



Lækageovervågning af store solfangeranlæg i fjernvarmen

Slutrapport over

Dansk Fjernvarmes F&U-projekt 2022-05



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Lækageovervågning af store solfanger- anlæg i fjernvarmen

Udarbejdet for

Dansk Fjernvarmes F&U-konto

Udarbejdet af

Teknologisk Institut
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Installation og Kalibrering

Udarbejdet sammen med

Gram Fjernvarme, Jægerspris Kraftvarme, Silkeborg Forsyning, Sydfalster Varmeværk



Januar 2024

Forfatter: Emil Andreasen Klahn, Teknologisk Institut, tlf. 72202093, e-mail: eak@teknologisk.dk



Indhold

1.	Projektets baggrund og formål	4
1.1.	Projektdeltagere	4
2.	Solfangeranlæg og lækager	6
2.1.	Overblik over et solfangeranlæg.....	6
2.2.	Risici for og ved lækager	8
2.3.	Teknologigennemgang.....	9
2.3.1.	Visuel inspektion og droneoverflyvning.....	9
2.3.2.	Flowmålinger	10
2.3.3.	Trykmåling.....	11
2.3.4.	Akustik	12
2.3.5.	Gasfasedetektion	13
2.4.	Målescenarier og valg af teknologi.....	13
3.	Sensorløsning.....	16
3.1.	Komponenter i sensoren	17
4.	Målinger i et solfangeranlæg	17
4.1.	Sensorernes placering og installation	17
4.2.	Lækagesimulering 1: Tryksignal fra forskellige størrelser lækager	18
4.3.	Lækagesimulering 2: Små lækager uden flow	23
4.4.	Lækagesimulering 3: Små, langvarige lækager og uden trykholdesystem	25
5.	Diskussion.....	27
5.1.	Evaluering af sensorer	28
6.	Konklusion og videreførelse af projektets resultater	29
7.	Referencer	31
8.	Bilag	31



1. Projektets baggrund og formål

Solvarme fra store solfangeranlæg har etableret sig i produktionen af fjernvarme i Danmark og er attraktivt, da solfangere leverer billig varme og samtidig er en gevinst for miljøet og således spiller ind i den grønne omstilling. Flere forsyninger oplever dog lækager som er et miljømæssigt problem, men især også som et driftsmæssigt problem, da disse samtidig kan være vanskelige og omkostningstunge at detektere og lokalisere. Det opleves bl.a., at eksisterende lækageovervågning i form af indlagt kobbertråd i rør knækker i muffen. Teknologisk Institut konkluderede i en rundspørge og dialog med repræsentanter for erfagrupperne for Solvarme under Dansk Fjernvarme, at der generelt er efterspørgsel på omkostningseffektive løsninger til lækageovervågning på store solfangeranlæg i fjernvarmeproduktionen.

Projektets formål er på denne baggrund at afdække og demonstrere muligheder for nye metoder til at overvåge og lokalisere lækager på solfangeranlæggene.

Den oprindeligt undersøgte metode baserede sig på flowmåling, trådløs datakommunikation og algoritmer til dataanalyse og overvågning. Da måling af flow viste sig at have mindre potentiale end forventet, blev flere metoder undersøgt herunder brug af akustisk udstyr, gasfasedetektion af solfangervæske samt måling af tryk med distribuerede IoT-sensorer i anlægget. Særligt brugen af trykmåling i anlægget blev undersøgt via opbygning af et antal sensorer, demonstration på anlæg, simulering af lækager i anlægget og analyse af de hjemtagne data.

I projektet er der specielt lagt fokus på:

- Afdækning af metoder til lækageovervågning og sporing
- Hvilke typer og størrelser af lækage der kan spores vs. metoden
- Omkostningseffektiviteten (rentabiliteten ift. pris på hardware, montering og vedligehold, ikke-destruktive indgreb i anlæggene vs. mere omfangsrig implementering)

På denne baggrund gives der sidst i rapporten en afsluttende afdækning af, hvordan konceptet vil kunne udbredes videre frem.

1.1. Projektdeltagere

Nærværende dokument udgør slutrapporten i projektet "Lækageovervågning af store solfangeranlæg i fjernvarmen". Projektet er udført i perioden november 2022 til januar 2024 med Teknologisk Institut som projektleder. Projektledelsen har til dagligt været varetaget af konsulent ved Teknologisk Institut Emil Andreasen Klahn, og arbejdet er udført under medvirken af

- Jakob Fester, Thomas Schrøder Daugbjerg, Jonas Nyborg, Jonas Lembcke Andersen, Søren Hanghøj Møller, Hans Christian Hasselstrøm, Mikkel Nepper-Christensen, *Teknologisk Institut*
- Per Hvilshøj Christiansen og Kristian Østerdal, *Silkeborg Forsyning*
- Hans Chr. Kjærgaard, *Jægerspris Kraftvarme*
- Lars M. Damkjær, *Gram Fjernvarme*
- Karsten Daugaard, *Sydfalster Varmeværk*



Det tekniske arbejde har generelt været opdelt således: Ved teknologiafdækningen har Teknologisk Institut stået for litteratursøgning, og forsyningerne har bidraget med erfaringer fra anvendelse af disse teknologier i egne solvarmeanlæg. Teknologisk Institut har stået for udviklingen af en sensor til måling i solvarmeanlæggene samt datainfrastrukturen til disse. Forsyningerne har undervejs deltaget i valg af sensorteknologi samt planlægning og udførelse af lækagesimuleringer og evaluering af disse.



2. Solfangeranlæg og lækager

2.1. Overblik over et solfangeranlæg

I et solfangeranlæg omdannes energien fra solens stråler til varme i en væske og kan på den måde via en varmeveksler overføres til fjernvarmenettet eller gemmes i et varmelager. Solfangere, der direkte fanger solens stråler som varme, er en meget effektiv teknik. Undersøgelser viser, at den årlige varmeproduktion fra solfangere kan være op til 160 kWh/m² målt pr. areal flad jord, som solfangerne optager.¹

Et solvarmeanlæg består af mange solfangerpaneler. Det enkelte solfangerpanel består af en aluminiumsramme med en glasforside, der tillader sollyset at ramme og opvarme en aluminiumsabsorber. Denne leder varmen fra lyset over i en solfangervæske, som løber i et kobberør, der kaldes absorberørret. Et eksempel på et panel er Arcon Sunmark HEATBoost 31/10,² hvor flere absorberør (Ø10 mm) inde i panelet er parallelt forbundne til to fordelerrør (Ø35 mm), der fører væsken ind og ud af panelet. Væsken opvarmes ved passage, mens der opretholdes et flow igennem panelet.

I et solfangeranlæg er flere paneler forbundet i serie (omtrent 20 stk. kaldes en "række"), og rækkerne er forbundet parallelt til et tilgangsrør (hvor solfangervæsken er kold) og et afgangsrør (hvor solfangervæsken er varm). Forbindelsen mellem rækkerne og tilgangs- og afgangsrør kaldes standerrøret. Flowet ind i hver række indstilles med en trykreguleringsventil, og der efterstræbes den samme afgangstemperatur fra hver række. Et billede af anlægget hos Gram Fjernvarme er vist i Figur 1.



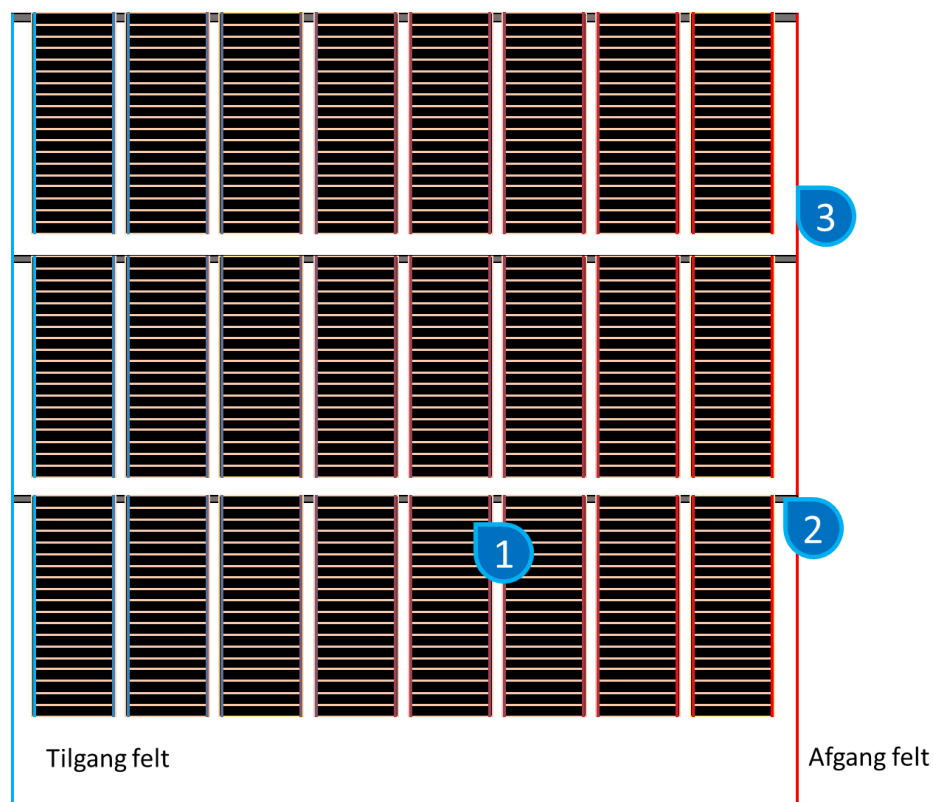
Figur 1: Billede af solfangeranlægget hos Gram Fjernvarme. Billedet viser rækker af solfangere, hvor solfangere er serieforbundne, og de parallelt forbundne solfangerrækker. Kilde: <https://www.gram-fjernvarme.dk/firmaprofil/solvarme-i-gram/>.

¹ <https://solarthermalworld.org/news/solar-thermal-shows-highest-energy-yield-square-metre/> og <https://solarthermalworld.org/news/solar-district-heating-good-performances-all-over-europe/>. Tilgået 30.01.2024.

² Fact sheet: <https://serv.spf.ch/spftesting/collectors/pdfs/scf1735en.pdf>. Tilgået 30.01.2024.



Erfaringsmæssigt forekommer der primært brud tre forskellige steder i anlæggene. Den første måde er, når bruddet sker inde i panelet. Det forekommer typisk der, hvor absorberrøret er svejset til fordelerrøret med en manuel svejsning. Alene det faktum, at der er mange af disse svejsninger i et enkelt solpanel, og at anlæggene består af mange solpaneler, gør dette til en meget almindelig form for lækage. En anden type brud forekommer på opstanderrørene i fittings mellem panel og rør eller i fittings og pakninger mellem rørene. Disse typer brud forekommer kun over jorden, og der kan derfor lækagesøges med visuel inspektion ved at opdage væsken. Den tredje type brud forekommer i tilgangs- og afgangsrørene og er brud under jorden. Disse brud er en del af motivationen for projektet. Rørene er egentlig bygget med indlejret meldetråd, som kan anvendes til at erkende og spore netop denne sidste type lækager, men det er flere gange observeret, at meldetråden knækker og sætter denne type spring ud af drift, sandsynligvis pga. forholdene i solfangeranlæg, herunder de store temperaturudsving i væsken.



Figur 2: Skitse over et solfangeranlæg. De enkelte rækker består af seriekoblede solfangerpaneler, og flere rækker er parallelt forbundne. På venstre side løber den kolde væske, som varmes op hen over en række og ender i højre side, hvor alle rækker af solfangerer har varmet væsken op til samme temperatur. Figuren peger på tre af de almindelige steder, hvor lækager opstår: 1) Utætte lodninger mellem absorberrør og fordelerrør, 2) Brud eller utætte pakninger på standerrør, 3) Brud på frem- eller returløbsledninger.



Det ligger udenfor projektet at beskrive driften af solfangeranlæg. En vigtig komponent i systemet er dog anlæggenes ekspansionssystemer, der sikrer trykudligning i systemet, når solfangervæsken ændrer volumen som følge af temperaturændringer. Ekspansionssystemet findes både med åben ekspansion, hvor væsken ved udvidelse trykkes ud i en beholder, der er åben til atmosfæren, og med lukket ekspansion, hvor væsketrykket holdes konstant ved anvendelse af trykluft. Ekspansionssystemet kan også til en vis grad udligne trykfaldet ved lækager og dermed beskytte pumper og andre dele af solfangeranlægget.

I dette projekt har fire forsyninger deltaget, som hver har et solfangeranlæg. Data om de fire anlæg er opsummeret nedenfor.

Tabel 1: Data om solfangeranlæggene hos de deltagende forsyninger

	Gram Fjernvarme	Jægerspris Kraftvarme	Silkeborg Forsyning	Sydfalster Varmeværk
Areal [m ²]	44.800	13.405	156.694	12.094
Idriftsættelse	2009 & 2015	2010	2016	2011

2.2. Risici for og ved lækager

De miljømæssige konsekvenser og risici ved lækager er beskrevet i Miljøstyrelsens rapport "Jordforurening fra solvarmeanlæg" (2021, Miljøstyrelsen, Miljøprojekt 2160). Rapporten beskriver, at risici primært udgøres af forurening pga. udslip af solfangervæsken. Der bruges forskellige leverandører, men en almindelig væske er MPG-Varmetrans RØD, som primært indeholder monopropylenglykol (propan-1,2-diol) og demineraliseret vand. De problematiske stoffer er tilsætningsstoffer, der er i solfangervæsken, bl.a. forbindelsen trotyldiazol, der er tilsat væsken som en korrosionsinhibitor.

Konsekvensen ved lækager bliver større, jo længere tid en lækage ikke er opdaget. Forsyningerne beretter om, at det er de små skader, som der er et stort ønske om at kunne lokalisere, fordi større skader umiddelbart er synlige og nemme at lokalisere. Derfor er der værdi i at kunne påvise, hvor små lækager det er muligt at detektere.

En mellemklasse af lækager, som også er vigtig at kunne detektere, er sivelækager under jorden. Arbejdet med at lokalisere disse lækager kan besværliggøres af det underlag, som anlægget står på. Ved en lækage hos Sydfalster Varmeværk, hvor jorden er gammel havbund og derfor indeholder meget sand og grus, blev det manuelle eftersøgningsarbejde for eksempel besværliggjort af besværligt gravearbejde.



Figur 3: En underjordisk lækage på Sydfalster Varmeværk, hvor meldetråden samtidig var knækket, gjorde det besværligt at lokalisere lækagen.

2.3. Teknologigennemgang

I projektet har vi indledningsvis været åbne for flere spor indenfor lækageovervågning, hvor teknologiens anvendelse til lækagekonstatering- eller sporing har været helt eller delvist demonstreret. De relevante teknologier skal operere i en meget bred spændvidde af størrelser af lækager. Disse lækager rækker i størrelse fra små dryplækager, som lækker ned til en dråbe i sekundet, svarende til 0,2 L/time, op til lækager på 10-50 L/time. Disse tal skal ses i forhold til det totale volumenflow i et anlæg, som under drift kan nå op på 700.000 liter i timen, svarende til at hver række af solfangere, ved antagelse om ca. 100 rækker solfangere, har gennemløb af 7.000 liter i timen, og at hvert absorberør i et solpanel derfor har gennemløb af ca. 400 L solfangervæske i timen. Små dryplækager i en svejsning i et panel kan dermed udgøre mindre end en promille af volumenflowet på det pågældende sted af solfangeranlægget. Det giver næsten samme resultat, selv hvis anlægget udenfor produktion køres med et flow på omtrent 100.000 liter i timen, svarende til at hver række har et gennemløb på omkring 1.000 liter i timen.

De teknologier, vi har betragtet i projektet, tæller visuel og termografisk inspektion af solvarmeanlæg med droneoverflyvning, måling af flow, måling af tryk, akustiske målinger og gasfasedetektion af lækket solvarmevæske. Teknologierne diskuteres i de følgende afsnit.

2.3.1. Visuel inspektion og droneoverflyvning

Termografering er en velkendt teknologi til at afdække varmemønstre, som også er anvendt i forsynin- gers fjernvarmenet. Denne teknologi fungerer ved at tage billeder med fotoudstyr, som derefter tolkes af uddannet personel. Til luftbåren inspektion af solvarmeanlæg kan fotoudstyr, som er følsomt overfor



enten synligt eller infrarødt lys, monteres på en drone, som kan anvendes til luftfotografering af anlæggene. Hvis fotoudstyret er følsomt overfor infrarødt lys, kan det anvendes til at detektere steder, hvor varm væske løber ud af rørene på grund af en lækage. Konventionel fotografering med synligt lys kan bruges til at identificere synlige defekter på solfangerpaneler og kan udføres med mindre besvær end ved at bevæge sig rundt i anlæggene. En ulempe ved termografering med drone er, at anvendelsen kræver stille vejr. I forhold til detektion af lækager er der også udfordringer forbundet med, at termograferingen fanger infrarød stråling fra varme komponenter, og det er derfor kun anvendeligt til at detektere lækager på den varme side af anlægget. Desuden kan varmesignaturen ikke forventes at bevæge sig lige langt gennem alle de typer jordbund, som et anlæg kan være monteret på. Indenfor blot dette projekt ligger anlægget på Sydfalster på gammel havbund, som består af en stor del sand og grus, mens anlægget i Silkeborg ligger på blød jord. Disse lokale forskelle skal en generel løsning til lækagesporing med droneoverflyvning kunne tage højde for.

2.3.2. Flowmålinger

På solvarmeanlæg sidder i forvejen flowmålere, og flowet er af afgørende betydning for varmetransport i anlægget og dermed også begrænsning af temperaturen i solpanelerne. Dette er bl.a. vigtig for at undgå kogning i anlægget, som - udover skade på anlægget - kan bevirke, at glykolen i væsken nedbrydes og ændrer blandingens egenskaber.

En strategi ved måling af flow vil centrere sig om clamp-on flowmålinger med en passende sensor. Sensorteknologier til denne type måling tæller bl.a. ultralydsmålere, som ved hjælp af Doppler-skiftet af den udsendte lyd måler hastigheden af væsken i et rør.

Hastigheden af væsken siger imidlertid udelukkende noget om, hvor stort et volumen væske der bevæger sig i røret. Målinger på blandinger af vand og ethylenglykol (ethan-1,2-diol) viser, at en blanding af vand og ethylenglykol med en masseprocent på 26,1 % ethylenglykol falder i densitet fra 1.035 g cm^{-3} ved $19,5 \text{ °C}$ til $0,981 \text{ g cm}^{-3}$ ved $101,2 \text{ °C}$ (Bohne et al., 1984), svarende til en volumenforøgelse på 5,5 %. En blanding af vand og monopropylenglykol, som den der anvendes i solfangeranlæg, må - ud fra den meget ens kemiske struktur mellem ethan-1,2-diol og propan-1,2-diol - udvise en tilsvarende volumenforøgelse. På grund af denne betydelige termiske ekspansion kan lækager ikke påvises alene med målinger af forskel i volumen. For at være effektiv som metode til lækageovervågning, må volumenflow derfor stå i kombination med en temperaturmåling af den væske, der måles på, så et masseflow af massen af væsken kan beregnes som

$$Q_m = \rho(T)Q,$$

hvor Q_m er masseflowet, Q er volumenflowet og $\rho(T)$ er den temperaturafhængige densitet af solvarmevæsken. Med denne information ville en lækage kunne bestemmes som en signifikant forskel i masseflowet mellem to målepunkter, hvor man ellers ville forvente samme masseflow, f.eks. på de to ender af en række af solfangerpaneler.



Der er flere udfordringer ved at basere et overvågningssystem på målinger af masseflow. En helt central udfordring er måleteknisk: Et faldende masseflow mellem to målepunkter *kan* være et udtryk for en lækage. Det er dog beskrevet i den akademiske litteratur, at temperaturdynamikken i systemet, f.eks. på grund af ændringer i vejret eller skydække, giver stor risiko for falskt positive meldinger om lækage (Wan et al., 2011). En anden udfordring er i relation til måleusikkerheden. En god clamp-on sensor kan med rimelighed antages at være akkurat til ± 2 % af den målte værdi, og dermed kan vi på en række af solfangere opnå en usikkerhed på omtrent 140 L/time, hvilket er markant større end de 0,2 L/time som forventeligt skal findes på en række under fuld drift.

Desuden kan to flowmålere med tilhørende temperatursensorer kun identificere lækager på rørføring imellem dem. Det vil sige, at det kræver et par af sensorer at overvåge ét absorberrør, én solfangerrække eller hele anlægget. Dette faktum sammen med prisen på en clamp-on flowmåler, som ligger omkring 10.000 kr. pr. måler, betyder, at en løsning til både lækageovervågning- og sporing med flowmåling pludselig er meget dyr. Dertil skal regnes, at flowmåleren skal monteres direkte på et bart rør, og at så mange rør som muligt i en solfangeranlæg er isolerede for at bevare varmen i solfangervæsken. Dette gør det upraktisk at montere clamp-on flowmåling i et solfangeranlæg.

2.3.3. Trykmåling

Trykprøvninger til konstatering af lækage er almindelig praksis, og forsyningerne får jævnligt trykprøvet deres solfangeranlæg. Et faldende tryk kan være udtryk for en lækage i systemet. Især to måder at anvende trykmåling til at erkende og spore en lækage med trykmålinger har været af interesse for dette projekt.

Trykbølgeanalyse er den første metode, som gør brug af, at de ændrede trykforhold ved en lækage giver anledning til en trykbølge, som bevæger sig igennem anlægget. Med tryksensorer placeret flere steder i anlægget kan man bruge observationen af samme trykbølge flere steder til at beregne positionen for lækagen ved at sammenholde tidspunktet for observation af trykbølgen med bølgens udbredelseshastighed. Princippet er f.eks. vist i Silva et al. (Silva et al., 1996), hvor lækager blev induceret på rør med længder af 433 m og 1248 m, hvilket i størrelsesorden stemmer godt overens med størrelsen på solfangeranlæg. I de undersøgelser kunne en analyse af trykbølgens udbredelse beregne en lækageposition, som lå indenfor 10 meter af den faktiske lækage. En udfordring i forhold til at udbrede denne teknologi til et solfangeranlæg er, at sensorerne i dette forsøg kunne udlæses med en frekvens på 2 kHz, hvilket giver mulighed for at detektere en kort puls i anlægget. Målefrekvenser af den størrelse kan lade sig gøre, når sensorerne kan kobles på elnettet, men de er meget svære at opnå i et distribueret sensornetværk i et solfangerfelt.

En anden teknologi til at lokalisere lækager med tryk kaldes "gradient intersection method" og udnytter, at der omkring en lækage opstår et lokalt trykfald. Med denne metode måles trykforskellen mellem to positioner foran lækagen og giver en trykgradient foran lækagen, og trykforskellen mellem to positioner efter lækagen måles og giver således en trykgradient efter lækagen. Ved at ekstrapolere disse trykgradienter kan man beregne, hvor gradienten skifter, og hvor lækagen sandsynligvis befinder sig.



Løsningen kræver altså mindst fire sensorer, hvis signal kan behandles sammen. Fordelen ved denne løsning er, at man anvender ligevægtstrykket, efter lækagen er opstået og dermed ikke afhænger af en høj frekvens på målingerne. Teknologien er blandt andet beskrevet i 2017 af Abdulshaheed et al.

Udfordringen ved trykmålinger i anlægget er generelt, at trykket i disse anlæg er en meget dynamisk størrelse. På dag-til-dag-basis ændrer trykket sig nødvendigvis, fordi solen begynder at skinne, væsken bliver varm, udetemperaturen stiger, anlæggets pumper ændrer kraft, blot for at nævne nogle faktorer. Over en sæson ændrer den daglige gennemsnitstemperatur sig. Desuden har anlæggene, som nævnt i et tidligere afsnit, ekspansionssystemer, som anvendes for at stabilisere trykket i anlægget. Som et eksempel på udfordringerne ved at anvende en trykbaseret løsning nævner forsyningerne, at der i efteråret især er udfordringer med at tyde, om generelt faldende tryk i anlægget er udtryk for en lækage eller på grund af faldende udetemperaturer.

2.3.4. Akustik

Akustiske målinger af lækager beror på det fænomen, at en væske, der strømmer gennem en læk i et rør under tryk, skaber en vibration som udbreder sig i røret. Udbredelsesmediet for den akustiske bølge er det samlede system af væske, rør, og omgivelser. Den akustiske bølge kan måles med en akustisk sensor, f.eks. et accelerometer. Lyden af lækagen falder med afstanden til lækagen, og derfor kan akustik både bruges som teknologi til at erkende lækagen, når lyden af en lækage registreres, og til at spore lækagen ved at sammenligne akustiske signaler fra flere sensorer samtidig (Zeng, 2022). Akustik er ofte brugt som teknologi til lækagesporing indenfor brugsvand, hvor der findes kommercielle løsninger,³ og hvor teknologien fungerer godt, fordi der er perioder uden flow i væsken. Flow bidrager i sig selv med et akustisk signal, og det kræver derfor indgående kendskab til de akustiske signaler, der generelt eksisterer i anlægget, hvis disse lyde skal adskilles fra lyden af en lækage. Det taler dog imod teknologiens anvendelse i solfangeranlæg, at man i anlæggene ikke kan regne med at have perioder uden flow, fordi flowet er nødvendigt for afkøling om sommeren og for frostsikring i vinterhalvåret.

Typen af rørføring i et solvarmeanlæg har både fordele og ulemper i forhold til akustisk lækagesporing. De akustiske signaler kan bevæge sig langt og dermed være relativt nemme at detektere i solvarmeanlæggene, fordi det meste rørføring er i metal, som er stivere og derfor dæmper vibrationer i mindre grad end de plasticrør, som brugsvandsledninger typisk er udført i, og hvor teknologien allerede finder anvendelse. Omvendt er solfangeranlæggene sammensat af rør i mange størrelser med mange overgange, hvor det akustiske signal kan dæmpes. Desuden er de fjernvarmerør, der fører væsken ind og ud af feltet, omgivet af isolering, og indvirkningen af denne isolering på rørens evne til at transportere det akustiske signal er ukendt.

³ For eksempel <https://www.kamstrup.com/en-en/insights/how-acoustic-measurements-are-used-to-locate-water-leaks>



Prisen for den akustiske sensor til anvendelse i lækageovervågning- og sporing ligger over, hvad man kan kalde "low-cost"-området med priser mellem 5.000 og 10.000 kr. for sensoren alene. Teknologien kan, grundet cases med anvendelse i brugsvandsnettet, have potentiale i solvarmeanlæg. Prisen for sensoren samt de uafklarede spørgsmål omkring en passende dataanalyse udgør dog en hæmsko for teknologiens anvendelse i solfangeranlæg.

2.3.5. Gasfasedetektion

Gasfasedetektion blev vurderet som en spændende mulighed for at angribe problematikken omkring lækager fra en komplementær vinkel. Teknologien har en pendant indenfor små hydrauliske anlæg, hvor trykprøvning med sporgas og efterfølgende lækagesøgning med samme sporgas er en kendt praksis. Aktiv anvendelse af sporgas kræver dog, at anlægget kan tømmes, hvilket ikke er praktisk muligt i solfangeranlæg af industriel størrelse, hvor den samlede mængde solfangervæske kan fylde mange hundrede kubikmeter.

Blandt projektdeltagerne blev det besluttet at undersøge nærmere, om selve solfangervæsken kan bruges som kilde til en gas, der kan spores. Ideen i denne fremgangsmåde er at anvende sensorer, som kan detektere nogle af de kemiske forbindelser, der er i væsken, og som kan give udslag, når nogle af disse stoffer begynder at være til stede i luften omkring solfangeranlægget. For at afdække potentialet i denne ide blev det hos Center for Luft- og Sensorteknologi hos Teknologisk Institut undersøgt, om gængse sensorer til detektion af VOC'er ("volatile organic compounds") kan detektere solfangervæsken. Undersøgelsen er beskrevet i appendiks A til denne rapport.

Resultaterne af undersøgelsen viser, at det er muligt at detektere fordampning af solfangervæsken under kontrollerede forhold i et laboratorium med sensoren Senserion SVM30 til en pris af 160 kr. I projektet har de udførte tests forholdt sig til muligheden for at detektere solfangervæsken. Næste skridt i en videre afdækning af potentialet i denne type lækagesporing bør bestå af en udendørs test i lille skala under realistiske forhold. Faktorer relateret til mikroklimaet under solfangerne, såsom mindre vind og højere temperaturer vurderes at øge sandsynligheden for succes i at detektere solfangervæske. Omvendt vil der også være VOC'er fra andre kilder, som detekteres på lige fod med solfangervæsken, når opstillingen flytter fra laboratoriet og ud i et solfangerfelt. Her kan data fra et netværk af sensorer være værdifulde, fordi de kan tydeliggøre det eftersøgte signal. En vigtig begrænsning ved denne teknologi er, hvorvidt lækagen forekommer over eller under jorden, fordi sensorens signal afhænger af, at væsken fordamper og bliver en del af den luft, der forekommer i solfangeranlægget.

2.4. Målescenarier og valg af teknologi

For at tydeliggøre forskelle på de forskellige teknologier til lækageovervågning- og sporing er teknologierne og deres anvendelse i forhold til forskellige driftssituationer i anlægget og forskellige lækagestørrelser opsummeret i nedenstående tabel.



Tabel 2: Gennemgang af driftsscenarier og mulige måletekniske løsninger til lækageovervågning

Teknologi	Måle- og drifts-scenarie	Installation	Overvågning	Lækagetype	Lækstørrelse [L/time]	Flow [L/time]	Rel. usikkerhed [%]	Sensitivitet [L/time]	Pris/Implementerbarhed
Flow	Enkelt række (dag)	Clamp-on flowmåler i hver ende af rækken	Kontinuert	Dryp	0,2	7.000	2	140	Clamp-on flowmålerne kan kun måle på én række ad gangen. 20.000 kr. pr. overvåget række for sensorer.
	Enkelt række (dag)	Clamp-on flowmåler i hver ende af rækken	Kontinuert	Sive	50	7.000	2	140	Som ovenfor
	Enkelt række (nat)	Clamp-on flowmåler i hver ende af rækken	En gang pr. døgn	Sive	50	1.000	2	20	Som ovenfor
	Hele anlægget (dag)	Ekstra flowmåler monteres og ved afgang fra anlægget	Kontinuert	Brud	200	700.000	0,2*	1.400	Pris ca. 25.000 kr. plus installation på anlægget. Læk mindre end måleusikkerheden.
	Hele anlægget (nat)	Ekstra flowmåler monteres og måler afgang fra anlægget	En gang pr. døgn	Brud	200	100.000	0,2*	200	Pris ca. 25.000 kr. plus installation på anlægget. Læk mulig at konstatere, men løsningen kan ikke spore lækagen.
Tryk	Hele anlægget (dag)	Anvendelse af anlæggets eksisterende tryksensor	Kontinuert	Sive	200	700.000	0,1**	-	Uden flere tryksensorer er der mulighed for at konstatere lækage – ikke lokalisere.
	Hele anlægget (nat)	Anvendelse af anlæggets eksisterende tryksensor	Kontinuert	Sive	200	100.000	0,1**	-	Uden flere tryksensorer er der mulighed for at konstatere lækage – ikke lokalisere.
	Distribuerede sensorer (dag)	Tryksensorer installeres på hver 3-4 række	Kontinuert	Sive	200	700.000	1**	-	Tryksensor koster 1.000 kr./stk. Mulighed for at lokalisere lækage med trykforskel.
	Distribuerede sensorer (nat)	Tryksensorer installeres på hver 3-4 række	Kontinuert	Sive	200	100.000	1**	-	Tryksensor koster 1.000 kr./stk. Tryksignal lavere end om dagen grundet mindre flow.
Akustik	Distribuerede sensorer (dag)	Sensorer flere steder i anlægget for mulighed for at korrelere signaler	Kontinuert	Sive	0,2	700.000	-	-	10.000 kr. pr. akustisk sensor. Kræver ekstensiv databehandling for at finde signalet fra en lækage.
Gasfase	Distribuerede sensorer	Netværk af gasfasesensorer installeres i anlægget	Kontinuert	Sive	50	Alle	10	-	200 kr. pr. sensor. Teknologi ikke testet i et solfangerfelt.
Termografi	Løbende opfølgning (dag/nat)	Ingen påkrævet	Efter rekvirering	Alle	-	Alle	-	-	Kendt teknologi. Skal rekvireres ved mistanke om lækage.

* Baseret på Siemens SITRANS FM MAG 3100 P målerør og Siemens SITRANS FM MGAG 5000 sensor med en relativ måleusikkerhed på ca. 0,2 %

** Usikkerhed på tryksignalet



Baseret på Tabel 2 vurderedes det, at flowmålinger, selv under anvendelse af flowsensorer med lav usikkerhed, ikke vil være i stand til at detektere de fleste af de relevante scenarier. Der er flere risici ved at vælge flowmåling som teknologi. En ting er, at flowsensorerne skal være kobled to og to, fordi teknologien ville skulle bero på massebalancen mellem to positioner i systemet, som beskrevet i afsnit 2.3.2. Det betyder, udover at det kræver et stort antal flowsensorer, at hver enkelt sensor er kritisk for netop det område den dækker. Desuden beror princippet om massebalance på kvantitativt at påvise forskelle mellem to målinger i et meget dynamisk miljø, hvilket kræver jævnligt vedligehold og kalibrering af sensorerne. Den eneste løsning blandt de målescenarier, som er præsenteret på forrige side, hvor målerens følsomhed kan detektere en lækage, er en daglig kontrol af flow ind og ud af anlægget om natten, og denne metode ville ikke kunne lokalisere en lækage.

Metoder baseret på trykmålinger præsenterer derfor mange fordele over flowbaseret lækageovervågning. Med en trykbaseret løsning kan hver sensor indgå i et sensornetværk, hvor det er de samlede data fra netværket, der giver en måde at konstatere og spore lækager på. Dette giver en indbygget redundans i løsningen, fordi en enkelt sensor kan fejle uden at det giver generelle problemer. Tryk måles desuden i anlæggene allerede. Det betyder, at et sensornetværk af billige tryksensorer løbende kan sammenlignes med anlæggets sensorer for at kontrollere, at målingerne er realistiske. For lækagesporing kan selv en kvalitativ måling anvendes, fordi alle tryksensorer i nærheden af en lækage forventes at falde relativt i værdi i forhold til sig selv, og dem, der er tæt på en lækage, vil vise et større relativt fald i signal. Desuden kan en tryksensor uden videre installeres på begge ender af hver række, enten på trykreguleringsventilen ved indgangen til rækken eller ved trejvsventilen ved rækkens udgang.

De andre metoder, der har været undersøgt i projektet, er ikke direkte anvendelige. Gasfasedetektion er interessant, fordi detektion af solfangervæsken som gas udenfor anlægget ville være en direkte indikator på en lækage. De sensorer, der har været anvendt i projektet her, er samtidig meget billige at basere en løsning på. Til gengæld er teknologien ikke vist i anvendelse i tilstrækkelig grad. Forsyningerne har haft forsøg med termografering i deres anlæg, men metoden giver ikke mulighed for løbende og passiv overvågning til konstatering af lækager. Akustiske metoder kræver, at den enkelte sensor bliver billigere, før det kan anvendes i solfangeranlæg, og det kræver et større kendskab til akustikkens anvendelse på fjernvarmerør. Succeshistorier med akustiske metoder har indtil videre været på brugsvandsnettet.

I projektet vurderedes det, at en løsning baseret på tryk og temperatur ville give de bedste muligheder at arbejde videre med. Temperaturen er ikke eksplicit vigtig for denne løsning, som det er for flowmetoden for at beregne en massebalance, men tryk og temperatur er korrelerede i anlæggene, og derfor er temperaturmålingen også en del af sensorløsningen.



3. Sensorløsning

I projektet har vi udviklet en tryk- og temperatursensor til brug i solfangeranlæg. De vigtigste designkriterier er opsummeret nedenfor.

Uafhængighed. Denne løsning skal kunne fungere uden forudgående infrastruktur i anlægget. Det vil sige, at løsningen selv skal kunne levere spænding, enten via en batteripakke eller en solcelle, eller en kombination af de to. Desuden skal sensoren selv kunne transmittere de opsamlede data ud af anlægget, da en kablet dataforbindelse ikke kan garanteres.

Ikke-destruktiv. Løsningen må ikke afhænge af, at der ændres i den eksisterende installation i anlægget. Da formålet netop er at finde lækager, skal løsningen ikke risikere at skabe nye lækager, og derfor er det udelukket f.eks. at installere følerlommer til temperatursensorer.

Løsningen blev en sensor, som fungerer på batteri. Kravet om ikke-destruktivitet betyder, at temperaturmålingerne har været udført som såkaldt "clamp-on", hvor en temperatursensor monteres på ydersiden af et væskeførende rør, og rørets overfladetemperatur tages som udtryk for mediets temperatur.



Figur 4: Sensoren monteret i anlægget. Elektronikken kan monteres på et vinkelbeslag. Proben til tryk skrues på et T-stykke udenpå trevejsventilen, og temperaturproben monteres udenpå metaldelen af standerrøret med termisk pasta og aluminiumstape og isoleres bag et stykke rørskål.



Sensoren skal i kontakt med solfangervæsken, så trykket i anlægget kan udlæses. Til det formål kan anvendes både trykstyringsventiler, som sidder på den kolde ende af hver række, og trevejsventiler, som sidder på den varme ende af hver række, ved brug af passende fittings.

Det blev besluttet at indsamle data med en frekvens på 1 Hz, så trykket og temperaturen kunne følges sekund for sekund. For at kunne sikre datasynkronisering mellem de sensorer, der blev sat i netværket, blev det besluttet at forsyne sensorerne med en GPS-antenne, så sensorernes tidsstempel løbende kunne justeres til UTC-tid. Sensoren kommunikerer på LoRaWAN® netværket og sender via en gateway data ind forbi Cibicom-servere, som videresender data med MQTT-protokollen til opbevaring på servere hos Teknologisk Institut. Sensorernes data gøres herfra tilgængelige via et online-dashboard leveret af Teknologisk Institut.

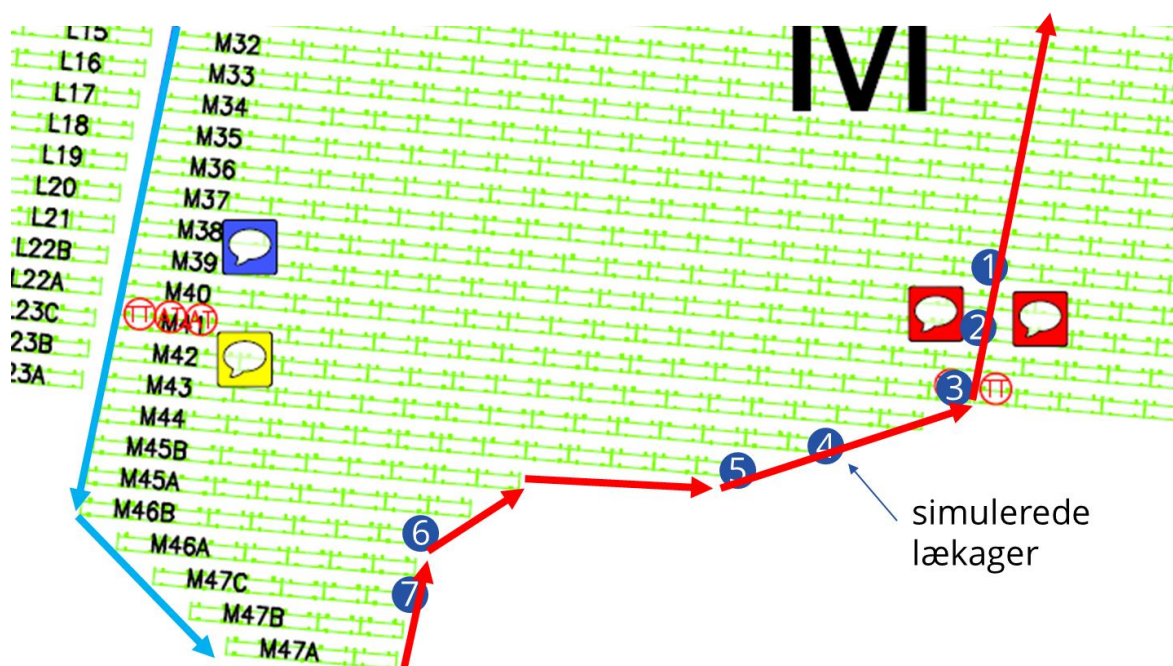
3.1. Komponenter i sensoren

I sensoren sidder en batteripakke, som giver en forsyningspænding på 3,7 V med en kapacitet på 7,8 Ah. Beregningskraften kommer fra en Arduino MKR WAN 1310. Denne mikrocontroller giver samtidig muligheden for at forbinde til et WAN-netværk og giver mulighed for let at integrere GPS-forbindelse. Hertil er der anvendt en Arduino MKR GPS Shield. Sensorerne, en PX3-tryksensor fra Honeywell, og en DS18B20 temperatursensor, udlæses af mikrocontrolleren. Alle elektroniske dele er beskyttet i en IP68-klassificeret plasticboks. Materialeomkostningerne for konstruktionen af disse sensorer har ligget på ca. 2.500 kr., og den gateway, som har været benyttet til at videresende data, koster også ca. 2.500 kr.

4. Målinger i et solfangeranlæg

4.1. Sensorernes placering og installation

Sensorerne blev placeret med især det formål at kunne teste, hvor langt et signal fra en lækage ville kunne spores i anlægget. Testanlægget var anlæg M i Silkeborg. Der var med vilje en stor koncentration af sensorer på et lille område. En skitse af sensorernes indbyrdes placering er vist på Figur 5. Alle sensorer blev placeret på returløbssiden af rækkerne M37, M39, M41, M43, M44, M46 og M47. På 5 af rækkerne, nemlig M37, M39, M41, M43 og M46, blev der desuden installeret ½" kuglehaner, så væske kunne tappes af anlægget og dermed simulere en lækage. Dette var en hovedaktivitet i projektet, eftersom disse lækagesimuleringer skulle lægge grunden for en mulig løsning til automatiseret overvågning. Alle lækagesimuleringer i projektet er udført på række M43 ved den hane, der sidder ved sensor 4. Efter kort tids installation i anlægget blev sensor 3 på række M41 dog ikke anvendt længere, fordi tryksensoren viste sig at være defekt. Denne blev ikke udskiftet i løbet af projektet.



Figur 5: Sensorernes indbyrdes placering i anlægget i Silkeborg. De blå og røde pile markerer hhv. den kolde og den varme side af anlægget og flowretningen. Alle lækager i dette projekt er simuleret ved sensor 4.

4.2. Lækagesimulering 1: Tryksignal fra forskellige størrelser lækager

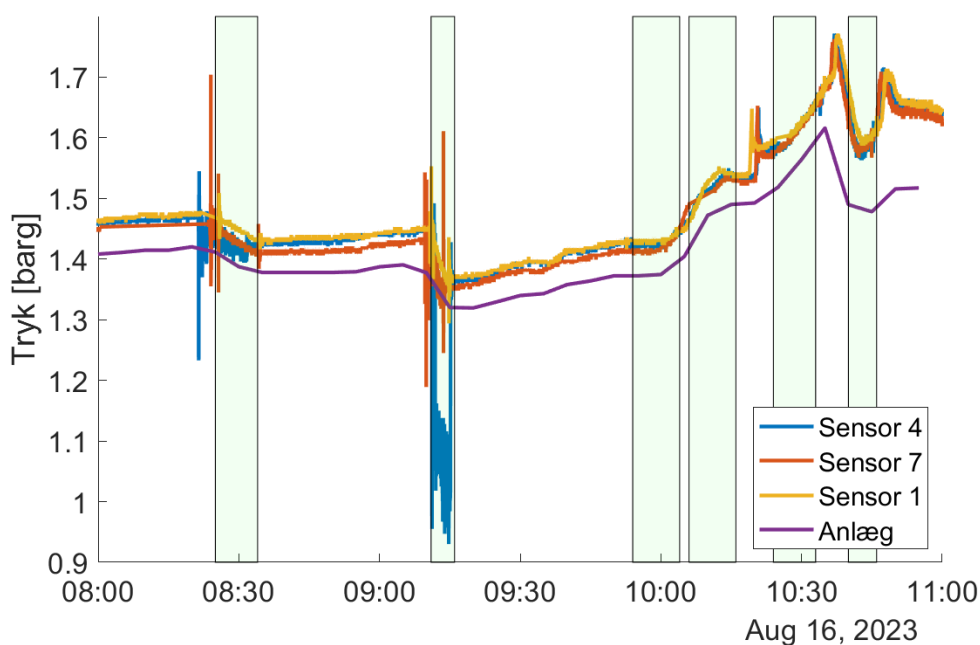
Den første og indledende lækagesimulering blev udført den 13. august 2023 om morgenen. I denne lækagesimulering var formålet at undersøge, hvordan lækager af forskellig størrelse ville give udslag på trykmålingen ved sensoren. Der blev derfor udført i alt seks lækagesimuleringer i fire forskellige størrelser som beskrevet nedenfor.

Tabel 3: Kategorisering af lækagesimuleringer i første runde af simuleringer. Volumenflowet er vurderet ved at notere niveauet i den beholder, som solfangervæsken blev opfanget i under simuleringen.

Kategori	Meget lille	Lille	Mellem	Stor
Udførelse	Ventil næsten lukket	Ventil 1/5 åben	Ventil halvt åben	Ventil fuldt åben
Volumenflow [L/time]	15	240	1200	3600
Situationer	Med og uden flow i anlæg	Uden flow i anlæg	Med og uden flow i anlæg	Uden flow i anlæg



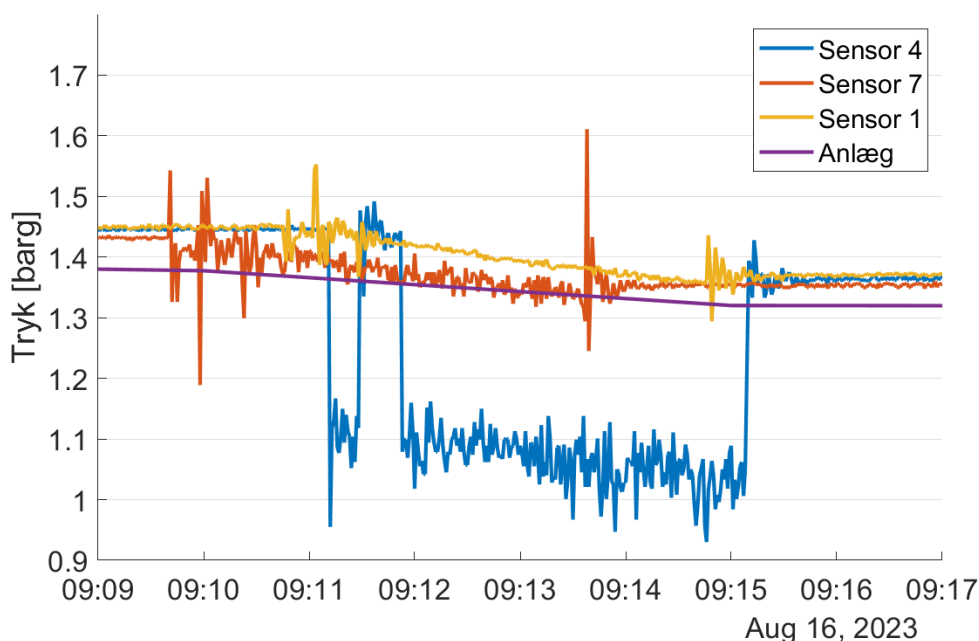
Tryksignalet fra tre af sensorerne under denne periode med lækagesimulering er vist i Figur 6. De grønne markeringer i figuren viser de tidsperioder, hvor en lækage har været åbnet i systemet. Data er samlet for alle de seks aktive sensorer og vises her blot for en sensor før lækagens position set i flowets retning (sensor 7), sensoren ved lækagen (sensor 4) og en sensor efter lækagen (sensor 1). Desuden er også trykdata fra en af anlæggets tryksensorer vist. Mellem periode 4 og 5, svarende til ved 10:20-tiden, begyndte der at være flow i anlægget.



Figur 6: Tryksignal fra de trådløse sensorer under lækagesimulering 1 samt fra en tryksensor på anlægget. De seks grønne markeringer viser, hvornår en lækagesimulering fandt sted. I kronologisk rækkefølge blev der simuleret lækager i kategorierne "mellem", "stor", "lille", "meget lille", "meget lille", "mellem".

Først og fremmest er det værd at bide mærke i, at der er sammenhæng i data: Forløbet af trykdata fra anlæggets sensor er ens med forløbet af trykdata fra de påmonterede sensorer.

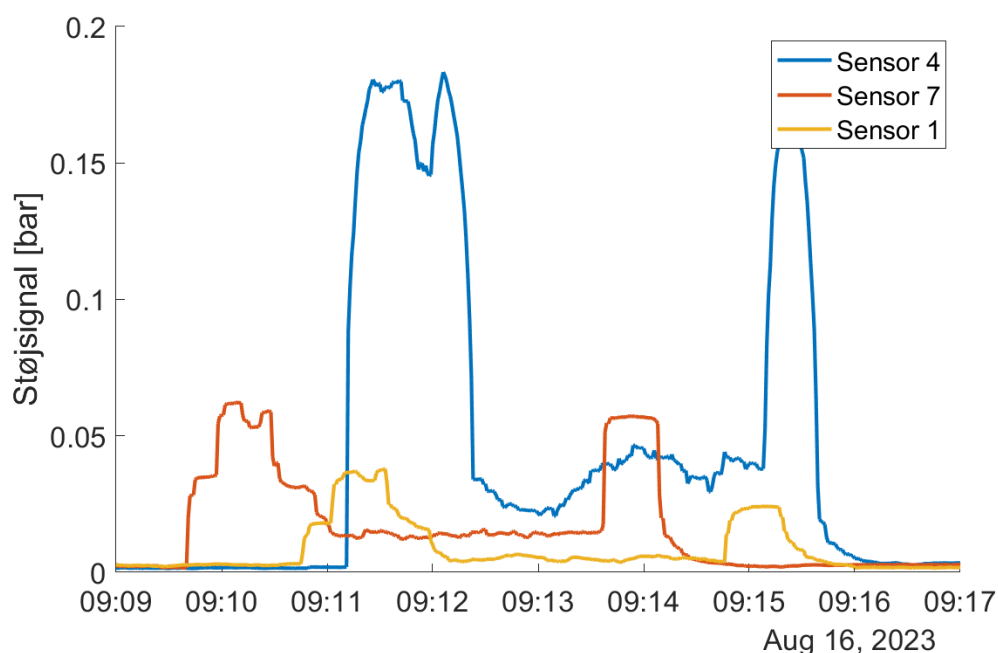
Dernæst er det afgørende at lægge mæske til, hvordan tryksignalet forplanter sig langs rækken af sensorer. Det tydeligste signal fås ved lækagen "stor". Et udsnit af data i denne periode er vist i Figur 7. Her ses det på signalet fra sensor 4, at trykket falder med omtrent 0,3 bar lige i nærheden af lækagen, mens lækagen er åben, og at trykket genoprettes efter perioden med lækage. Desuden ses det, at trykket er omtrent 0,1 bar lavere efter lækagen end før.



Figur 7: Udsnit af sensor- og anlægsdata ved lækagen "stor" under lækagesimulering 1.

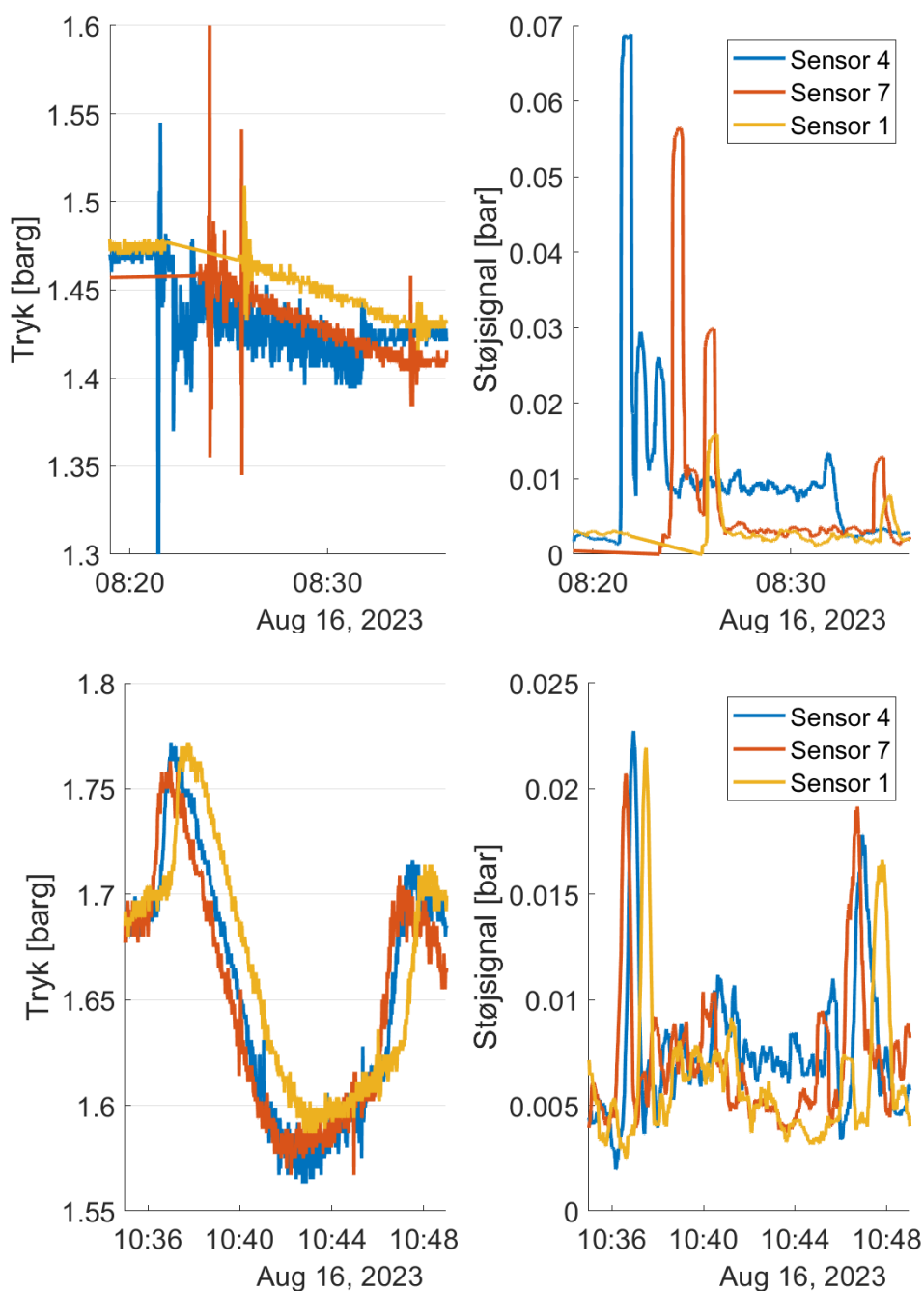
I dataene ses også en forskel i, hvorvidt sensoren sidder før eller efter lækagen. I dataene fra sensor 4 er der tydelig støj i tryksignalet. I data fra sensor 1 (efter lækagen) er der mindst støj, mens data fra sensor 7 (før lækagen) viser et middelniveau af støj. Denne observation er her kvantificeret ved at beregne standardafvigelsen af trykdataene. Beregningen foregår ved til et bestemt tidspunkt at tage et udsnit af data, der varer fra 30 sekunder inden og frem til det givne tidspunkt og beregne standardafvigelsen af trykdata indenfor dette udsnit. "Støjen" er således et udtryk for, hvor stor varians der til et givent tidspunkt har været i dataene indenfor de foregående 30 sekunder.

En graf over "støjniveau" er vist i Figur 8. De høje toppe ved begyndelse og afslutning går igen i alle tre datasæt, svarende til den pludselige ændring i tryk der sker, når hanen ved sensor 4 åbnes for at simulere lækagen. Ved at betragte den mellemliggende periode mellem de to toppe ses det samme billede, som man kan fornemme i de rå trykdata, nemlig at støjniveauet for sensor 1 er højest tæt ved lækagen, lavest efter lækagen og højest før lækagen.



Figur 8: Støjsignal fra tre sensorer ved lækagen "stor" under lækagesimulering 1. Støjsignalet for et givent tidspunkt er fundet ved at beregne standardafvigelsen i de 30 foregående sekunder.

Denne sammenhæng bliver dog mindre tydelig, når flowet igennem lækagen bliver mindre. Allerede ved lækagesimuleringer i den størrelse, vi her kalder "mellem", er det ikke ligetil at se en sammenhæng. De to lækagesimuleringer i kategorien "mellem" er vist i Figur 9. Inden der er flow i anlægget, ses samme mønster som ved simuleringen "stor", nemlig at trykket er lavere efter der er lukket væske ud end før, og at det gælder på alle tre sensorer. Støjen er også størst på sensor 4, som er lige ved siden af den åbne hane. Til gengæld er støjniveauet på sensor 1 og sensor 7 næsten ens. Med flow i anlægget forsvinder forskellene i støjniveau mellem de tre sensorer helt. Perioderne med simulerede lækager i kategorierne "lille" og "meget lille" gav ikke noget udslag i tryksignalet.



Figur 9: Lækagesimuleringer af kategorien "mellem" under lækagesimulering 1. Øverst: Uden flow i anlægget. Nederst: Med flow i anlægget. Støjsignalet for et givent tidspunkt er fundet ved at beregne standardafvigelsen i de 30 foregående sekunder.



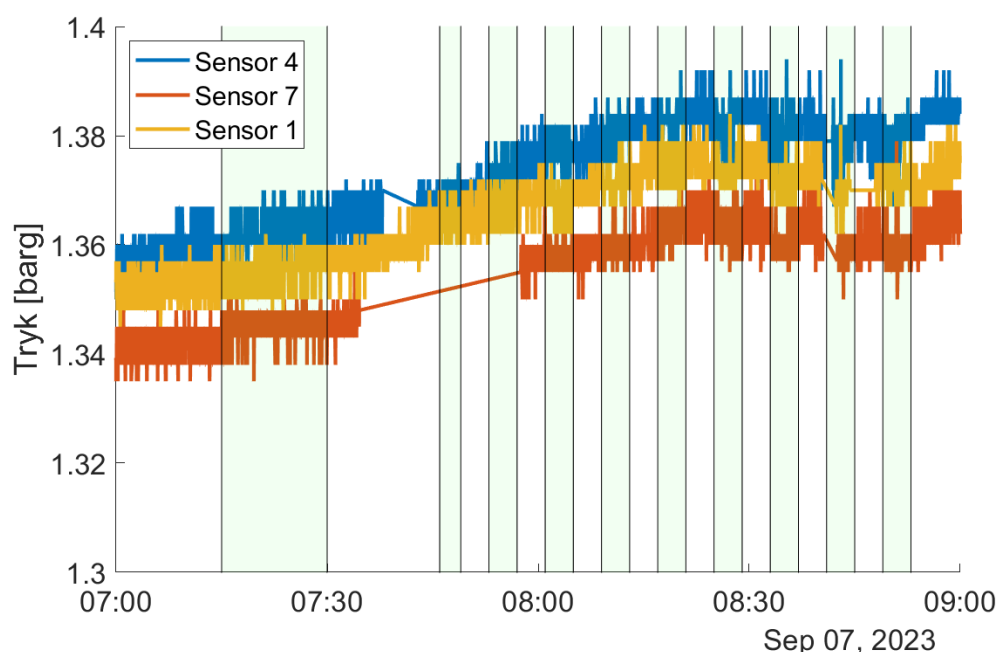
4.3. Lækagesimulering 2: Små lækager uden flow

Første omgang af lækagesimuleringer og den efterfølgende diskussion af data lå til grund for at undersøge, hvor små lækager netværket af sensorer kan opfange, inden der sættes flow på anlægget, og signalet som følge deraf bliver mindre tydeligt. Anden omgang af lækagesimuleringer ("lækagesimulering 2") blev derfor udført tidligt om morgenen, inden der blev sat flow på i anlægget. Disse lækagesimuleringer var i kategorierne "meget lille" og "lille". Simuleringerne i kategorien "meget lille" blev udført mellem kl. 7:15 og 8:25 om morgenen, og lækagerne i kategorien "lille" blev udført mellem kl. 8:25 og 8:55.

Tabel 4: Kategorisering af lækagesimuleringer i anden runde af simuleringer. Volumenflowet er vurderet ved at notere niveauet i den beholder, som solfangervæsken blev opfanget i under simuleringen.

Kategori	Meget lille	Lille
Udførsel	Ventil næsten lukket	Ventil 1/5 åben
Volumenflow [L/time]	15 - 24	168 - 285

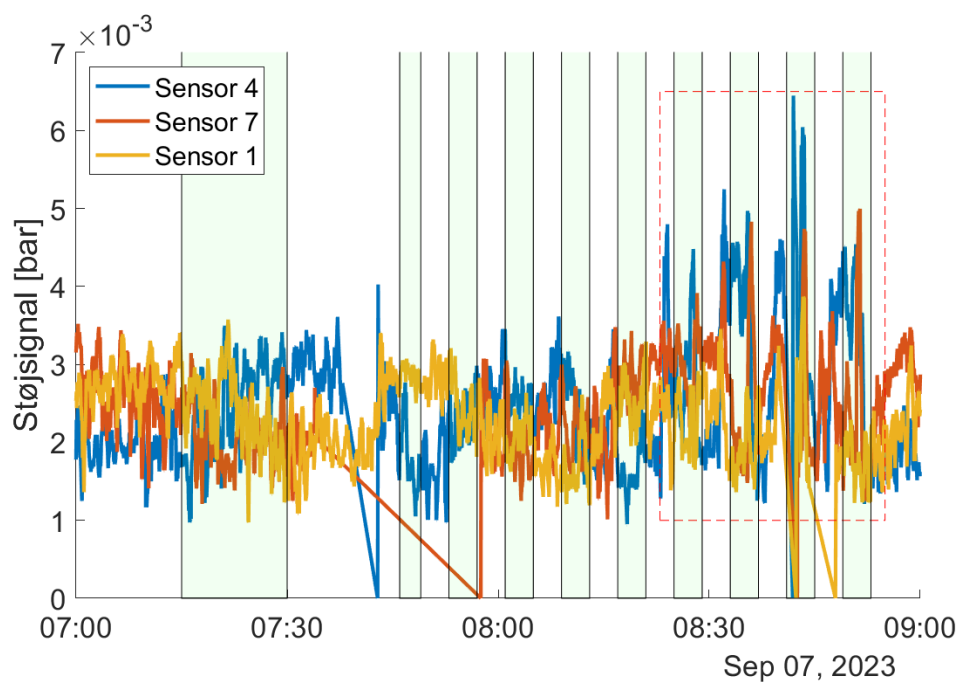
Trykdata fra perioden er vist i Figur 10. De første seks perioder med lækagesimulering er i kategorien "meget lille", mens de sidste fire perioder er i kategorien "lille". Ved ingen af perioderne ses der et dyk i trykket som under den store og den middelstore lækage i lækagesimulering 1.



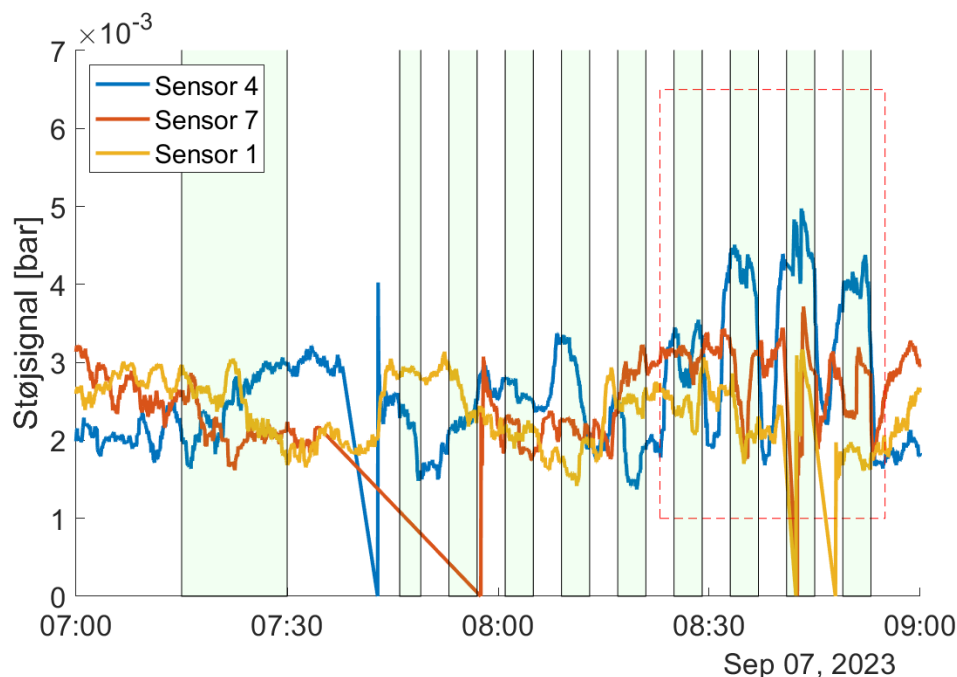
Figur 10: Trykdata fra perioden for lækagesimulering 2.



På baggrund af resultaterne fra lækagesimulering 1 blev støjsignalet også beregnet for disse trykdata og igen i en periode af de foregående 30 sekunder for hvert tidspunkt. Støjsignalet er vist på Figur 11. Data viser, at der ingen forskel er på støjniveauet i sensor 1 og sensor 7 under lækagesimulering 2. På sensor 4, som sidder lige ved siden af den åbne hane, er der på samme måde ingen ændring i støjniveauet at se under de seks lækager i kategorien "meget lille". Der er antydningen af en ændring i støjsignalet under de fire lækager i kategorien "lille" (markeret med rød stiplede linje i Figur 11). Det bemærkes her, at udseendet af støjsignalet ændres ved at ændre på det tidsinterval, som standardafvigelsen beregnes over. På Figur 12 vises støjsignalet fundet ved at beregne standardafvigelsen for et givent tidspunkt hen over de foregående 120 sekunder.



Figur 11: Støjsignalet hen over de to timer, hvor lækagesimulering 2 blev foretaget. Støjsignalet for et givent tidspunkt er fundet ved at beregne standardafvigelsen i de 30 foregående sekunder. Kassen med den røde stiplede grænse markerer fire gange, hvor en lækage i kategorien "lille" blev simuleret, hvor et lille støjsignal hæver sig fra baggrunds niveauet for sensor 4.

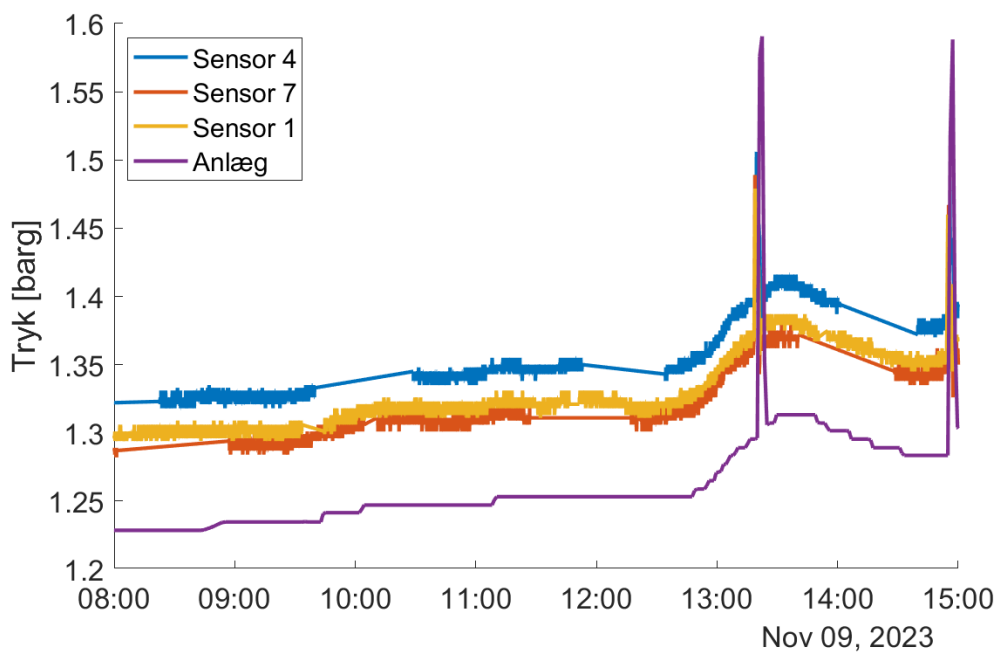


Figur 12: Støjsignalet hen over de to timer, hvor lækagesimulering 2 blev foretaget. Støjsignalet for et givent tidspunkt er fundet ved at beregne standardafvigelsen i de 120 foregående sekunder. Kassen med den røde stiplede grænse har samme betydning som i Figur 11.

4.4. Lækagesimulering 3: Små, langvarige lækager og uden trykholdesystem

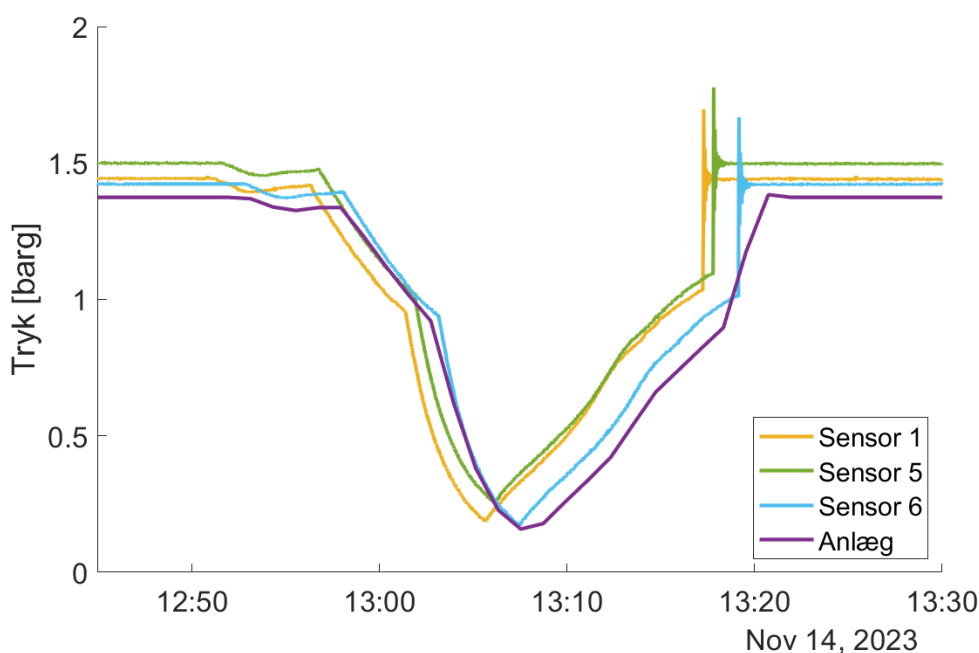
På baggrund af resultatet i lækagesimulering 2, som viste, at lækager i kategorien "meget lille" ikke var synlige, og at lækager i kategorien "lille" kun var svært synlige, blev det besluttet at foretage to yderligere undersøgelser af effekten af små lækager. Den ene undersøgelse der er foretaget, undersøger påvirkningen på trykket i anlægget, når en lille lækage står åben i længere tid, mens den anden lækage undersøger påvirkningen af en lækage på trykket i solfangeranlægget, hvis anlæggets trykholdesystem er koblet fra.

Den første test blev foretaget den 9. november 2023. Fra kl. 8:25 til 14:20 var hanen på række M43 åbnet til at give en lækage i kategorien "lille". Data er vist i Figur 13. Herved blev det konstateret, at selv ved en længerevarende lækage af denne størrelsesorden ses der ikke et udslag i tryksignalet.



Figur 13: Trykdata under lækagesimulering 3. Mellem kl. 8:25 og 14:20 var hanen ved sensor 4 åben og simulerede en lækage i kategorien "lille".

Den anden test i lækagesimulering 3 blev foretaget den 14. november 2023, hvor det blev testet, hvorvidt små lækager ville give udslag i anlæggets tryk, hvis anlæggets trykholdesystem er frakoblet. Til denne test var der tre af de oprindelige syv sensorer, der sendte data. Disse data, sammen med data fra en tryksensor i anlægget, er vist i Figur 14.



Figur 14: Trykfald som følge af først en "lille" lækage og dernæst en "mellem" lækage, når anlæggets trykholdesystem ikke er slået til. Trykfaldet ses både i de påmonterede sensorer og i anlæggets egen tryksensor. Det skyldes sandsynligvis en fejl i synkroniseringen af sensorernes ur, at data ikke ligger samtidigt på den horisontale akse.

I denne test åbnedes først en lækage i kategorien "lille" ved sensor 4 (række M43) i fem minutter, og umiddelbart derefter blev hanen åbnet til at give en lækage i kategorien "mellem". Data viser, at uden trykholdesystemet tilkoblet giver både en "lille" og "mellem" lækage med det samme udslag i det tryk, der måles i anlægget, både af anlæggets fastmonterede sensor og af de sensorer, der er monteret i forbindelse med projektet. Forskellen mellem de to lækagestørrelser består i, hvor hurtigt trykket falder.

5. Diskussion

Data i dette projekt viser, at det som først teoretiseret under teknologigennemgangen er muligt at observere et trykfald lokalt omkring en lækage, mens denne er åben. Dette er dog mest af teoretisk interesse, idet faktiske lækager er meget mindre end den simulering, hvor resultatet blev set. Den lækage gav et flow ud af anlægget på omtrent 3600 L/time, hvorimod en lækage som den, der er forekommet under jorden i anlægget hos Sydfalster Varmeværk, lækede omkring 200 L/døgn, svarende til 8,3 L/time – altså kun omtrent 0,2 % af den lækage, hvor trykfaldet kunne detekteres med den nuværende sensor. Den lækagekategori, som er simuleret i projektet, som har været tættest på dette flow er "meget lille" på omtrent 15 L/time, og denne kategori gav ikke udslag i nogen af de testede scenarier.

Transformationen fra at se på den direkte trykaflæsning til at se på støj i tryksignalet, som defineret i foregående afsnit, giver lidt bedre sensitivitet overfor de simulerede lækager. Her var det muligt i en



situation uden flow i anlægget at se en lækage i kategorien "lille" på omtrent 240 L/time. Lækagen i anlægget hos Sydfalster Varmeværk svarer til ca. 3 % af denne størrelse. Dertil hører også, at lækagen i kategorien "lille" kun var synlig på sensoren umiddelbart ved siden af den hane, hvor lækagen blev simuleret, som vist på Figur 12.

I forhold til sporing viser disse resultater, at sporing af lækager med et sensornetværk er muligt for meget store lækager på flere kubikmeter i timen. Data fra lækagesimuleringerne i kategorierne "mellem" og "stor" viser tilmed, at den forstyrrelse i tryksignalet, som her er kaldt støj, bevæger sig både frem og tilbage igennem anlæggets rørsystemerne og kan opfanges af flere sensorer, og at støjen aftager med afstanden. Disse resultater viser, at det med den rigtige tæthed af sensorer ville være muligt at erkende og spore en lækage. Det viser dog også, at følsomheden af sensornetværket skal forbedres meget, før det er en mulighed. Hvis det i praksis viser sig, at der er brug for en sensor på hver 5. række, så siger et groft overslag, at i et anlæg med 100 rækker, hvor en sensor skulle monteres på både den kolde og den varme række, vil det kræve 40 sensorer til en pris på omkring 2.500 kr. hver og dermed en total anskaffelsespris på 100.000 kr. I praksis kan det dog vise sig, at færre sensorer kan give samme dækning.

Det tydeligste signal af en lækage ses, når anlæggets trykholdesystem er frakoblet som vist i Figur 14. Her var det muligt straks at se lækager i kategorierne "lille" og "mellem". Dette gør det sandsynligt, at mindre lækager også er synlige, især hvis trykket observeres over længere tid end de fem minutter, som testen her varede. Det betyder, at det her er vist, at observation af trykket, når trykholdesystemet er slået fra, kan anvendes til at *erkende* lækager. Eftersom den totale trykændring er ens på de tre sensorer og anlæggets sensor i det forsøg, der er vist her, finder vi ikke nogen afstandsafhængighed af trykændringen fra positionen for lækket. Til gengæld har sensorerne været placeret relativt tæt på hinanden under dette projekt i forhold til anlæggets størrelse, og derfor er det muligt, at der kan observeres en forskel i størrelsen på trykfaldet, hvis sensorerne placeres længere væk fra hinanden. I så fald kunne et sensornetværk gøre brug af færre - måske ned til 10 - sensorer og samtidig give en indikation af, i hvilken del af anlægget en lækage befinder sig.

5.1. Evaluering af sensorer

Den konkrete sensor, som blev udviklet til dette projekt, har i det store hele fungeret efter hensigten. Af fokuspunkter har blandt andet været batterilevetiden, og hvor let det var at installere sensoren.

Batterilevetiden har ikke været et problem indenfor projektets rammer. Efter installation i juli 2023 har en enkelt af sensorerne indtil januar 2024 sendt data svarende til over 54 dages uafbrudt datatransmission med et datapunkt pr. sekund, og den sensor, der har sendt færrest data har sendt svarende til 18 dages uafbrudt data med samme frekvens. En sensor med samme batteri, der optager data en gang hvert 20. sekund ville kunne indsamle data i mindst et år, før batteriet skulle skiftes.

Andre fokuspunkter går på sensorens styrke, samt hvor praktisk det er at installere sensoren i anlægget. Under dette projekt, hvor alle sensorerne har siddet på trevejsventilen i den varme ende af rækkerne, har sensoren skulle passe under den kasse, der normalt sidder og beskytter og isolerer trevejsventilen. Dette har givet problemer med det stik, der forbinder tryktransmitteren til sensorens elektronik, fordi



stikket til den sensor, der har været anvendt her, er af plastic, som nemt knækker, især i kolde perioder. Mere permanente løsninger anbefales derfor at være udført i metal.

I forhold til montering af sensorerne i anlægget kan den nuværende iteration af sensoren ikke skilles i hoveddele. Kablerne til tryktransmitter og til temperaturprobe ikke afmonteres fra sensorens kabinet, og batteriet kan ikke nemt udskiftes med et andet, da alle dele er loddet sammen. I fremtidige iterationer af en tilsvarende sensor bør begge dele være muligt. Afmontering af kablerne ville gøre det muligt at trække kablerne kortere end den nuværende installation, som f.eks. er vist på Figur 4. Afmontering af batteriet ville gøre det muligt at udskifte batteri på sensorerne, mens sensoren sidder i anlægget, så man dermed undgår at afmontere hele sensoren for en opladning.

6. Konklusion og videreførelse af projektets resultater

Projektet har haft som formål at imødegå udfordringen med lækager i store solvarmeanlæg i fjernvarmen. Teknologisk Institut har i tæt samarbejde med de fire forsyninger Gram Fjernvarme, Jægerspris Kraftvarme, Silkeborg Forsyning og Sydfalster Varmeværk undersøgt relevante teknologier for lækageovervågning. Disse teknologier er blevet evalueret i forhold til anvendelse i solfangeranlæg baseret på litteraturstudier og forsyningernes erfaringer med drift og vedligehold af solvarmeanlæg.

Den teknologi, der blev vurderet som den bedste mulighed for en løsning til generelt brug, baserer sig på trykmålinger i solfangeranlæggene, bl.a. fordi målinger af denne type kan sammenlignes med de målinger, der allerede foregår i anlæggene. Desuden er det vist i litteraturen, at trykmålinger både kan anvendes til lækageovervågning og -sporing. Et andet spændende spor, som kan blive relevant for fremtidige indsatser, er sporing af lækager med gasfasesensorer, hvor lækket solvarmevæske konstateres og spores, når det fordampes. Det er i projektet vist, at gængse gasfasesensorer kan detektere solvarmevæsken.

En sensorløsning til trykmålinger i solfangeranlæggene er blevet udviklet, og data er taget hjem fra anlægget i Silkeborg under tre perioder med lækagesimulering. Det betyder for det første, at projektet har vist, hvordan det kan lade sig gøre at tage data hjem fra et solfangeranlæg, selvom der ikke er installeret netværksforbindelse eller strømforsyning i anlægget. Det er derfor muligt, at den platform, der har været anvendt til datahjemtag i dette projekt, kan anvendes i andre sammenhænge, for eksempel som platform for yderligere tests af gasfasesensorerne under realistiske betingelser.

På baggrund af de trykdata, som er indsamlet, peger projektet i retning af flere spændende spor, som kan forfølges til en generel løsning til lækageovervågning af solfangeranlæg: I tilfældene med lækagekategorierne "mellem" og "stor" har data vist, at signalet fra en lækage i anlægget bevæger sig igennem anlæggets rørføring. I begge situationer ses det, at effekten af at åbne lækagen kan observeres på de sensorer, der sidder yderst i netværket og op mod 100 m væk fra selve lækagen. Dette viser, at trykmålinger også i praksis kan anvendes til at overvåge lokale hændelser i anlæggene.

Projektet har også vist, at den dynamiske situation i anlæggene betyder, at der er store muligheder i løsninger baseret på at holde så mange som muligt af parametrene i anlægget så konstante som muligt.



I afsnit 4.4 blev det vist, at alle sensorer reagerer ens på et trykfald, når anlæggets ekspansionssystem er slået fra. Dette er det tydeligste signal, vi i projektet har set på, at sensorerne kan registrere en hændelse på stor afstand. Det faktum, at sensorerne reagerer ens, giver ikke umiddelbart en metode til at lækagespore med den konstruktion, som netværket havde under de tests, der blev foretaget. Yderligere tests vil kunne afdække, hvor langt sensorerne kan være fra hinanden og stadig registrere det samme trykfald uden ekspansionssystemet. Et forslag er at placere sensorer på både de kolde og de varme ender af solfangerrækkerne, ligesom sensorerne kan placeres i større afstand fra hinanden i anlægget. I de tests, der er foretaget her, har sensorerne været placeret relativt tæt på hinanden i forhold til anlæggets størrelse, netop for at sikre, at der ville være et signal, som gik igen blandt sensorerne. Det er muligt, at sensorer i modsatte ende af et anlæg fra en lækage vil se et lavere trykfald, når ekspansionssystemet er koblet fra, end sensorer der som her alle sidder relativt tæt. I så fald vil det være muligt at pege på i hvilket område af anlægget lækagen formodes at være, omend ikke den præcise lokation.

Et andet spor for videre arbejde går på andre anvendelser af de sensorer, der har været bygget til projektet. I anlægget i Silkeborg, som står på kuperet terræn, har man et ønske om at vide, om rækkerne opfører sig ens, især på varme sommerdage, hvor der er mistanke om, at solvarmevæsken koger. Sensorerne giver en metode til let at overvåge anlægget i længere perioder på en måde, der kan afmonteres og flyttes, og dermed give et indblik i anlæggets opførsel lokalt på udvalgte steder. I dette tilfælde er det især sensorernes temperaturlæsning, der er nyttig. Der ses ikke umiddelbart et behov for ekstra trykmålinger, idet tryktransmitterne selv udgør en risiko under kogning i anlægget. På samme måde som kogning, kan frysning give problemer i anlægget. Tilsvarende kan sensorerne derfor anvendes til at overvåge temperaturerne lokalt i anlægget, så der kan sættes flow på anlægget inden væsken fryser. I øjeblikket har anlæggene forskellige sikkerhedsmargener for at sikre mod frost.

I den kommende tid vil Teknologisk Institut og de deltagende forsyninger arbejde videre med denne problemstilling, samt de spor for videre arbejde, der er afdækket her. Resultaterne udgør et vigtigt udgangspunkt, som vil forsøges videreført til andre F&U-projekter, hvor både forsyninger og kommercielle partnere vil have muligheden for at bygge videre på læringen fra dette projekt og deltage i udviklingen af teknologier til lækageovervågning i solfangeranlæg.



7. Referencer

Abdulshaheed, A., Mustapha, F., Ghavamian, A. (2017) "A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **69**: 902-911.

Bohne, D., Fischer, S. and Obermeier, E. (1984) "Thermal, Conductivity, Density, Viscosity, and Prandtl-Numbers of Ethylene Glycol-Water Mixtures". *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, **88**: 739-742

Miljøstyrelsen, 2021, "Jordforurening fra solfangeranlæg". Miljøprojekt nr. 2160.

Silva, R. A., Buiatti, C. M., Cruz, S. L., Pereira, J. A. F. R. (1996) "Pressure wave behaviour and leak detection in pipelines". *Computers & Chemical Engineering*. **20**: S491-S496

Wan, J., Yu, Y., Wu, Y., Feng, R., Yu, N. (2012) "Hierarchical Leak Detection and Localization Method in Natural Gas Pipeline Monitoring Sensor Networks". *Sensors*, **12**: 189-214

Zeng, W., Cazzolato, B., Lambert, M., Stephens, M., Gong, J. (2022) "Coherenceogram for leak detection in water pipes". *Journal of Sound and Vibration*. **530**: 116979

8. Bilag

Som bilag til denne rapport er udarbejdet

- Appendiks A: Gasfasedetektion af solfangervæske



TEKNOLOGISK
INSTITUT