 3,6 %, dvs. at 96,4 % af samtlige målere evalueres samtidig ved kørsel af programmet.

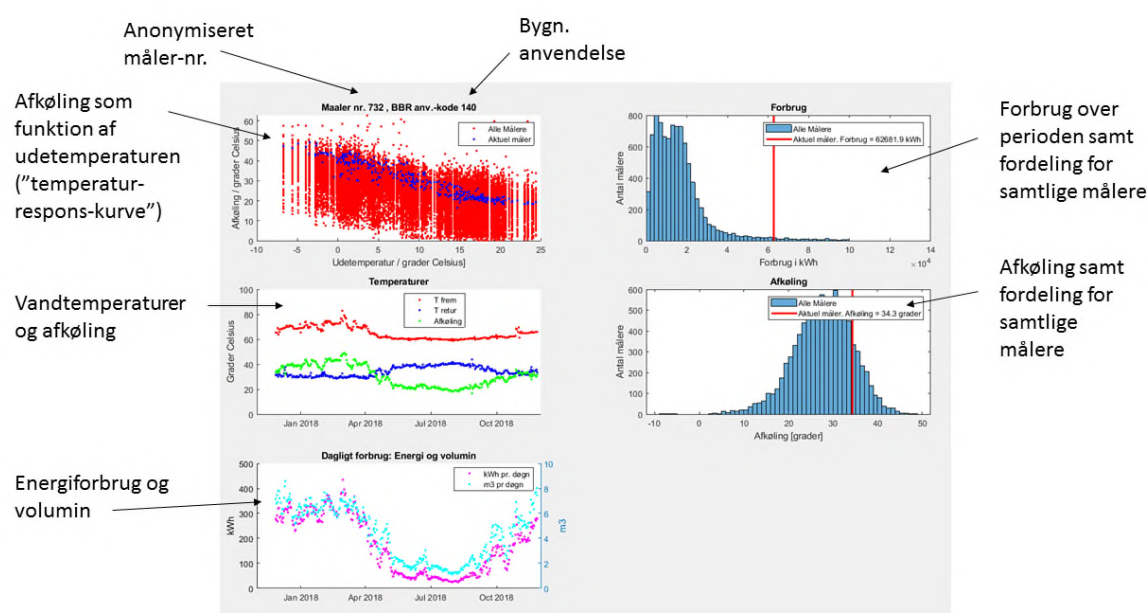
3.3. Visualisering af målerdata

Der er arbejdet med visualiseringen af målerdata og forskellige redskaber er implementeret i værktøjet. Visualiseringen af enkelte og mange målere til sammenligning er et vigtigt element, som specielt er af betydning for brugerens mulighed for at diagnosticere outliers fra analysen.

Figur 2 viser den valgte repræsentation af målerdata fra en enkelt installation over den fulde analyserede periode. Med forsyningernes behov og ønsker ved diagnosticering taget i betragtning er følgende inkluderet:

- Afkølingen plottet som funktion af udetemperaturen for den enkelte måler sammenlignet med den totale gruppe af målere (temperaturrespons-kurven).
- Fremløb-, retur- samt differensstemperaturerne som tidsserier over hele perioden.
- Tidsserier af dagligt energiforbrug (kWh/dag) samt flow (m³/dag).

- Det samlede forbrug over hele perioden sammenlignet med fordelingen for samtlige installationer.
- Den gennemsnitlige afkøling over hele perioden sammenlignet med fordelingen for samtlige installationer.
- Derudover angives øvrig information såsom anonymiseret måler-nr., BBR-anvendelseskode samt værdier for det totale forbrug og gennemsnitlig afkøling.



Figur 2 Repræsentation af målerdata for en enkelt installation, Fredericia Fjernvarme.

Derudover er forskellige mere specifikke repræsentationer af data indarbejdet i relation til analysemetoderne beskrevet i næste afsnit.

3.4. Intelligent algoritmer til automatisk fejlfinding på installationer

Med afsæt i en gennemgang af state-of-the-art metoder inden for navnlig machine learning (se 3.1) er intelligente algoritmer inkluderet i værktøjet. Specifikt er metoderne *clustering* (afsnit 3.4.1) og *ensembles af decision tree learners* (afsnit 3.4.2) anvendt, suppleret med en statistisk analyse på beregnede parametre (afsnit 3.4.3). Via machine learning algoritmerne tilpasses analysen automatisk det aktuelle netværk og gør værktøjet uafhængigt af detaljeret information omkring topografi og bygningsinstallationer mv. fra forsyningens side.

Grundlaget for analysen er det standardiserede datainput leveret fra forsyningen, som skal inkludere:

- Dato
- Måler-nr./identifikationskode for installation
- Forbrug (antal kWh forbrugt for pågældende døgn)
- Volumen (antal m3 forbrugt for pågældende døgn)

- Gennemsnitlig fremløbstemperatur
- Gennemsnitlig returtemperatur
- Den lokale udetemperatur midlet over pågældende døgn

Evt. kan BBR-kode for bygningsanvendelse tilføjes til optimering af de forudsigende modeller (afsnit 3.4.2). Synkronisering, fjernelse af fejlaflæsninger (se 3.2), standardisering af data (*mean division* anvendt [5]) samt afledte parametre såsom døgnafkølingen foretages efterfølgende automatisk af programmet før den egentlige analyse foretages.

3.4.1. Clustering

Machine learning teknikken *clustering* anvendes i værktøjet til at sammenligne dataserier af et stort antal målere gennem en automatisk, iterativ proces. På baggrund af tidserier af bestemte parametre grupperes målerne i et antal hovedgrupper og minoritetsgrupper med indbyrdes lignende datamønstre (se Figur 3 for et illustrerende eksempel med få målere inkluderet).

Algoritmen gennemgår 3 trin:

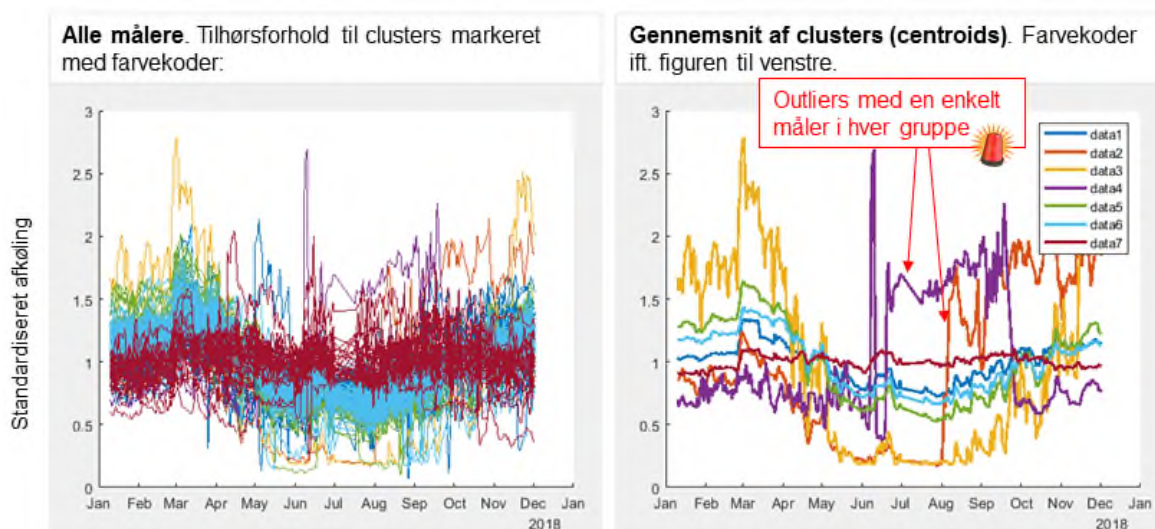
1. Installationer som ikke falder i hovedgrupperne, men i grupper med et meget lille antal medlemmer markeres som anomalier, fortolkes og mærkes som målere med høj sandsynlighed for fejl på installationen.
2. Afstanden til gennemsnittet i nærmeste hovedgruppe udregnes for alle målere. Installationer med størst afstand, dvs. dårligst kompatibilitet med hovedgrupperne med antaget normalmønster, fortolkes og mærkes tilsvarende som målere med potentielle fejl på installationen.
3. Algoritmen køres et antal gange for at opnå en pålidelig statistik over detekterede anomalier – et nødvendigt, men tidskrævende, trin i beregningerne idet der er en vis grad af tilfældighed inkluderet i clustering-metoden, der anvender tilfældige start-clusters som udgangspunkt.

Algoritmen er modificeret ift. Matlab®'s indbyggede funktion, idet realistiske målerdata med manglende datapunkter må kunne behandles. Derudover er en hjælpefunktion indbygget til bestemmelse af antal clusters, hvilket må tilpasses antal målere.

Følgende brugerinput indtastes før kørsel:

- Forventet antal clusters (målergrupper). Typisk mellem 7 og 20 afhængigt af størrelsen på det analyserede netværk.
- Antal repetitioner af clustering-algoritmen (15 valgt som standardindstilling)
- Definition af hvor høj procentdel af det totale antal målere, der ønskes trukket ud og inspiceret blandt målere med afvigende opførsel i rangeret orden.

Som standard anvendes tidsserierne for "flow" og "afkøling" som parametre, men de øvrige målerdatatidsserier kan ligeledes bruges til analyse af netværket. Eksempelvis kan clustering på fremløbstemperaturen være interessant i forbindelse med analyse af distributionen.



Figur 3 Clustering af 209 etageopgange (AffaldVarme Aarhus, 2018) med anomalier detekteret i clusters med kun en enkelt måler i hver.

3.4.2. Forudsigende modellering

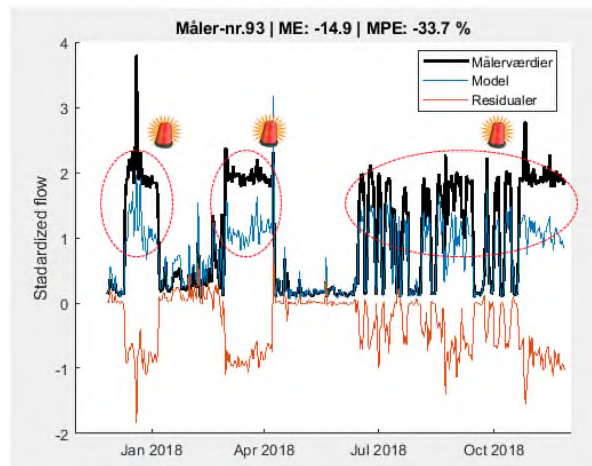
Ensembles af decision tree-modeller indbygget i analyseprogrammet Matlab® trænes til en databaseret forudsigelse af en udvalgt parameter på baggrund af et sæt af øvrige input-parametre. Modellen trænes på samtlige målere i netværket under antagelsen af en gennemsnitlig normal opførsel.

På baggrund af den trænedede model udregnes fejlen mellem målte værdier og modelforudsigelsen for hver enkelt måler givet ved:

- MAE (Mean Absolute Error): Den gennemsnitlige absolutte fejl midlet over alle dage for måleren.
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error): Den gennemsnitlige absolutte procentvise fejl midlet over alle dage for måleren.

Idet MAPE-værdien for målere med lavt detekteret forbrug er sensitive over for selv små afvigelser sammenlignes er indbygget et kriterie for både MAE- og MAPE-værdien som baggrund for udtræk af målerne med størst afvigelse mellem model og målt værdi (se Figur 4).

Som standard vælges modellering af parameteren "flow" med input-parametrene "forbrug", "fremløbstemperatur", "udetemperatur" og "ugedag".

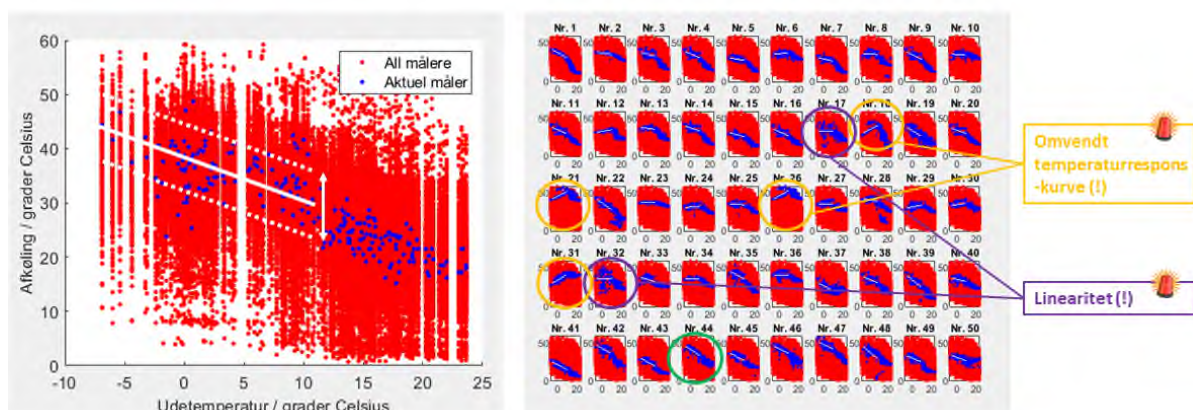


Figur 4 Eksempel på måler med fejl på installationen, som detekteres i algoritmen via forudsigende modellering af flowet.

3.4.3. Beregnede parametre

Temperaturresponskurven danner udgangspunkt for beregning af de to karakteristiske parametre "temperaturrespons" og "linearitet" for hver enkelt installation (se Figur 5):

- Temperaturrespons: Sammenhængen mellem udetemperatur og afkøling givet ved hældningen linjen fremkommet ved lineær regression under antagelse af en hypotetisk lineær sammenhæng mellem udetemperatur og afkøling [4]. Regressionen baseres på dage, hvor udetemperaturen gennemsnitligt er under 10 °C.
- Lineariteten af temperaturresponskurven: Her defineret som den gennemsnitlige afvigelse fra den lineære regressionslinje.



Figur 5 Illustration af de beregnede parametre temperaturrespons og linearitet (venstre) samt eksempler på outliers med stor sandsynlighed for fejl på installationerne blandt et tilfældigt udsnit af målere (AffaldVarme Aarhus, 266 etageopgange, 2018).

Andre statistiske parametre såsom gennemsnitlig afkøling over hele den analyserede periode og det samlede forbrug udregnes ligeledes.

Før kørsel af programmet indtastes tærsker for *"dårlig gennemsnitlig afkøling"* og *"dårlig linearitet"*. For det beregnede temperaturrespons forventes negative værdier (bedre afkøling ved lavere udetemperatur), og som standardindstilling udtrækkes målere med positivt respons, dvs. med *"omvendt temperaturrespons"* til nærmere diagnosticering ved forsyningen.

3.5. Demonstration på forsyningsdata

Algoritmerne er i projektets sidste fase demonstreret på forsyningsdata med Fredericia Fjernvarme som eksempel. Fredericia Fjernvarmes distributionsnet repræsenterer i denne sammenhæng en typisk mellemstor forsyning med et netværk i størrelsesordenen 10.000 installationer med fjernaflæste målere.

Eksempler på output fra algoritmerne og øvrige tekniske detaljer er givet i Bilag 1.

3.6. Feedback og kommentarer fra forsyningerne

Visualisering af konkrete data fra installationer der udviser atypisk opførsel er i projektets sidste fase rundsendt til de medvirkende forsyninger. Dette materiale er inkluderet i Bilag 1.

Forsyningerne har på denne baggrund givet deres feedback og kommentarer vedrørende muligheder for diagnosticering ud fra materialet og relevansen af resultaterne set fra en forsynings perspektiv. Kommentarerne er inkluderet direkte i Bilag 1, hvorefter dataeksemplerne der refereres til er gengivet. Derudover gives til slut en række tekniske detaljer omkring analysen.

Af overordnede træk i forsyningernes vurderinger kan fremhæves følgende punkter:

1. Der gives fra alle tre forsyninger mange bud på diagnoser der specificerer mulige årsager til fejl der bør rettes på de respektive installationer, dog med forbehold for at der ikke er foretaget kundebesøg.
Mange konkrete forslag skønnes endvidere at kunne udbedres uden store ressourcemæssige omkostninger, f.eks.

... "defekt vekslerventil" ... "AVTB ventil til brugsvand" ... "forkert indstillet ECL-kurve" ... "styreventil til brugsvand i stykker" ... "fejlindstillet varmtvandskreds" ... "ikke alle husets radiatorer er i drift og udnyttes" ... "dårlig indregulering af varmeanlægget" ... "defekte termostatventiler" mm. (se Bilag 1 for flere eksempler)

2. Der er overordnet set overensstemmelse mellem algoritmens udpegning af mulige "opståede fejl" og forsyningernes mere detaljerede erfaring som bekræfter behovet for udbedring, f.eks.

"... Vi har erfaring for, at dette kan skyldes en konflikt mellem varmekurven i installationen og fremløbstemperaturen, idet anlægget kortslutter hvis varmekurven kræver en højere temperatur end den der er til rådighed" ...

"... skyldes typisk at varmekilderne eller cirkulationssystemet er underdimensioneret. Nødvendige tiltag kan i første omgang være check af termostater og flowbegrænsere/fordelere og evt. tildækkede radiatorer, og i sidste instans udskiftning af radiatorer" ...

"... ligner dårlig sommerafkøling, som meget ofte kan relateres til defekt i anlæg for varmt brugsvand".

3. Der er generelt positiv feedback omkring værdien af algoritmens output samt værktøjets visualiseringsredskaber for forsyningen, f.eks.:

"... Denne metode [forudsigende modellering, red.] ser ud til at kunne give god værdi når det gælder at opdage opståede fejl. Hvis disse målere kan detekteres automatisk kan der opsættes rutiner, så brugerne adviseres hurtigt, så tabet (ekstraregninger) og virkninger i nettet reduceres mest muligt. (f.eks. sms service for småkunder og lister til driften for personlig henvendelse til større kunder).

Den vil også være god til efterfølgende check af virkningen af de afhjælpende tiltag."

Omkring visualiseringen på basis af døgnværdier noteres det, at

".. det valgte format per måler (siden med kurver) er meget oplysende. For den trænede driftstekniker vil de give et særdeles godt overblik."

4. Endelig foreslås desuden forbedringer i næste version af værktøjet:

- Dels efterspørges flere eksplicite nøgletal (sommer/vinterafkøling, hældning på temperaturresponskurven mm.). Dette skønnes umiddelbart forholdsvis hurtigt at kunne implementeres.
- Dels fremlægges ideen at supplere visualisering til diagnosticering med timedata.

"... En del af grupperne med atypisk opførsel (2 m.v.) viser en lidt randomagtig opførsel, så der for samme udetemperatur er stor spredning i afkølingen. Jeg kunne her forestille mig, at det ved analysen af sådanne tilfælde kunne give forøget værdi at detaljere til timedata hvor det er muligt, eventuelt ved at zoome ind på en kortere periode."

Af de generelle kommentarer samt punkterne 1-4 herover konkluderer vi således, at værktøjet kan bibringe forsyningerne væsentlig nytteværdi samt at der findes både interesse og engagement i at få implementeret værktøjet.

4. Case 2: Supplerende målestationer for temperatur og tryk

Supplerende målestationer til fjernvarmeforsyningerne kan benyttes i sammenhænge, hvor der er ønske om en hurtig afklaring af pludseligt opståede problemstillinger i en installation.

De udviklede målestationers fordel ligger i høj grad i, at de kan flyttes rundt efter behag, samt at der kommer et resultat i form af en intuitivt letforståelig grafik inden for få minutter.

4.1. Opbygning af supplerende målestationer

Målestationerne har mulighed for at måle temperatur 3 forskellige steder, samt tryk 2 steder. Der registreres en måling ca. hvert 5. sekund, og al data sendes til en server hvorfra det visualiseres. Målestationen styres af en prisbillig og yderst kompakt computer.

4.1.1. Temperaturmålinger

Idet det ønskes, at de supplerende målestationer er hurtige at sætte op, fandt vi, at det var naturligt at bruge termokoblere til temperaturmålingerne. Dette skyldes, at termokoblere relativt let kan monteres uden på fjernvarmeinstallationens rør med en metaltape og isoleres. På denne måde opnås en temperaturmåling, der ikke kræver en modificering af installationen, men som samtidig tillader hurtig respons på temperaturen af vandet i rørene. Den termiske masse af en termokobler er desuden så lille, at den ikke selv bidrager med nogen signifikant signalforsinkelse af temperaturen. Med en passende isolering af føleren, kan en målefejl på ca. 0,5 °C opnås ved dette set-up, som tidligere vist hos Teknologisk Institut [6].

Givet de forventede temperaturer, der skal måles, benytter vi en type T termokobler. For at opnå et signal, der kan aflæses af den centrale computer, kobles termokobleren op til en Adafruit MAX31856 Universal Thermocouple Amplifier, der giver et digitalt udgangssignal.

Til hver målestation kan der foretages 3 temperaturmålinger, således at der kan måles på fremløbs- og returtemperatur, samt på temperaturen af brugsvandet efter varmeveksleren. På denne måde kan det hurtigt tjekkes, om afkølingen fungerer som forventet, samt om installationen er opført korrekt, således at der kommer en ordentlig varmeoverførsel fra fjernvarmen over til brugsvandet.

4.1.2. Trykmålinger

Modsat temperaturmålingerne, skal trykmålingerne i kontakt med det medie, de måler på. Til dette formål benyttes de blindpropper, der findes på størstedelen af fjernvarmeinstallationer, da der således ikke er brug for at lave større indgreb i installationen. Da disse blindpropper godt kan sidde et stykke væk fra, hvor temperaturen skal måles, valgte vi at benytte TE u5600 trådløse trykmålere, sammen med Kamstrup 3.6 V batterier. Trykmålerne er i stand til at måle med en frekvens på 10 Hz, men til vores formål er dette ikke

nødvendigt, så for at spare på batteriet, blev målefrekvensen sat til 0,2 Hz, hvilket giver en forventet batterilevetid på ca. 5-10 år.

Trykmålerne kommunikerer over Bluetooth til den centrale computer, og kan derfor, teoretisk set, placeres op til 100 meter fra denne. Realistisk set er rækkevidden dog noget kortere, men 15 meter er stadig opnåeligt i de fleste scenarier, hvilket også er rigeligt i langt størstedelen af tilfældene.

De to trykmålinger kan bruges til at verificere differenstrykket i installationen, for at sørge for, at denne lever op til de krav, der er sat til fjernvarmedistributøren. Hvis der kan lokaliseres og udbedres fejl på installationer, der har en negativ effekt på trykket, kan dette resultere i, at trykket i fjernvarmenetværket kan sænkes, således at pumperne kan køre med en lavere last, og derved få forlænget deres levetid.

Da tryksensorerne endvidere kan måle med op til 10 Hz, er der potentiale for at måle trykvariationer med en frekvens på op til 5 Hz, hvilket ikke er muligt givet de eksisterende SCADA-installationer. Hurtige trykvariationer i fjernvarmenetværket kan være med til at accelerere ældningen af netværket, hvorfor der ligger en potentiel besparelse i at kigge på dette, da udredning heraf kan forlænge levetiden af netværket. Projektets størrelse tillod desværre ikke dybere undersøgelser af dette.

4.1.3. Central computerenhed

Til at optage data fra temperatur- og tryksensorerne benyttes en Raspberry Pi version 3. Denne computerenhed har fordele i at være prisbillig (ca. 300,-), have integreret bluetooth antenne, samt General Purpose Input Output (gpio)-pinde, hvortil måleudstyret kunne tilsluttes.

Udover rigeligt med tilslutningsmuligheder, har Raspberry Pi'en den klare fordel, at den i det store hele fungerer som en standard computer, hvilket indebærer, at den er let at programmere, så den får de ønskede funktionaliteter. Dette gøres via programmeringssproget Python.

Til computeren er tilsluttet en 4G-dongle, der sørger for opkobling til internettet, så data fra sensorerne kan videresendes og tilgås uden behov for at være i nærheden af installationen. For at undgå overforbrug af data, sendes målingerne kun én gang hvert 10. minut. Sendes der hyppigere, bruges der store mængder data information, der ikke er måledata, og der skal i dette tilfælde tilkøbes dyrere dataabonnementer hos teleudbyder.

4.1.4. Dataopsamling og visualisering

Data fra sensorerne overføres via internettet til en Microsoft Azure server, hvorpå der er installeret en InfluxDB database. Her gemmes alle målingerne med tidsstempel, samt information om, hvilken måler og hvilken sensor, målinger stammer fra. Ved at gøre dette, kan data fra målerne til enhver tid findes frem igen, såfremt det skulle være nødvendigt at gennemse historiske data.

Hvis fjernvarmeværkerne ønsker større kontrol over deres data, kan en InfluxDB-database installeres på enhver internetopkoblet computer med fast IP-adresse, og data overføres hertil.

Til visualisering af data benyttes værktøjet Grafana. Her kan der let udvælges en tidsperiode, hvortil temperatur- og trykdata vil blive vist. Tilsvarende InfluxDB-databasen, ligger Grafana på en MS Azure server, men kan flyttes til en lokal server, såfremt dette ønskes. Hvis der er behov for en uddybende analyse af nogle datasæt, er det endelig muligt at lave et SQL-kald til databasen og hente relevante data ned, således de kan analyseres med mere avancerede metoder.

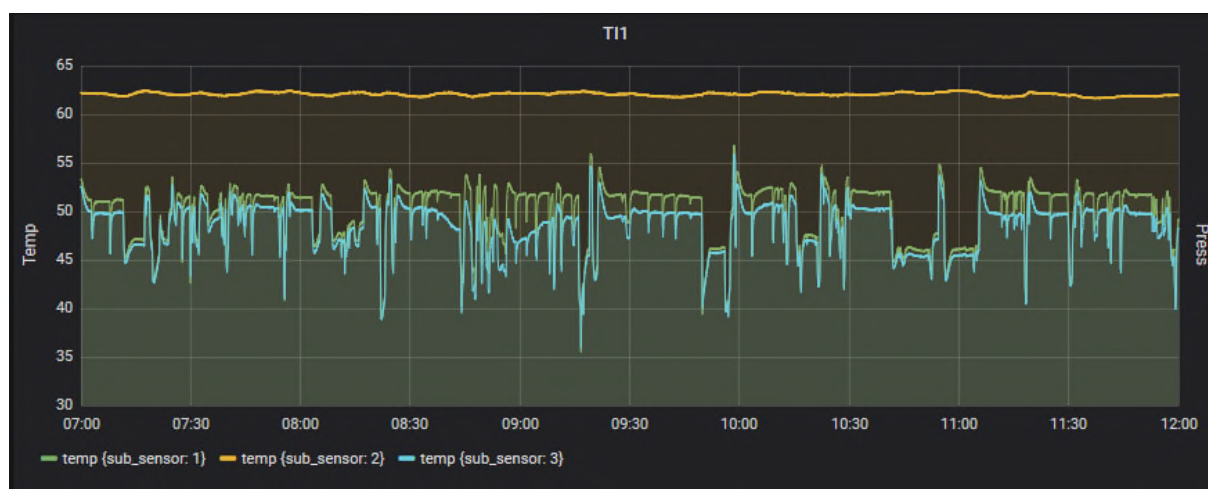
4.2. Demonstration af ekstra målestationer

4 mobile målestationer, hvert indeholdende udstyr til 3 temperaturmålinger og 2 trykmålinger, er blevet fremstillet til hhv. Fredericia Fjernvarme og Forsyning Helsingør. De to forsyninger har opsat målestationerne på relevante steder, hvor de har vurderet, at de kan bidrage med værdifulde målinger.

Forsyning Helsingør har installeret en mobilt målestation hos en kunde, der var af den overbevisning, at differenstrykket mellem fremløb og returløb ikke var højt nok. Ved at installere de to tryksensorer hos kunden, kunne Forsyning Helsingør hurtigt konkludere, at differenstrykket var inden for de krav, de skulle opfylde. Dog fandt de, da de samtidig installerede et målepunkt ved en nabovirksomhed med et højt forbrug, at trykket hos kunde nr. 1 afhang af forbruget ved den store nabovirksomhed. Denne sammenhæng kan tænkes at forklare utilfredsheden hos kunde nr. 1.

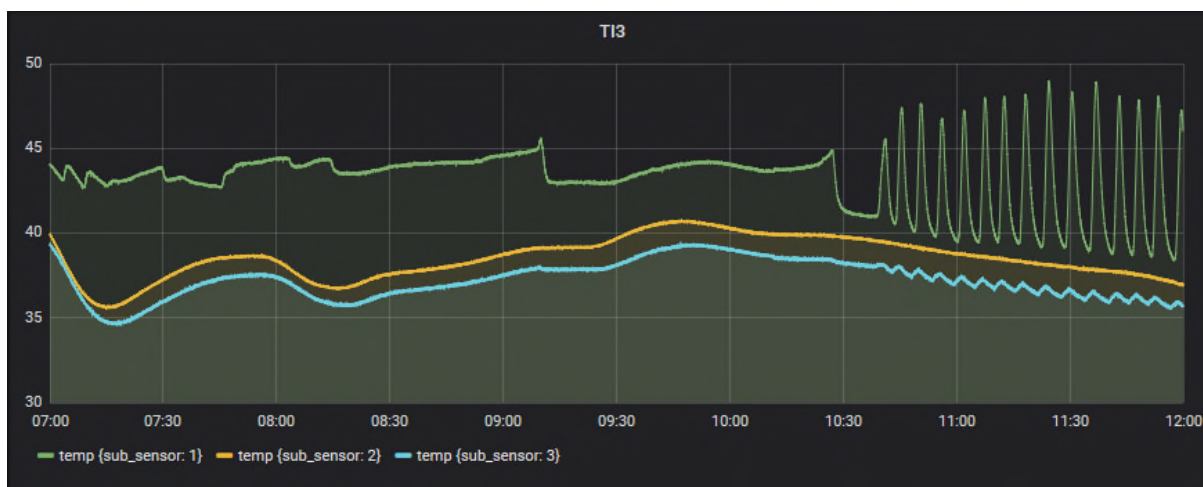
Fredericia Fjernvarme har benyttet de tre temperaturmålere til at undersøge fejl i varmevekslerne. Her kan de tre målere bruges til at måle temperaturen på fremløbet, returløbet, samt på det varme brugsvand. Såfremt fjernvarmeinstallationen er korrekt installeret, skulle returtemperaturen samt det varme brugsvand, gerne have samme temperatur.

I installationerne, hvor målestationerne blev sat op, viste data, at der er noget galt. I et tilfælde, Figur 6, er ændringerne i returløbstemperaturen voldsom, hvilket indikerer, at fjernvarmeinstallationen kræver et eftersyn af en tekniker.



Figur 7: Forbrug af fjernvarme får retur- og brugsvandstemperaturen til at falde markant.

En af de andre målestationer, se Figur 8, er opsat i en installation, hvor fremløbstemperaturen svinger periodisk med ca. 5 °C over 3 minutter. Dette er også et klart symptom på, at den pågældende fjernvarmeinstallation kræver et besøg fra en kompetent VVS'er



Figur 8: Store fluktuationer i fremløbstemperaturen tyder på, at installationen ikke er optimalt indstillet.

4.3. Feedback og kommentarer fra forsyningerne

De to forsøgsforsyninger, Fredericia Fjernvarme og Forsyning Helsingør, har udtrykt tilfredshed med den information, de hurtigt kan få fra de ekstra målepunkter. Det gør dem i stand til hurtigt og billigt at fejlsøge i deres eksisterende installationer.

Der er dog en bevidsthed om, at hvis løsninger som denne skal spredes ud til andre små og mellemstore forsyninger, bør de integreres i de eksisterende SCADA-systemer, idet det er her, forsyningsmedarbejderne er vant til at tilgå information.

Som et første skridt på vejen ønsker forsyningsvirksomhederne, at de genererede data som minimum sendes til en server direkte hos forsyningen. Dette kan let lade sig gøre, idet værktøjerne InfluxDB, der indeholder dataene, og Grafana, der visualiserer dataene, begge er frit tilgængelige under open source-licenser, hvorved der ikke skal betales for brug af produkterne. Det kræver kun, at forsyningerne har en tilgængelig server med en fast IP-adresse, der kan benyttes til formålet.

De benyttede målestationer har dog vist, at de kan give værdi for værkerne, idet de kan bruges til hurtigt og let at identificere mulige problemer i installationer, der ikke kan findes ud fra de fjernaflæste målestationer. Dette skyldes især den større målefrekvens, samt muligheden for at måle tryk i systemet.

Udbredelse af sådanne målestationer vil dog kræve, at en kommerciel virksomhed kan finde en business case i at færdigudvikle konceptet, således at måleudstyret bliver let at installere, og dataopsamlingen og -analysen bliver integreret i de eksisterende systemer hos fjernvarmeforsyningen.

5. Formidling

Projektet er præsenteret ved Dansk Fjernvarmes 60. landsmøde i oktober 2018 og afreporteret i nærliggende dokument, inkl. bilag.

Derudover vil projektets resultater og mulighederne med de udviklede værktøjer blive præsenteret for målgruppen af små og mellemstore forsyninger mfl. på en temadag 12/9 2019 på Teknologisk Institut i Aarhus med titlen "Få bedre økonomi i fjernvarmesystemet - optimering med målerdata". Resultaterne vil blive sat i perspektiv under det overordnede tema omkring digitalisering og anvendelse af smart meter-data i fjernvarmebranchen. Der vil være deltagelse med indlæg fra aktører som Kamstrup, Grundfos og Aarhus Universitet, der giver deres bud på fremtidens løsninger og muligheder på området.

6. Konklusion

Projektets overordnede mål har været at effektivisere fjernvarmeforsyninger ved anvendelse af smart meter data og data fra supplerende sensorer. I tæt samarbejde med de involverede små og mellemstore forsyninger i Helsingør, Horsens og Fredericia, der repræsenterer arbejdets primære målgruppe, samt i sparring med AffaldVarme Aarhus, er dette gennemført gennem følgende to cases:

- **Case 1/Smart meter data fra eksisterende fjernvarmemålere:** Der er udviklet algoritmer til anvendelse af data fra fjernaflæste målere til automatisk fejlfinding på installationer. Værktøjet anvender de nyeste metoder inden for machine learning implementeret i algoritmer af Teknologisk Institut og er demonstreret på forsyningsdata.
- **Case 2/Supplerende netværksdata fra ekstra målepunkter:** En prisbilligt og mobil målestation til måling af tryk og temperatur med høj tidsopløsning er udviklet for at opnå supplerende information af høj detaljeringsgrad i evalueringen af fjernvarmeinstallationers tilstand. En fuld løsning inkl. trådløs udlæsning, database og visualisering er realiseret gennem 8 stk. opbyggede målestationer, der er implementeret og demonstreret i netværkene Fredericia Fjernvarme og Forsyning Helsingør.

Det udviklede analyseværktøj under case 1 stilles frit til rådighed og vil på sigt kunne implementeres hos forsyningerne selv. Dette vurderes at kunne lede til besparelser i både tid gennem automatisk netværksovervågning og fejlfinding samt energieffektivisering som konsekvens af hurtigere udbedring af fejl på installationer og den heraf afledte reduktion i distributionsnettets varmetab. Det bemærkes dog, at værktøjet kræver, at forsyningsselskabet råder over en licens til Matlab®.

Det kan konkluderes på baggrund af forsyningernes tilbagemeldinger, at der fra målgruppens side er stor interesse og engagement i at kunne implementere analyseværktøjet hos dem selv. En sådan udbredelse til målgruppen vil kunne realiseres gennem videre arbejde angående indarbejdelse af algoritmerne i IT-løsning, der som supplerer til den nuværende løsning, kan eksekveres gennem forsyningernes egne pc'ere.

Den udviklede målestation vil umiddelbart kunne anvendes til prisbillig etablering af ekstra målepunkter og dataene kan via open source-licenser sendes til forsyningernes egne servere. Et videre sigte vil være integrering i forsyningernes SCADA-systemer, samt færdigudvikling til et kommercielt tilgængeligt produkt.

7. Perspektiver og videreførelse af projektet resultater

En fremtidig implementering af analyseværktøjet hos fjernvarmeforsyninger vil, ud over de nævnte besparelser, samtidig promovere den mere overordnede digitaliseringsproces af fjernvarmen. Forsyninger kan således gøre deres første erfaringer med brugen af deres smart meter-data, hvor konkrete business cases således kan bane vejen for yderligere tiltag, uden i første omgang at være betinget af investering i dyr software fra de større leverandører.

I en bredere sammenhæng peger værktøjet frem mod en datadrevet drift, også mht. styring og produktion. Et første og konkret skridt på vejen er en data-baseret varmebehovs-prognose baseret på smart meter data og vejrudsigt. Business cases omkring data-drevet temperaturregulering på sådan baggrund har for nylig indikeret store potentielle besparelser i form af reduktion af fremløbstemperaturen på 3 og 10 grader [7]. Det udviklede værktøj i nærværende projekt giver (parallelt med fejlfinding på installationer) muligheden for at implementere datadrevet temperaturregulering og høste de første erfaringer med dette som forsyning gennem vejledende indikationer fra programmet, idet algoritmerne bag de forudsigende modeller (afsnit 3.4.2) også inkluderer det forudsagte varmebehov.

De ekstra målestationer har vist værdien af, hurtigt og let at kunne skaffe ekstra viden fra områder i fjernvarmenetværket, der ellers ikke er tilgængelige, enten grundet den fysiske lokation, eller den tilgængelige tidslige opløsning af data. Et endeligt produkt, der er let tilgængeligt for forsyningsselskaberne vil dog kræve, at en kommerciel interessant færdigudvikler konceptet, så måleudstyr og software bliver lettere tilgængeligt for slutbrugere.

8. Referencer

- [1] Dalipi, Fisnik, Sule Yildirim Yayilgan, and Alemayehu Gebremedhin. "Data-driven machine-learning model in district heating system for heat load prediction: A comparison study." *Applied Computational Intelligence and Soft Computing* 2016 (2016).
- [2] Saloux, Etienne, and José A. Candanedo. "Forecasting District Heating Demand using Machine Learning Algorithms." *Energy Procedia* 149 (2018): 59-68.
- [3] Månsson, Sara, et al. "A machine learning approach to fault detection in district heating substations." *Energy Procedia* 149 (2018): 226-235.
- [4] Gadd, Henrik, and Sven Werner. "Achieving low return temperatures from district heating substations." *Applied energy* 136 (2014): 59-67.
- [5] Tureczek, Alexander Martin, et al. "Clustering district heat exchange stations using smart meter consumption data." *Energy and Buildings* 182 (2019): 144-158.
- [6] Camacho, Javier I, "Måling af overfladetemperatur på rør", https://www.teknologisk.dk/_/media/63461_Overfladetemperatur%20p%E5%20r%F8r.pdf
- [7] Asbjørn Boye Knudsen, Pernille Noer og Cecilia Linn Hansen (DAMVAD Analytics), Grøn Energi og CITIES forskningscenteret. "Potentialet ved dynamisk datadrevet temperaturregulering i fjernvarmesektoren." *Dansk Fjernvarme, F&U Rapport Nr. 2018-02*.

9. Bilag

Bilag 1: "Demonstration af algoritmer på forsyningsdata – eksempler med feedback og kommentarer fra forsyningerne" fremgår som separat bilagsrapport (samme datering som hovedrapporten).