

Undersökning av luftfuktighetens förändring över tid och dess påverkande faktorer i fjärrvärmekulvert

Analys av mätdata från Öresundskrafts fjärrvärmenät

av Olof Olsson



LUND UNIVERSITY

Examensarbete på Civilingenjörsnivå

Föreliggande examensarbete på civilingenjörnivå har genomförts vid Avdelningen för Energihushållning, Institutionen för energivetenskaper, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet. Arbetet genomfördes i samarbete med Öresundskraft AB.

Handledare på Lunds Universitet: Kerstin Sernhed.

Handledare på Öresundskraft: Magnus Ohlsson.

Examinator på Lunds Universitet: Marcus Thern.

© Olof Olsson 2022

Avdelningen för Energihushållning

Lunds Tekniska Högskola

Lunds Universitet

ISSN: 0282-1990

ISRN: LUTMDN/TMHP-22/5500-SE

Skrivet i L^AT_EX

Lund 2022

Förord

Det här examensarbetet utgör det sista momentet i min utbildning inom Maskinteknik med inriktning Energiteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har skrivits i samarbete med Öresundskraft under perioden januari – maj 2022.

Jag vill tacka mina handledare som har stöttat mig under den här tiden. Kerstin Sernhed på avdelningen för Energihushållning vid LTH som har försett mig med välutnyttjad litteratur och väglett mig under perioder när det var svårt att bestämma riktning i arbetet. Magnus Ohlsson på Öresundskraft, för all konstant hjälp, stora entusiasm för mina resultat och rundturer i fjärrvärmenätet. Jag vill även tacka Madeleine Brask på Miljöbron som gjorde det möjligt för mig att hitta arbetet. Till sist vill jag rikta ett tack till övriga medarbetare på Öresundskraft som har hjälpt mig med frågor, utrustning och navigerande i datorsystem.

Juni 2022, Lund

Olof Olsson

Sammanfattning

Fjärrvärmen är en mogen uppvärmningsteknik som under lång tid har byggts ut i Sverige. Stora delar av fjärrvärmebolagens kapital består av ledningarna som är nedgrävda i marken. Att ha kunskapen om statusen på sina fjärrvärmeledningar är viktigt för att kunna undvika kostsamma skador och bedöma förnyelsebehov. För de äldre delarna av fjärrvärmenätet, där ledningarna är förlagda i kulvertar har det tidigare inte funnits några bra sätt att utföra korrekta statusbedömningar. Öresundskraft, som är ett av de större fjärrvärmebolagen i Sverige, har beslutat att använda sig av digitalteknik för att kunna mäta och samla in data om tillståndet i kulvertsystemet.

Korrosionsskador står för en stor andel av skadorna i fjärrvärmenätet. Närvaro av vatten eller hög luftfuktighet är en förutsättning för att korrosionsprocessen ska ske. Det är därför viktigt att förstå sig på vad som föranleder vatten och fukt i systemet för att kunna förhindra det och minska risken för skador. En parameter som Öresundskraft mäter är den relativa luftfuktigheten, vilken är central i analysen i det här arbetet.

Resultaten visar att luftfuktigheten influeras av temperaturen i kulvertsystemet och ventilation samt nederbörd. Ventilationen är i sin tur nära kopplad till placering av ventilationstorn, typ av kulvertkonstruktion, som betong- och eternitkulvert, och typ av stöd för medierör. Öppen kulvert, där betongkulvert främst ingår, utmärks av att luft har möjlighet att flöda igenom den. Ventilationen kan där estimeras av hur väl variationen i luftfuktighet mellan mätpunkter följer samma mönster. För stängd kulvert är istället samvariation mellan luftfuktighet i systemet och temperatur utomhus en bättre indikator av ventilation.

Analysen resulterar i en regressionsmodell där luftfuktighet i systemet förklaras av temperaturen i densamma. Modellen är skapad av mätvärden från punkter i nätet där förhållandena anses vara tillfredsställande. Genom att använda modellen på övriga delar av nätet fås en uppfattning om luftfuktigheten ligger på en rimlig eller för hög nivå. I det senare fallet kan orsaken felsökas med hur luftfuktigheten förhåller sig till bland annat ventilation och nederbörd.

Metoden som har använts är främst baserad på statistisk sambandsanalys. Korrelation används i stor utsträckning för att identifiera påverkande faktorer till luftfuktigheten i systemet och regressionsanalys används för att skapa en utvärderande modell för luftfuktigheten och identifiera delar av nätet som riskerar utsättas för korrosionsskador. Informationssökning i Öresundskrafts nätverk- och informationssystem utförs för att hitta förklaringar till det datan visar.

Nyckelord: Fjärrvärme, Betongkulvert, Eternitkulvert, Kammare, Statusbedömning, Korrosion, Luftfuktighet, Korrelation, Regression

Abstract

District heating is a mature heating technology that has been employed in Sweden for a long time. A great deal of the district heating companies' capital consists of the pipes that are buried in the ground. It is of importance to possess the knowledge of the status of the district heating pipes in order to be able to avoid costly damage and for assessing renewal needs. Concerning the older parts of the district heating network, where the pipes are located in culverts, there have previously been no sufficient ways to perform status assessments. Öresundskraft, which is one of the larger district heating companies in Sweden, has decided to use digital technology to be able to measure and collect data regarding the condition of the culvert system.

Corrosion damage accounts for a large proportion of the damage in the district heating network. The presence of water or high levels of humidity is a prerequisite for the corrosion process to take place. It is therefore important to understand what causes water and moisture in the system in order to prevent it and reduce the risk of damage. One of the parameters that Öresundskraft measures is the relative humidity, which is central to the analysis in this thesis.

The results show that the humidity is influenced by the temperature in the culvert system and ventilation as well as precipitation. Furthermore, the ventilation is closely related to the location of the ventilation towers, type of culvert construction, such as concrete and asbestos cement culverts, and type of support for the district heating water pipes. Open culverts, mainly concrete, are characterized by the fact that air has the possibility to flow through them. Here, the ventilation can be estimated by how well the variation in humidity between measuring points follows the same pattern. For closed culverts, covariation between humidity in the system and outdoor temperature is a better indicator of ventilation instead.

The analysis results in a regression model where humidity in the system is explained by the temperature inside. The model is created with data from measuring points in the network where the conditions are considered satisfactory. By using the model on other parts of the network, it provides an indication of whether the humidity is at a reasonable level or too high. In the latter case, the cause can be trailed with the relationship between humidity and, among other things, ventilation and precipitation.

The method that has been used is mainly based on statistical calculations. Correlation is used to identify factors affecting the humidity in the system and regression analysis is used to create an evaluative model for the humidity and identify parts of the district heating network that are at risk of corrosion damage. Information retrieval in Öresundskraft's network and information system is performed to find explanations for what the data shows.

Keywords: District Heating, Concrete Culvert, Asbestos Cement Culvert, Chamber, Status Assessment, Corrosion, Humidity, Correlation, Regression

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Introduktion	1
1.2	Syfte	2
1.2.1	Frågeställningar	3
1.3	Avgränsningar	3
1.4	Rapportens disposition	4
2	Bakgrund	5
2.1	Öresundskraft	5
2.2	Baltic Smart Asset Management	5
2.3	PreDHiCt	6
2.4	Skaderisker i fjärrvärmenätet	6
2.5	Underhåll av fjärrvärmenätet	7
3	Teori	9
3.1	Kulvertsystem	9
3.1.1	Betong	9
3.1.2	Eternit	10
3.2	Smart Aktiv Box	11
3.2.1	Mätvärden	12
3.2.2	Termoelektrisk generator	13
3.3	Korrosion	14
3.4	Luftfuktighet	18
3.5	Ventilation	19
3.6	Statistisk sambandsanalys	20
3.6.1	Korrelation	20
3.6.2	Regression	22
3.6.3	Konfidensintervall	24
4	Metod	25
4.1	Analys av data från SAB	26

4.1.1	Luftfuktighet i kammare och kulvert	27
4.1.2	Luftfuktighetens temperaturberoende	28
4.1.3	Ventilation i kammare och kulvert	28
4.2	Information från NIS	29
4.3	Fältbesök	30
4.4	Regressionsanalys och felsökning	30
5	Resultat	33
5.1	Luftfuktighet som funktion av temperatur	33
5.2	Tidsserie av luftfuktighet och temperatur	35
5.2.1	Inverkan av nederbörd	39
5.2.2	Spridning i dagsvärden	40
5.3	Ventilation	41
5.3.1	Betongkulvert	44
5.3.2	Eternitkulvert	45
5.4	Regressionsanalys	46
5.4.1	Endast temperatur	46
5.4.2	Temperatur och ventilation	48
5.4.3	Felsökning	50
5.5	Fältbesök	52
6	Diskussion	55
6.1	Ventilation	56
6.1.1	Antagande	56
6.1.2	Nackdelar med måttet	56
6.1.3	Varierande ventilation	57
6.1.4	Luftflöde genom kulvert	57
6.2	Regressionsmodell för felsökning	58
6.2.1	Felsökning	59
6.2.2	Utvärdering av regression	60
6.3	Övriga observationer från analysen	60
6.4	Framtida studier	61
6.5	Användningsområde	62
7	Slutsats	64

Referenser	66
Appendix	69
A Data från serie av kammare	69
B Matlabkod	71

Figurer

1	Dränkt eternitkulvert där mycket av isoleringen har sköljts bort.	7
2	Betongkulvert som används av Öresundskraft.	10
3	Stöd som används av Öresundskraft i deras eternitkulvert. Från vänster: metallstöd, polyuretanstöd och cellbetongstöd.	11
4	Eternitkulvert med polyuretanstöd.	11
5	Smart Aktiv Box.	13
6	Termoelektrisk generator monterad på en framledning.	14
7	Korrosionshastighetens beroende på temperatur.	15
8	Olika typer av korrosion.	16
9	Skadestatistik år 1999 för ett urval av fjärrvärmenät.	17
10	Korrosionsskador i olika markförhållanden, år 1999.	18
11	Relativ luftfuktighet som en funktion av temperatur för olika värden av absolut luftfuktighet.	19
12	Skorstenseffektens princip.	20
13	Punktdiagram som illustrerar förhållandet mellan två variabler.	21
14	Punktdiagram med regressionslinje.	23
15	Metodens flödesschema.	26
16	Flödesschema för regressionen.	32
17	Relativ luftfuktighet som en funktion av temperatur, skapad med verklig data.	34
18	Tidsserier BTG2.	35
19	Tidsserier ETN1.	36
20	Tidsserier ETN3.	37
21	Tidsserier ETN5.	38
22	Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 60011-00 och nederbörd.	39
23	Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 42006-00 och nederbörd.	40
24	Daglig spridning av mätningar för relativ luftfuktighet i kammare 60011-00.	41
25	Daglig spridning av mätningar för relativ luftfuktighet i kammare 72009-00.	41
26	Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 72009-00 och utomhustemperatur.	42
27	Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 45015-00 och utomhustemperatur.	42

28	Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 49002-00 och utomhustemperatur.	43
29	Vindros i Helsingborg för två olika perioder. Vindhastighet i m/s.	44
30	En sekvens av kammare där skorstenseffekten manifesteras.	45
31	Regression med luftfuktighet i kammare som y och temperatur i kammare som x	47
32	Betongkulvert. Regression med luftfuktighet i kammare som y , funktion av temperatur i kammare som x_1 och ventilation som x_2	48
33	Eternitkulvert. Regression med luftfuktighet i kammare som y , funktion av temperatur i kammare som x_1 och ventilation som x_2	49
34	Fördelningen av differensen mellan verkligt och skattat värde av luftfuktighet. Från regressionsmodellen med temperatur som förklarande variabel.	51
35	Kammare som är drabbad av inläckage både genom betäckning och kammarvägg.	52
36	Kammare 72004-00 som med undermålig ventilation inte blir av med fukt.	53
37	Trasigt innerlock till kammare	54
38	Data från alla kammare i serierna, från betongkulvert.	69
39	Data från alla kammare i serierna, från eternitkulvert.	70

Tabeller

1	Antal kammare som har studerats ingående.	27
2	Medelvärde av alla korrelationskoefficienter för grannkamrarnas luftfuktighet.	39
3	Korrelationskoefficienter mellan luftfuktighet i kammare och temperatur utomhus.	43
4	Korrelationskoefficienter mellan luftfuktighet i kammare och temperatur utomhus, för kammare med förutsättning till korsdrag.	46
5	Felsökning av regression. p.e. står för procentenhet.	51

Terminologi

Medierör är de rör som fjärrvärmevattnet transporteras i.

Isolering är det lager av material som ligger om medierören och skyddar mot värmeförluster.

Kulvert är i det här sammanhanget en struktur förlagd i marken som skapar ett hålrum vari medierören ligger. Arbetet behandlar två typer av kulvertar, betongkulvert och eternitkulvert (även kallat asbestcementkulvert).

Kammare är rum som ligger i anslutning till kulverten. I kammaren finns bland annat ventiler, fixar och styrningar för medierören. Kammare kan både vara nedstigningsbara eller inte. Strukturen är tillverkad i betong.

Skarv är det område där två separata kulvertdelar eller kulvert och kammare möts.

Betäckning, även kallat däxel, är det metallock som ligger i marknivå och skyddar kammaren.

Innerlock är det lock som finns under betäckningen och förhindrar vatten att tränga sig in i kammaren och kulverten. Innerlocket är tillverkat i plast.

Stöd är den konstruktion som medieröret vilar på i en eternitkulvert.

Inledning

1.1 Introduktion

I Sverige är fjärrvärme en välutvecklad teknik som har byggts ut sedan mitten av 1900-talet. Idag står den för ungefär hälften av all uppvärmning i landet vilket uppgår till drygt 54 TWh producerad värme årligen. Fjärrvärmens i Sverige har gjort en stor omställning i produktionsmixen, där endast en liten del fossila bränslen finns kvar. År 2020 bestod energitillförseln av 97.7 % av återvunnen och förnybar energi, varav de största posterna utgjordes av avfall, rökgaskondensering och biobränslen [1]. Målet är att alla fossila bränslen ska vara utfasade ur bränslemixen till år 2030 [2]. För att fjärrvärmens ska kunna fortsätta bidra till en miljövänlig och energieffektiv framtid och samtidigt vara lönsam och konkurrenskraftig krävs det att branschen utnyttjar den teknologi som idag finns tillgänglig idag. Näten i Sverige hade 2015 en sammanlagd längd på omkring 25 000 kilometer, räknad som dubbelrör (fram- och returledning räknad som en längd), och har ett uppskattat nyanskaffningsvärde av 150 miljarder kronor, vilket innebär att fjärrvärmeföretagen besitter ett stort anläggningskapital, som till stor del är nedgrävt i marken [3][4].

Fjärrvärmenäten i Sverige består främst av den andra och tredje generationens distributionsteknik. Den andra generationen började utvecklas under 1930-talet och utnyttjar trycksatt vatten med temperaturer oftast över 100° C. Medierören är vanligtvis förlagda i kulvertsystem. Ungefär 9 % av Sveriges nät består av kulvertförlagda ledningar (4 % betong och 5 % eternit). Den tredje generationens distributionsteknik introducerades under 1970-talet och innefattar användning av förisolerade medierör som tillverkas i fabrik snarare än på plats, som var vanligt för den andra generationen [5][6]. De förisolerade rören är vanligtvis utrustade med larmtrådar integrerade i isoleringen, som larmar vid fuktintrång [4]. Kulvertsystem byggdes dock ut innan tekniken med larmtrådar användes i fjärrvärmesammanhang.

Eftersom kulverten är nedgrävd i marken medför det svårigheter att okulärt besiktiga den mer än i kammare och de närmast anslutande kulvertdelarna. Oftast är det inte heller värt att gräva upp och inspektera kulverten eftersom arbets- och maskinkostnaderna är höga, framförallt för betongkulvert. Det har lett till att skador har kunnat ske i de äldre delarna av fjärrvärmenätet utan att man har kunnat förutse det [7]. År 2005 skedde en läcka i betongkulverten i Helsingborg till följd av droppande vatten som orsakade korrosion på ett medierör, som sedan brast efter en tryckstöt. Det resulterade i att 15 000 kunder blev utan leverans och 1600 m³ förlorat vatten [8].

Oannonserade skador som den i Helsingborg kräver ofta stora arbetsinsatser och kostnader vilket man vill undvika i den mån som det är möjligt och rimligt. Samtidigt vill fjärrvärmebolag utnyttja sina befintliga ledningar så länge som de klarar av att sköta distributionen av fjärrvärmevatten på ett säkert och ekonomiskt sätt. För att lyckas med att förhindra skador och använda ledningar till sin fulla livslängd står fjärrvärmebolag inför en del utmaningar. Samtidigt finns det också möjligheter idag med ny teknik som inte fanns

på den tiden då kulverten började byggas ut.

På senare år har smarta lösningar börjat utnyttjas mer inom fjärrvärmebranschen. Ett exempel är arbetet *Automatic Identification of Poorly Performing Substations and Meter Devices – The Future of District Heating Analysis*, som utfördes 2016, som med hjälp av mätdata ämnade att identifiera kundinstallationer med undermålig värmeöverföring. Genom att utveckla ett program som automatiskt bearbetar datan kan dessa kundinstallationer snabbt hittas och nödvändigt arbete kan vidtas för att förbättra värmeöverföringen. I det större perspektivet skulle effektivare installationer leda till mindre bränsleförbrukning, mer lönsam värmeproduktion och därmed ett konkurrenskraftigare alternativ till andra uppvärmningsmetoder [9]. Projektet *Pipestatus* som genomfördes mellan 2016 och 2019 utvärderade sex olika mätmetoder, både i fält och i labb, för att bedöma status på medierör och dess isolering. Resultaten var goda och framförallt två metoder, en akustisk och en elektrokemisk, ansågs ha potential att introduceras på marknaden. Statusbedömning med dessa metoder innebär att varken grävarbeten eller driftstopp behöver ske [10]. Kan statusbedömning av medierör utföras framgångsrikt i praktiken innebär det att ledningar kan bytas ut i rätt tid och på rätt plats och oförutsedda skador kan reduceras, och fortsatt förbättra fjärrvärmebranschens konkurrenskraft.

Öresundskraft vill fortsätta på samma spår och dra nytta av tillgänglig teknik och mätdata för att få bättre uppfattning om statusen på sitt fjärrvärmenät. Därför har man investerat i ”Smarta Aktiva Boxar” (SAB, samma förkortning för singular och plural), vilka är mätboxar utvecklade av Arne Jensen AB. Boxarna är placerade i nedstigningsbara kammare runt om i fjärrvärmenätet, främst i anslutning till betong- och eternitkulvert. SAB mäter kontinuerligt en mängd olika parametrar i kammaren. Tanken är att mätvärdena som man får från boxarna bland annat ska bidra till statusbedömningen av fjärrvärmenätet. Framförallt är det vatten i kammare och kulvert som man vill undvika eftersom det leder till ökad risk för korrosion av medierör samt annan metallisk utrustning. Både flytande vatten samt för hög luftfuktighet är nödvändigt att undvika för att minimera risken.

I nuläget har Öresundskraft lyckats implementera datainsamlingen i sitt program för datavisualisering, Microsoft Power BI (MS PBI). Programmet visar momentanvärden, min- och maxvärden, tidsserier, med mera. Dock har inte Öresundskraft i dagsläget ett systematiskt arbetssätt att använda datan på och man vet inte hur de olika mätvärdena ska användas tillsammans för att bidra till en bättre statusbedömning.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka hur mätdata om luftfuktigheten i kammare kan användas i analyser som bidrar till bättre statusbedömning av fjärrvärmeledningar i betong- och eternitkulvert, med avseende på korrosionsskador. Tanken är att resultaten ska skapa en grund till ett beslutsstödssystem. Som Öresundskraft benämner det så vill man gå ”från att gissa till att veta”. Mer specifikt kommer arbetet att ägnas åt att ta reda på hur luftfuktighet i kammare och kulvert påverkas av andra mätbara faktorer och nätets uppbyggnad. Arbetet behandlar data från fjärrvärmenätet, historisk väderdata och platsspecifika förhållanden.

Med platsspecifika förhållanden åsyftas till exempel typ av kulvert, typ av rörstöd och tillgång till ventilationstorn.

1.2.1 Frågeställningar

Hur och varför skiljer sig kulverttyperna åt med avseende på luftfuktighetens förändring över tid?

För att besvara frågan kommer data från MS PBI importerats till Microsoft Excel för att studera tidsserier för luftfuktigheten i de olika kulvertarna. Skillnaderna kommer att förklaras med konstruktionen av kulvertarna, som skapar olika förutsättningar för luftfuktighet.

Hur påverkas luftfuktigheten av temperatur i kammare och utomhus och av nederbörd?

Motsvarande data i tid från MS PBI för luftfuktighet och temperatur i kammare, samt från SMHI för temperatur och regnmängd, importerats till Microsoft Excel. Luftfuktighetens påverkan av temperatur jämförs med det teoretiska sambandet för att utvärdera om det verkar rimligt. Korrelation mellan luftfuktighet och temperatur utomhus respektive nederbörd beräknas, samt diagram studeras visuellt, för att identifiera påverkan av de båda faktorerna.

Hur ska ett verktyg tas fram för att identifiera kulvertar som kan ha eller få problem med korrosion och vad är det som tillåter problemet att uppstå?

Baserat på resultaten från de två första frågeställningarna kommer en regressionsanalys skapas för att förklara luftfuktigheten med temperaturen. Modellen skapas med data från kammare som (baserat på datan) har förhållanden som inte leder till korrosionsangrepp. På så sätt kan referensvärden för alla kammare beräknas som kan jämföras med de verkliga värdena. Stor skillnad mellan värdena kan indikera att luftfuktigheten är på en nivå inom riskzonen för korrosion. Vad som leder till stor skillnad mellan värdena kan utvärderas med hjälp av hur luftfuktigheten förhåller sig till just temperatur utomhus och regnmängd.

1.3 Avgränsningar

Eftersom SAB är placerade i kammare i anslutning till betong- och eternitkulvert är det endast denna typen av förläggningssätt som det är möjligt att dra slutsatser om och som därmed kommer att studeras.

Arbetet begränsar sig till att finna en metodik för statusbedömning med avseende på förhållanden som kan leda till korrosionsskador.

En begränsning i analysen är att endast data från hösten 2021 till mitten av våren 2022 har använts. Detta beror på att endast data från innevarande månad och de tre föregående

månaderna visas i MS PBI. Analysen började i februari, varför data kunde importerades från tidigast november 2021, och avslutades i april.

1.4 Rapportens disposition

Kapitel 1 beskriver kort bakgrunden för att ge läsaren tillräcklig förståelse för arbetets syfte och frågeställningar. Här redogörs även för arbetets avgränsningar.

Kapitel 2 utvecklar bakgrunden från kapitel 1. Öresundskrafts projektdeltaganden som är relevanta för det här arbetet nämns och skaderisker samt underhåll av fjärrvärmenät beskrivs närmare.

Kapitel 3 beskriver den nödvändiga teorin från litteraturen som läsaren bör känna till för att kunna förstå resultaten och diskussionen. Teorin flyter sömlöst över från bakgrunden för att mot slutet beskriva statistiska koncept som används i kapitel 5.

Kapitel 4 beskriver vilken data och övrig information som har använts samt tillvägagångssättet för att analysera datan. Metoden förklaras även tydligare med flödesscheman.

Kapitel 5 presenterar det urval av resultatet som anses vara mest givande. Många beräkningar och diagram har skapats i analysarbetet och allt kan inte visas i resultatet.

Kapitel 6 dissekerar resultaten med avseende på beräkningarnas trovärdighet i förhållande till vad som sker i verkligheten, antaganden och förenklingar som har gjorts och intressanta observationer. Diskussionen ger också förslag på användningsområden och framtida studier.

Kapitel 7 sammanfattar det viktigaste som arbetet har lett fram till och besvarar frågeställningarna och kommenterar syftet.

Bakgrund

2.1 Öresundskraft

Öresundskraft är ett av de tio största energi- och kommunikationbolagen i Sverige. Bolaget är verksamt i nordvästra Skåne med säte och störst aktivitet i Helsingborg. I Helsingborg återfinns den största delen av Öresundskrafts fjärrvärmenät, med den återstående delen i Ängelholm [11]. Utbyggandet av fjärrvärmenätet började på 1960-talet och består idag av ett 72 mil långt nät som utgörs av andra och tredje generationens distributionsteknik [3][12].

Öresundskraft deltar i två projekt med inriktning på fjärrvärmenätet, som kort presenteras nedan. Anledningen till att de nämns är att sätta det här arbetet i ett större sammanhang och visa att det arbetas aktivt mot bättre statusbedömning av nätet. Det som arbetet syftar till att undersöka är nära kopplat till båda projekten och resultaten eller delar av dem kan säkerligen vara till hjälp för att uppnå respektive projekts mål.

2.2 Baltic Smart Asset Management

Baltic Smart Asset Management eller BSAM är ett projekt med deltagare från fjärrvärmebolag, universitet och branschorganisationer från länder kring Östersjön. EU satte generella mål till år 2020 på ökad energieffektivitet med 20 % och minskade växthusgasutsläpp med 20 % [13]. Dessa krav tillsammans med fjärrvärmens höga kapitalkostnader, stora värmeförluster och förnyelsebehov är utmaningar som fjärrvärmebranschen står inför och som är tanken att projektet ska ta sig an. Syftet med projektet är att ta fram metoder, transnationellt samarbete och ny kunskap inom området för smart kapitalförvaltning. De specifika målen är att [14]:

- Identifiera barriärer och framgångsfaktorer för utveckling och implementering av smart tillgångsförvaltning – digitalisering av fjärrvärmenät.
- Utveckla nationellt vedertagna metoder för statusbedömning av fjärrvärmenät.
- Fullt ut utnyttja modern informations- och kommunikationsteknik för datadrivet förutsägbart underhåll av fjärrvärmenät.

Öresundskrafts implementering av SAB i fjärrvärmenätet ingår också som ett pilotprojekt inom BSAM. Syftet med pilotprojektet är att förbättra fjärrvärmens leveranssäkerhet och konkurrenskraft genom att studera kontinuerlig data om fjärrvärmenätets status. Vidare, utvärderas också möjligheten till att använda datan för bedömning av reinvestering av ledningar på rätt plats i rätt tid [14]. Pilotprojektet bemöter alltså det första och tredje målet i BSAM.

2.3 PreDHiCt

PreDHiCt är ett projektsamarbete mellan flera fjärrvärmebolag i Sverige, bland annat Öresundskraft, och samordnat av Energiforsk. Målet med projektet är att använda data och erfarenheter från de inblandade företagen gällande riskfaktorer i fjärrvärmenätet för att skapa en modell för prediktivt underhåll. En av parametrarna man vill använda sig av är stålets tjocklek i medierören, som Öresundskraft i störst utsträckning bidrar med data till. Det är av intresse att känna till tjockleken eftersom det kan påvisa korrosionsangrepp. Under ett möte med representanter från de inblandade parterna nämndes det att tjockleksmätningar är intressanta att studera men att det ska vara möjligt att förhålla datan till mätningar av andra parametrar. Det ska alltså vara möjligt att härleda degradering av tjockleken på rören till andra mätbara faktorer för att förstå vilka förhållanden som leder till problemet. På så sätt kan man ligga steget före och övervaka de parametrar som föranleder korrosionsangrepp på stålet i medierören innan det sker.

2.4 Skaderisker i fjärrvärmenätet

Byggtekniken med kulvertar används inte längre vid förläggning av fjärrvärmeledningar, därför ligger intresset hos fjärrvärmebolaget i att förvalta den redan installerade kulverten snarare än att hitta nya och bättre sätt att bygga dem med. Öresundskraft har inte haft särskilt omfattande skador på betongkulverten. Fram till 2012 hade endast tre skador på kulverten upptäckts. Man vittnar dock om att lockskarvarna är det största problemområdet, där det påliggande tätskiktet kan ha åldrats och vittrat bort. Skador på medierören är oftast en sekundär skada och en konsekvens av en tidigare skada på kulverten, kammare eller andra komponenter i systemet. [7]

E.ON:s fjärrvärmenät i Malmö har haft problem med grävskador som har repat tätskiktet på ovansidan av kulverten och som inte har rapporterats in. På så sätt har fukt lyckats tränga sig in i kulverten och föranlett korrosionsskador på medierör och stålkomponenter. Även Öresundskraft har varit med om en liknande skada då en vägslykt borrades fast i eternitkulverten som befann sig där under, varpå vatten läckte in. [7]

Dränering kring kulverten är en viktig funktion som ser till att vatten leds bort från kulverten och minimerar därmed risken att vatten letar sig in i skarvar och potentiella sprickor i strukturen. Det uppges dock inte finnas särskilt god vetskap inom Öresundskraft hur det står till med dräneringen i fjärrvärmenätet. Kulvertens status kan variera mycket och livslängden bestäms till stor del vid byggtillfället, men också av marken den ligger i. Dåligt byggd kulvert kan klara sig bra i torr och skyddad mark medan bra kulvert kan degraderas snabbt i blöta markförhållanden. [7]

Förutom att vatten kan infiltrera kulverten genom skador i strukturen eller skarvar är det även vanligt att vatten tar sig in genom betäckningen. Särskilt kritiskt är det om betäckningen befinner sig precis ovanför en ledning, och därmed riskerar droppande vatten på den [7]. Vanligtvis uppstår läckor på undersidan av medieröret. Anledningen är att vatten som har tagit sig in i kulverten gör att isoleringen blir blöt. Isoleringen på ovansidan torkar oftast eftersom värmen stiger uppåt men undersidan förblir blöt, och den blötvarma

isoleringen leder snabbt till korrosion av röret [4]. God ventilation i kulverten är en viktig förutsättning för att bibehålla bra förhållanden för kulverten och medierören däri. I rapporten *Statusbedömning av Betongkulvert* noteras det att bristfällig ventilation är en av primärsakerna till kulvertskador. För att motverka korrosion av medierören då vatten har trängt sig in i kulverten är det nödvändigt att tillgång till ventilation finns för att påskynda torkningsprocessen av den blöta isoleringen runt rören [7]. Även för att motverka hög luftfuktighet i systemet krävs det att ventilationen är god. Figur 1 visar hur isoleringen har fallit av en fjärrvärmeledning och sköljts bort. Det kan vara resultatet av en läcka från medieröret med tanke på det pyraninfärgade (gröna) vattnet i kulverten. Pyranin är ett färgämne som används för att färgsätta fjärrvärmevatten för att skilja det åt från annat vatten [4].



Figur 1: Dränkt eternitkulvert där mycket av isoleringen har sköljts bort.

Källa: [15]

2.5 Underhåll av fjärrvärmenätet

Aktivt underhåll av fjärrvärmenätet är viktigt att upprätthålla för att säkra distributionsnätets funktion. Fyra argument för underhåll av nätet är arbetsmiljö, miljö, leveranssäkerhet och ekonomi. Att minimera risker för anställdas och civilas säkerhet, miljökonsekvenser vid till exempel läckage av fjärrvärmevatten, brist i leverans av värme och ekonomiska förluster till följd av fel i nätet är alla kopplade till underhåll av fjärrvärmenätet. [4]

Underhåll delas in i förebyggande och avhjälpande underhåll och förnyelse. Förebyggande underhåll sker med förutbestämda intervall med avsikt att reducera risken för att fel eller

degradering av komponenter uppstår. Avhjälpande underhåll sker istället då skador redan har uppstått för att återställa en komponent till det tillstånd som krävs för att den ska kunna utföra sin funktion [4]. I en intervjustudie med Öresundskraft, E.ON, Krafringen och Göteborg Energi, inom forskningsprogrammet Fjärrsyn, medgav representanterna att en avhjälpande underhållsstrategi har antagits gällande deras kulvert. Man anser att kontroll av statusen genom att gräva upp kulverten är för dyrt och man vill inte riskera att orsaka skador vid uppgrävningen. Utrymmet inuti kulverten är anpassad efter storleken på medierören, vilket försvårar framkomlighet och insyn däri. Det finns därför en oro hos de intervjuade fjärrvärmebolagen att statusen på de delar av kulverten som inte går att inspektera ska vara dålig. Om man skulle kunna inspektera eller på andra sätt kontrollera miljön i kulverten skulle osäkerheten kring statusen minska och oförutsedda fel kunna förhindras i tid [7].

I en workshop som hölls 2014 med åtta fjärrvärmebolag diskuterades det hur bolagen arbetar med risk- och sårbarhetsanalyser gällande fjärrvärmeledning. Det poängterades att något som inte hanns med under workshopen var att diskutera användning av mätdata från fjärrvärmenätet och hur de ska användas i ett riskklassningssystem [16]. Det är precis det här som Öresundskraft hoppas kunna ta reda på i och med introduktionen av Smarta Aktiva Boxar i nätet, som kontinuerligt skickar data för en mängd olika mätvärden.

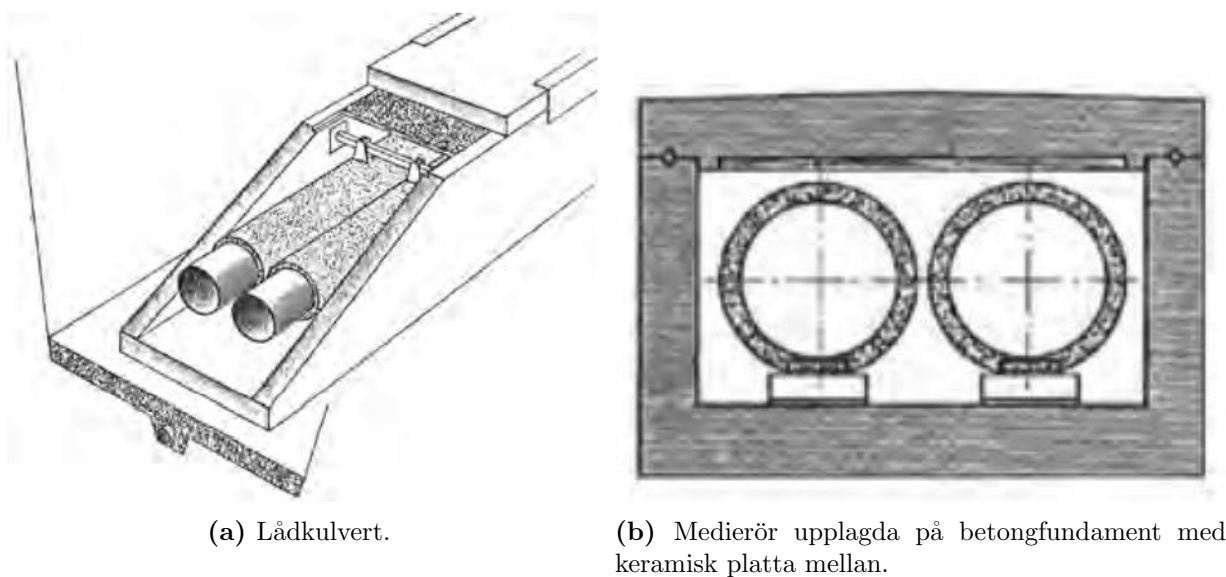
Teori

3.1 Kulvertsystem

3.1.1 Betong

Det äldsta förläggningssättet av fjärrvärmeledningar som användes i Sverige är medierör av stål inuti en kulvert av betong. Metoden användes av Öresundskraft under 1960- och 70-talet. Syftet med att lägga medierören i en kulvert var att skapa ett utrymme som efterliknade en inomhusmiljö och därmed skydda mot korrosionsangrepp. Dock har en torr miljö inuti kulverten inte alltid lyckats upprätthållas. Vatten och fukt har med tiden tagit sig in genom lock, skarvar och skador i betongen. Vid utbyggnaden av betongkulvert fanns det inga standardiserade sätt att konstruera dem på, utan olika sätt har använts i olika fjärrvärmenät. Man kan dock kategorisera betongkulvert i två huvudgrupper: lådkulvert, där bottendelen är en U-formad låda, och plattkulvert, där bottendelen är en betongplatta. Olika typer av isolering har även använts vid utförande av betongkulvertledning. Två isoleringsmaterial som har använts flitigt är mineralull och cellbetong. Eftersom betongkulverten var ett av de första förläggningssätten som användes så är många huvudledningar och utmatningspunkter från fjärrvärmeverken konstruerade på detta sättet. Det innebär därmed att ledningsdimensionerna oftast är av den större typen. [17]

Den del av Öresundskrafts nät som utgörs av betongkulvert är konstruerad som U-kulvert med medierör i stål isolerade med glasull, som är en typ av mineralull. Rören ligger på ett betongfundament varpå en keramisk platta sitter med asfaltspapper mellan rör och platta. Värmeexpansionen i rören som fjärrvärmevattnet ger upphov till medför att rören rör på sig och då sker glidning mellan papperet och plattan istället, och därmed undviks slitage på medierören. På skarvarna mellan kulvertsegmenten ligger en asfaltslinda för att förhindra fukt från att tränga sig in. Kulverten skapar ett hålrum runt omkring medierören vilket tillåter luft att flöda genom den från kammare till kammare. Detta innebär i förlängningen att kamrarna i anslutning till varandra genom kulverten borde ha relativt lika förhållanden [4][18]. Öresundskrafts fjärrvärmenät består av cirka 1.2 mil betongkulvert [19]. Figur 2 illustrerar hur betongkulverten ser ut som Öresundskraft använder sig av i sitt fjärrvärmenät.



Figur 2: Betongkulvert som används av Öresundskraft.

Källa: [4]

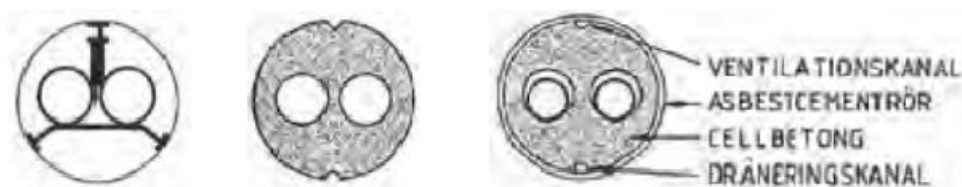
Den relativa luftfuktigheten i en kammare är beroende av lufttemperaturen i densamma, som i sin tur är kopplade till värmeförlusterna från medierören. Arbetet *Modell för reinvesteringssplanering* har beräknat de teoretiska värmeförlusterna uttryckt som U-värden (W/mK) för olika kulverttyper. Sett till alla dimensioner har medierör i betongkulvert störst värmeförluster, vilka ligger inom spannet $1.048 - 5.431 W/mK$ [19]. Förnyelse av nätet kan dock sällan motiveras av endast höga värmeförluster, utan är en kombination av flera argument som arbetsmiljö, leveranssäkerhet, underhållskostnader, minskade värmeförluster och goodwill [4].

Betong är ett poröst material som kan absorbera vatten och fukt i luften. Betongen samspelar med luftfuktigheten och kan absorbera fukt vid hög relativ luftfuktighet samt avge fukt vid låg relativ luftfuktighet. [20]

3.1.2 Eternit

Eternitkulvert är ett förläggningssätt som också började användas av Öresundskraft på 1960-talet. Precis som med betongkulvert fanns det inga standardiserade sätt att bygga den på [17]. Olika material för isolering av medierören används i eternitkulverten i Öresundskrafts nät men den vanligaste är dock glasull [3]. Eternitkulvert med tre olika stödtyper används i Öresundskrafts fjärrvärmesät: polyuretanstöd, cellbetongstöd och metallstöd, se Figur 3. Det finns även sträckor av kulvert som inte har stöd för medierören. I dessa fall ligger rören på botten av kulverten, vilket inte är bra om vatten tar sig in i systemet då isoleringen och rören riskerar att dränkas [18]. Eternitkulvert med polyuretanstöd och cellbetongstöd har den medförda nackdelen att luftflödet genom kulverten mer eller mindre stängs igen och att fukt som har tagit sig in i systemet därmed blir svår att transportera ut. I Figur 4 syns det att kulverten är i princip helt igenstängd på grund av polyuretanstöden [3]. Metallstöd bör

å andra sidan tillåta luft att passera genom kulverten. Öresundskrafts fjärrvärmenät består av cirka 8 mil eternitkulvert [19].



Figur 3: Stöd som används av Öresundskraft i deras eternitkulvert. Från vänster: metallstöd, polyuretanstöd och cellbetongstöd.

Källa: [4]



Figur 4: Eternitkulvert med polyuretanstöd.

Källa: [15]

De teoretiska värmeförlusterna är lägre i eternitkulverten och ligger inom spannet 0.368 – 1.442 W/mK [19]. Dock är de just teoretiskt beräknade, och baseras på ett antal antaganden, framförallt att isoleringen är intakt.

Eternit, eller asbestcement, består av cement och asbestfiber. Materialet kan absorbera vatten [21], vilket innebär att eternitkulvert, precis som betongkulvert, samspelar med luftfuktigheten, och absorberar eller avger fukt beroende på de rådande förhållandena. Exakt hur mycket fukt som kan absorberas av eterniten i Öresundskrafts kulvert är oklart och kan mycket möjligt skilja sig åt beroende på tillverkare.

3.2 Smart Aktiv Box

Öresundskraft har placerat ut cirka 550 Smarta Aktiva Boxar i nedstigningsbara kammare runt om i fjärrvärmenätet. Dessa kammare är främst i anslutning till betong- och eternitkulvert, men vissa finns även i kammare i anslutning till de nyare plastledningarna.

3.2.1 Mätvärden

SAB, som syns i Figur 5, är en mätbox uppkopplad mot mobilnätet som kan hantera tvåvägskommunikation [22]. Boxen är kopplad till sensorer och mikrofoner som mäter olika parametrar. Datan som SAB sedan registrerar skickas till Öresundskrafts datavisualiseringsprogram MS PBI. Dessa mätvärden är [23]:

- temperatur i fram- och returledning,
- temperatur i kammare,
- relativ luftfuktighet i kammare,
- ljudnivå i fram- och returledning (mikrofon för ljudupptagning),
- batterispänning,
- vattennivå i kammare,
- bottentemperatur i kammare,
- syrehalt i kammare,
- kolmonoxidhalt i kammare och
- hållfasthetstjocklek i fram- och returledning (ljudkälla plus mikrofon för ljudupptagning).

Sensorerna mäter med en tidsupplösning på sex minuter medan hållfasthetstjockleken mäts en gång i månaden. Eftersom boxarna har tvåvägskommunikation kan ljudfiler också spelas in på beställning. Temperaturgivare har en noggrannhet på $\pm 0.5^\circ \text{C}$ och fuktsensorer har en noggrannhet på $\pm 2 \%$ [24].

Hållfasthetstjocklek är ett mått på elasticitetsmodulen för stålet i medierören (förhållandet mellan mekanisk spänning och deformation), och har alltså inte att göra med den faktiska tjockleken som begreppet kanske antyder. Metoden som används för att mäta hållfasthetstjockleken kallas för Delta-t och är en akustiskt baserad metod för att upptäcka korrosion och slitage av rören. Det statistiska underlag som mätningarna resulterar i kan sedan ligga till grund för beslut om utbyte av rördelar [25].



Figur 5: Smart Aktiv Box.

Källa: [8]

3.2.2 Termoelektrisk generator

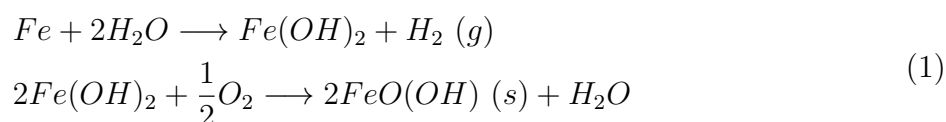
Energien som krävs för att sensorerna ska fungera och SAB ska kunna registrera och skicka värdena till en databas får de genom att utnyttja potentialen i temperaturskillnaden mellan framledning och luften. Med en termoelektrisk generator som är i kontakt med framledningen och luften är det möjligt att generera en spänning strax under fyra volt och mata ett batteri med ström. Så länge temperaturskillnaden är tillräcklig för att hålla spänningen uppe är systemet självförsörjande. Om spänningen är under 3.65 V går SAB i standby i en vecka. Målet är att inte behöva byta ut batterierna under livslängden för SAB. Det är uppkopplingen mot databasen som kräver mest energi och är den faktor som begränsar att systemet fungerar som det ska. I dagsläget skickas data till databasen fem gånger om dagen [18][26]. Figur 6 visar hur den termoelektriska generatoren ser ut.



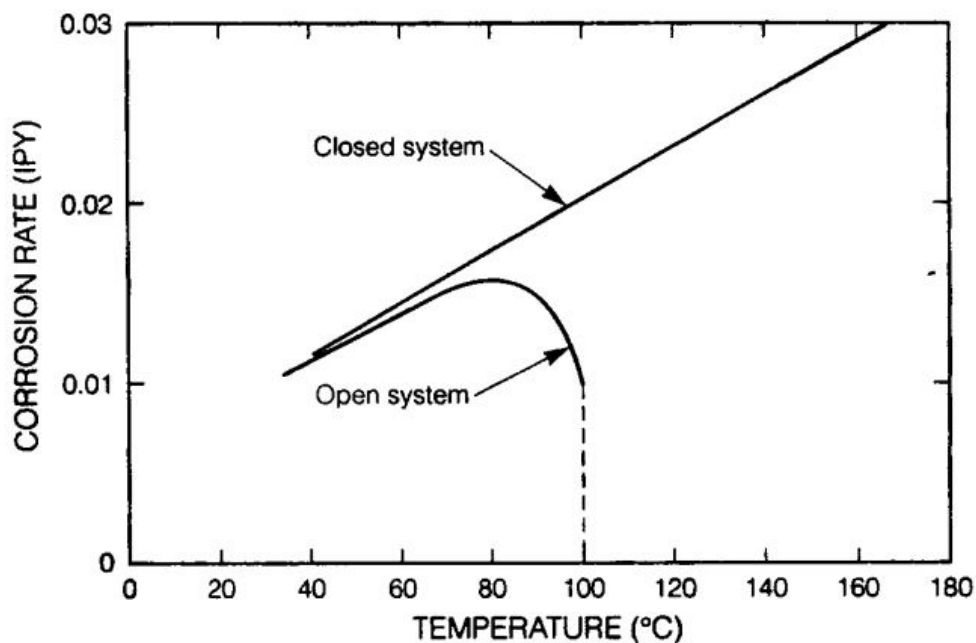
Figur 6: Termoelektrisk generator monterad på en framledning.

3.3 Korrosion

Korrosion är en kemisk process som allmänt kan syfta på upplösning eller nedbrytning av material till en mer stabil form. När korrosion nämns i det här arbetet är det med avseende på den elektrokemiska reaktion som sker när järn bryts ner i en omgivning med syre och vatten. Reaktionen sker i två steg som följande [27]:



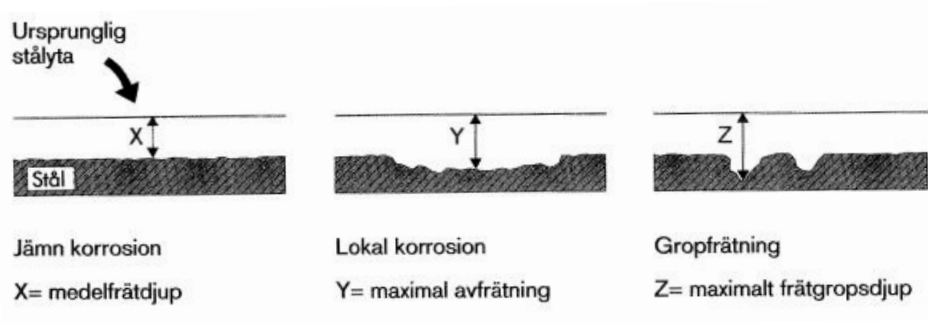
Reaktionshastigheten är starkt beroende av temperatur, luftfuktighet och förekommande av föroreningar som kloridjoner från vägsalt [27]. Vid luftfuktighet över 60 % ökar korrosionshastigheten kraftigt [28]. Som Figur 7 visar ökar korrosionshastigheten upp till 80° C för att sedan avta. Avtagandet beror på att syrelösligheten i vatten minskar vid ökande temperatur. Enheten "IPY" på y-axeln i Figur 7 är korrosionshastigheten och står för "inch per year", där 0.01 IPY motsvarar 0.25 mm per år. Ett slutet system är avgränsat från omgivningen och inget nytt vatten eller syre tillkommer [29]. Fjärrvärmenätet, oavsett typ av kulvert, klassas som ett öppet system eftersom det är öppet mot omgivning genom ventilationen samt även oönskade öppningar genom sprickor och skarvar. I Öresundskrafts fjärrvärmenät är det nästan uteslutande returledningarna som drabbas av korrosion. Anledningen är att framledningarna är tillräckligt varma för att avdunsta vatten utifrån och därmed hålls de torra. [18]



Figur 7: Korrosionshastighetens beroende på temperatur.

Källa: [29]

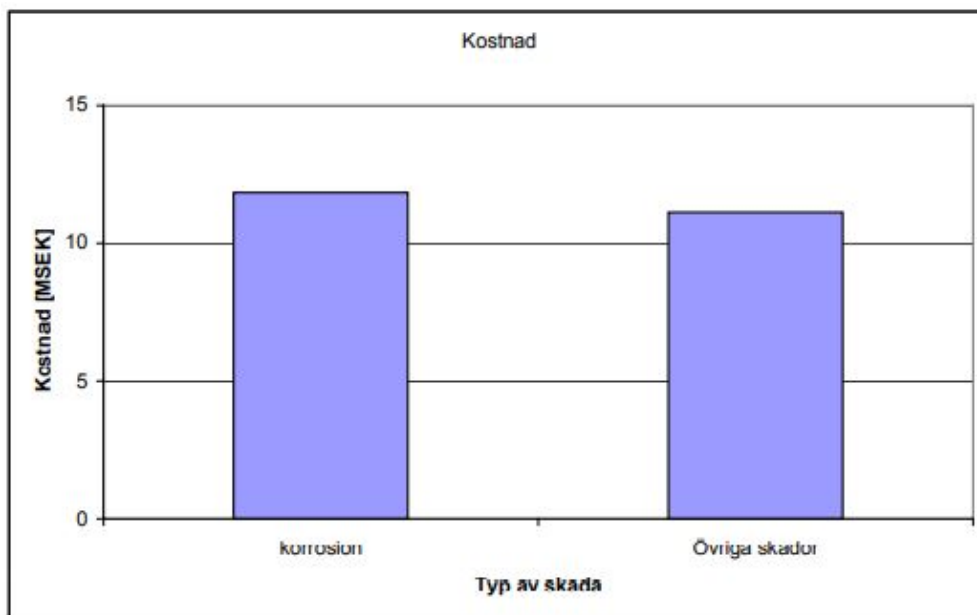
Vanligt förekommande fel i hålrörssystem som betong- och eternitkulvertar som leder till att avhjälpande underhåll måste utföras är läckor på grund av korrosion. Korrosion uppstår ofta till följd av att grund- och ytvatten rinner in i otäta kammare, mantelrörsskarvar och fogar [4]. Tungt trafikerade vägar resulterar i att marken under rör på sig, vilket i sin tur kan leda till att skarvar och fogar i kulverten spricker upp och släpper in vatten. Om ytvatten som även innehåller kloridjoner från vägsalt tränger sig in genom ytterhöljet till kulverten och droppar på ledningen riskerar den att utsättas för snabb korrosion. Grundvatten är inte lika korrosivt som förorenat ytvatten men utgör även det en risk. Vid stillastående grundvatten som har trängt sig in till en fjärrvärmeledning kan korrosionshastigheten uppgå till 0.4 mm/år och visar sig som jämnt utbredd korrosion, se Figur 8. Hastigheten kan bli betydligt högre än 0.4 mm/år vid droppande ytvatten på en ledning, vilket visar sig som lokal korrosion [29]. Om det har skett en skada på ytterhöljet av ledningen, till exempel vid hög belastning eller utmattning med tiden, där vatten riskerar att läcka in krävs det att skadan identifieras och avhjälpas vid ett tidigt stadium så att korrosionsprocessen inte hinner starta. Vanligtvis kan detta göras med att larmtrådar i isoleringen larmar för inläckage av vatten, men dessa finns som tidigare nämnts inte i betong- eller eternitkulvertar då den tekniken inte fanns tillgänglig på 60- och 70-talet när dessa förläggningssätt användes [4].



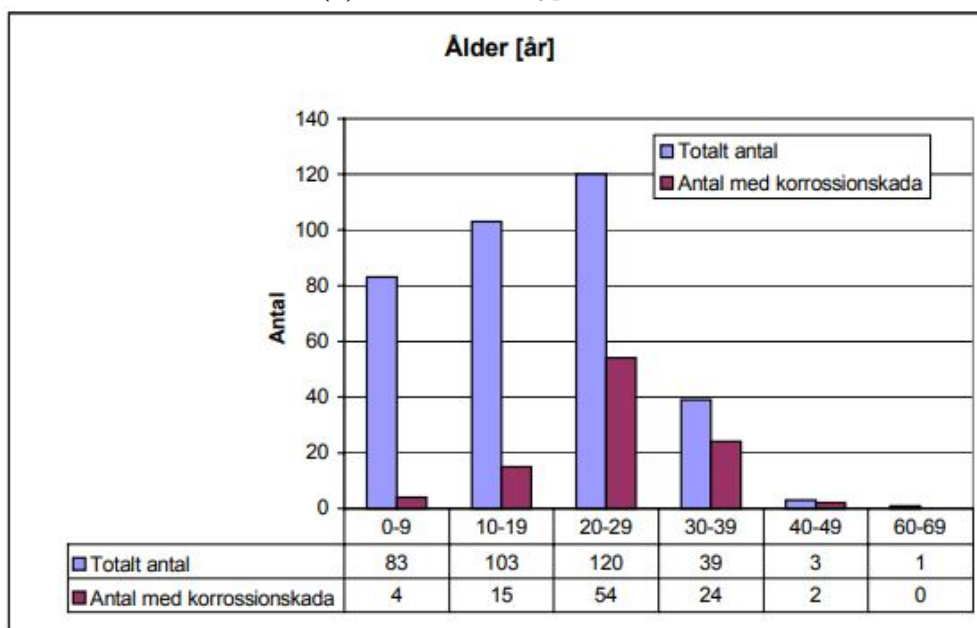
Figur 8: Olika typer av korrosion.

Källa: [29]

I rapporten *Utvändig Korrosion av Fjärrvärmerör* från 2002 presenteras statistik över skador orsakade av korrosion. Från ett urval av Fjärrvärmeföreningens nätstatistik konstaterades det att drygt hälften av kostnaderna av skadorna härleds till korrosionsskador. Sett till antalet skador är det dock övriga skador, andra typer som inte omfattas av korrosion, som utgör majoriteten, se Figur 9. Dock noteras det att andelen korrosionsskador ökar med ledningens ålder, framförallt för ledningar äldre än 20 år. [29].



(a) Kostnad mot typ av skada.

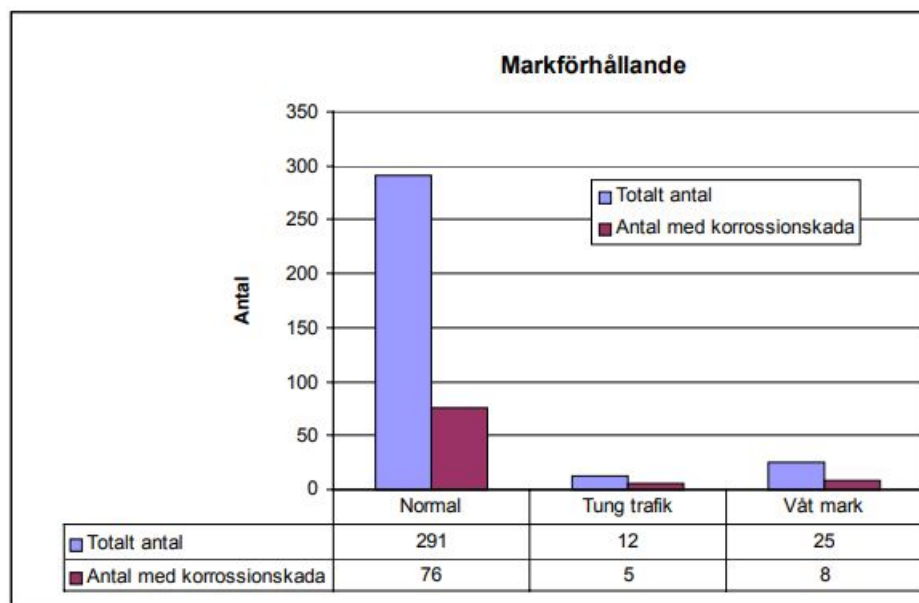


(b) Antal skador mot ålder.

Figur 9: Skadestatistik år 1999 för ett urval av fjärrvärmenät.

Källa: [29]

Som tidigare nämnts kan trafiklasten ha inverkan på korrosionsskador. Statistiken påvisar även detta då korrosionsskadorna är procentuellt flest där ledningar befinner sig i yttlig mark och vid tung trafik, se Figur 10.



Figur 10: Korrosionsskador i olika markförhållanden, år 1999.

Källa: [29]

3.4 Luftfuktighet

Relativ luftfuktighet beror på temperatur och absolut luftfuktighet och kan beräknas med följande formel [30]:

$$RF = \frac{AF(273.15 + T)}{13.25 \cdot 10^{\frac{7.59 \cdot T}{T+240.73}}}$$

(2)

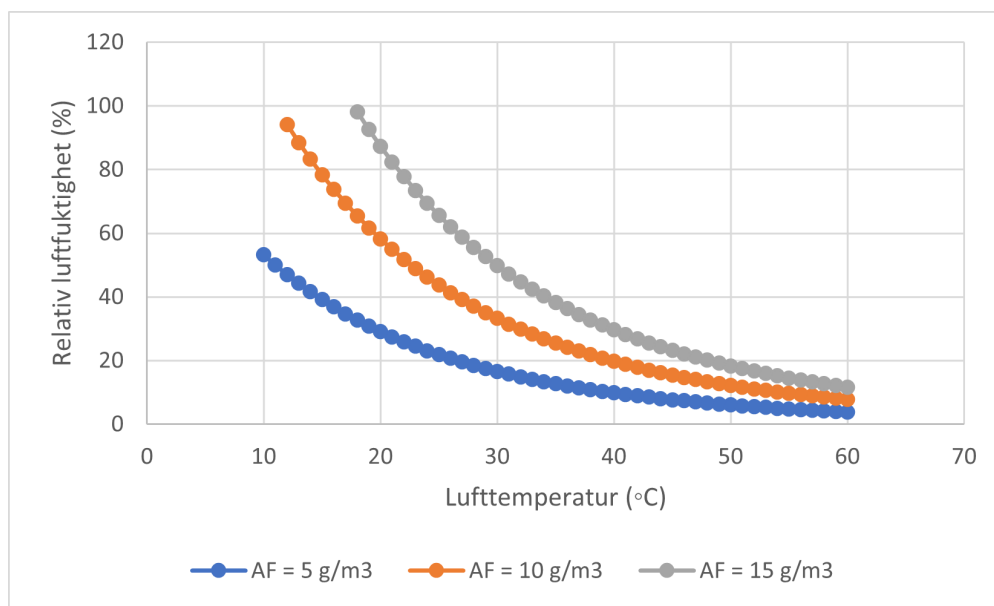
RF : relativ luftfuktighet

AF : absolut luftfuktighet

T : temperatur

Formeln är giltig för temperaturer mellan -20°C och 50°C , med ett maximalt fel på 0.083 %. Samma formel går att använda för högre temperaturer men med ett något större fel. [30]

Används Ekvation 2 för att plotta relativ luftfuktighet mot temperatur där absolut fuktighet hålls konstant erhålls följande diagram:



Figur 11: Relativ luftfuktighet som en funktion av temperatur för olika värden av absolut luftfuktighet.

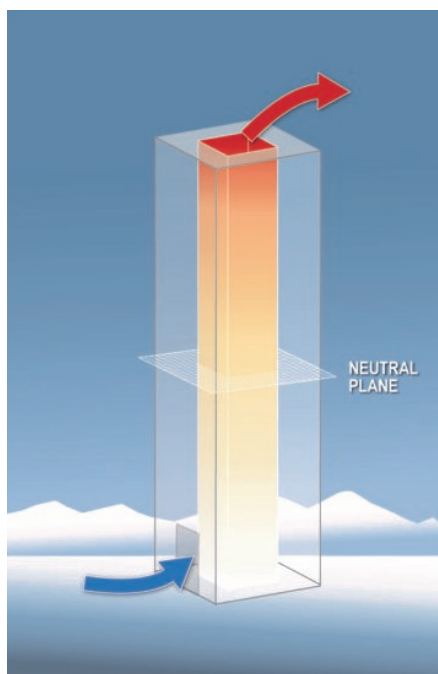
3.5 Ventilation

Som tidigare nämnts i avsnitt 3.3, ökar risken för korrosion drastiskt vid relativ luftfuktighet över 60 %. Det poängteras i *Underhållshandboken för Fjärrvärmedistribution* att det är viktigt att skapa ett luftflöde genom hela kulverten, speciellt vid hög- och lågpunkter [4]. Det är framförallt relevant för den kulverttyp som är öppen och tillåter ett genomströmmande luftflöde, alltså betongkulvert och eternitkulvert med metallstöd. För att skapa bra självdrag i de individuella kamrarna och anslutande kulvertdelarna bör två ventilationstorn vara installerade, varav ett rör går ner till botten av kammaren och ett som mynnar i övre delen av kammaren. Det finns olika typer av ventilationstorn. T-rör är en variant, och bör placeras i den vanligaste vindriktningen för att uppnå bäst ventilation [4].

I Öresundskrafts fjärrvärmenät har man problem med ventilationen i kulvertar under trafikerade gator eftersom ventilationstorn har placerats för långt bort och därmed skapat sämre självdrag. Det kan även förekomma att ventilationstorn blir igenstoppade med skräp eller vandaliseras, som E.ONs fjärrvärmenät i Malmö har vittnat om, vilket resulterar i försämrad funktion [7]. Det finns tre typer av ventilationstorn installerade i Öresundskrafts fjärrvärmenät: T-rör, svanhalsar och hattar. Ett fåtal ventilationstorn är även utrustade med fläktar för ökat luftflöde.

Skorstenseffekten är ett fenomen som bidrar till ventilationen i öppna kulversystem som har en viss lutning. Effekten uppstår till följd av att varm luft har lägre densitet än kall luft och därmed stiger uppåt och skapar ett luftflöde. Ju större höjdskillnad desto större blir skorstenseffekten [31]. Fenomenet illustreras i Figur 12. Om skorstenseffekten utnyttjas på rätt sätt kan det starkt bidra till ventilationen i kulverten. Betongkulvert och eternitkulvert med metallstöd är öppna och kan dra nytta av skorstenseffekten. Det förutsätter att

konstruktionen är intakt, till exempel att isoleringen inte har fallit av och täpper igen kulverten.



Figur 12: Skorstenseffektens princip.

Källa: [32]

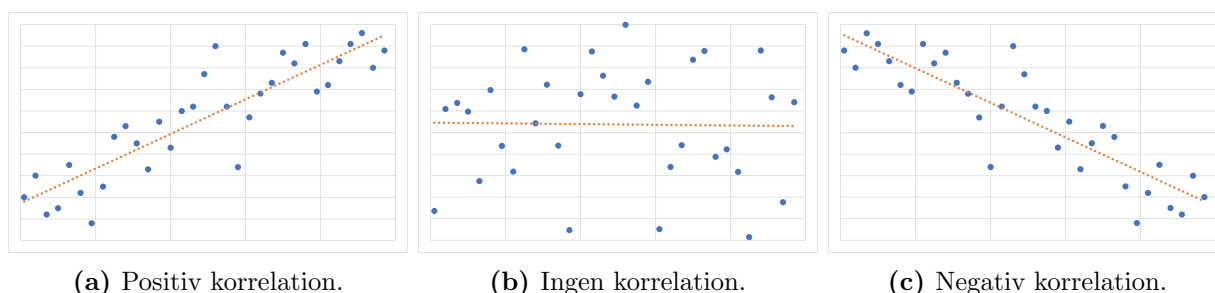
3.6 Statistisk sambandsanalys

Statistiska beräkningar används flitigt i analysen och därmed förklaras de två mest använda metoderna, korrelation och regression, närmare i den här delen av rapporten för att ge läsaren en tillräcklig förståelse av analysen. Korrelation kan användas för att beräkna förhållandet mellan variabler. Det är intressant i praktiska sammanhang som i det här arbetet då det går att snabbt undersöka om luftfuktigheten i fjärrvärmenätet påverkas av andra mätbara parametrar. Regression är nära kopplat till korrelation och används för att skapa en databaserad modell för hur en variabel beror på en eller flera andra variabler. I det här arbetet används regression för att skapa modeller för hur just luftfuktigheten varierar beroende på andra faktorer. Även begreppet konfidensintervall kommer att beskrivas men inte den bakomliggande matematiken.

3.6.1 Korrelation

Korrelation är ett statistiskt mått som beskriver till vilken utsträckning två variabler är linjärt relaterade till varandra. Det är ett kraftfullt verktyg för att beskriva hur väl variationen av de två variablerna förhåller sig till varandra. Korrelation mäts med korrelationskoefficienten, även kallad Pearsons korrelationskoefficient. Koefficienten är ett enhetslöst tal som kan anta värden mellan och inklusive -1 och +1, och betecknas med r . [33][34]

Om koefficienten antar ett positivt värde innebär det att korrelationen är positiv och indikerar att variablerna ökar och minskar tillsammans. Är koefficienten istället negativ är korrelationen negativ och indikerar att den ena variabeln ökar när den andra minskar och vice versa. Värden nära 0 indikerar ett svagt eller inget samband mellan datan [33]. Figur 13 illustrerar koncepten ovan med punktdiagram.



Figur 13: Punktdiagram som illustrerar förhållandet mellan två variabler.

För två variabler X och Y , som båda innehåller n stycken datapunkter, beräknas korrelationskoefficienten r på följande sätt [35]:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}$$

r : korrelationskoefficienten

x_i : värden av X

\bar{x} : medelvärdet av X

y_i : värden av Y

\bar{y} : medelvärdet av Y

$i = 1, \dots, n$

(3)

Korrelationskoefficienten uttalar sig dock inte om den ena variabeln orsakar variationen i den andra variabeln, utan endast om det finns en kovarians eller inte. Det kan finnas två variabler som uppvisar stor korrelation men där ingen av dem påverkar den andra. Istället kan det finnas en tredje variabel som styr variationen i de båda. Ett annat fall kan vara att det finns ett indirekt förhållande. Variabel A styr B, som styr C och i sin tur D. Statistiken visar att det finns ett förhållande mellan A och D men det går inte att veta utifrån beräkningarna att det finns mellanliggande variabler som gör att det finns ett förhållande [36]. Regressionanalys bygger på att det finns ett orsakssamband mellan de studerade variablerna. Innan en sådan analys genomförs bör man därför försäkra sig om att det finns ett orsakssamband, genom underbyggda resonemang. Det går även att använda sig av statistiska metoder som hypotestest för att undersöka sambandet men det används inte i arbetet och kommer därför inte att förklaras närmare.

3.6.2 Regression

Regressionsanalys används för att beskriva beteendet hos en variabel med en eller flera andra variabler. Variabeln som ska beskrivas kallas här för responsvariabeln och de andra kallas för förklarande variabler. Resultatet av en linjär regression är en funktion som skattar responsvariabeln med de förklarande variablerna på formen [37]:

$$y_i = \alpha + \beta_1 \cdot x_{1,i} + \beta_2 \cdot x_{2,i} + \dots + \beta_n \cdot x_{n,i} + \epsilon_i$$

y_i : responsvariabeln

x_i : förklarande variabler

α : intercept (4)

β : parametrar

ϵ_i : residual

n : antalet förklarande variabler

i : antal datapunkter i en mängd

Antalet datapunkter i en mängd, i , är mängden data som modellen appliceras på, inte nödvändigtvis mängden data som används för att beräkna modellen. Interceptet, α , är det värde som responsvariabeln antar när de förklarande variablerna är noll. Den har ingen konkret fysikalisk tolkning, utan är endast en del av den matematiska modellen. Konstanterna, β , är graden av förändring, i respektive dimension, av responsvariabeln. Residualen, ϵ , är skillnaden mellan det verkliga värdet av responsvariabeln och modellens skattade värde.

$$\epsilon_i = y_i - y_{skatt,i} \tag{5}$$

De verkliga värdena av interceptet och konstanterna är okända. Den data som finns tillgänglig används därmed för att skatta värden av dessa, vilka betecknas med $\hat{\alpha}$ respektive $\hat{\beta}$. [37]

Regressionen behöver inte nödvändigtvis vara på linjär form. Om till exempel responsvariabeln har ett exponentiellt förhållande till en förklarande variabel kan funktionen se ut på följande sätt:

$$y_i = \alpha \cdot e^{\beta \cdot x_i} + \epsilon_i \tag{6}$$

Två andra viktiga parametrar som beräknas vid en regression är R-kvadrat, R^2 , och standardfelet, S . Båda parametrarna är ett mått på hur väl modellen passar datan som har använts för att skapa den [38]. R^2 beräknas som kvadraten av regressionens

korrelationskoefficient och talar om hur väl regressionsmodellen skattar responsvariabeln, eller med andra ord, till vilken grad de förklarande variablerna kan beskriva variansen i responsvariabeln. R^2 kan anta värden mellan och inklusive 0 och 1. Om värdet är 1 innebär det att variansen hos responsvariabeln kan förklaras helt av de förklarande variablerna [39]. R^2 beräknas på följande sätt [40]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \epsilon_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

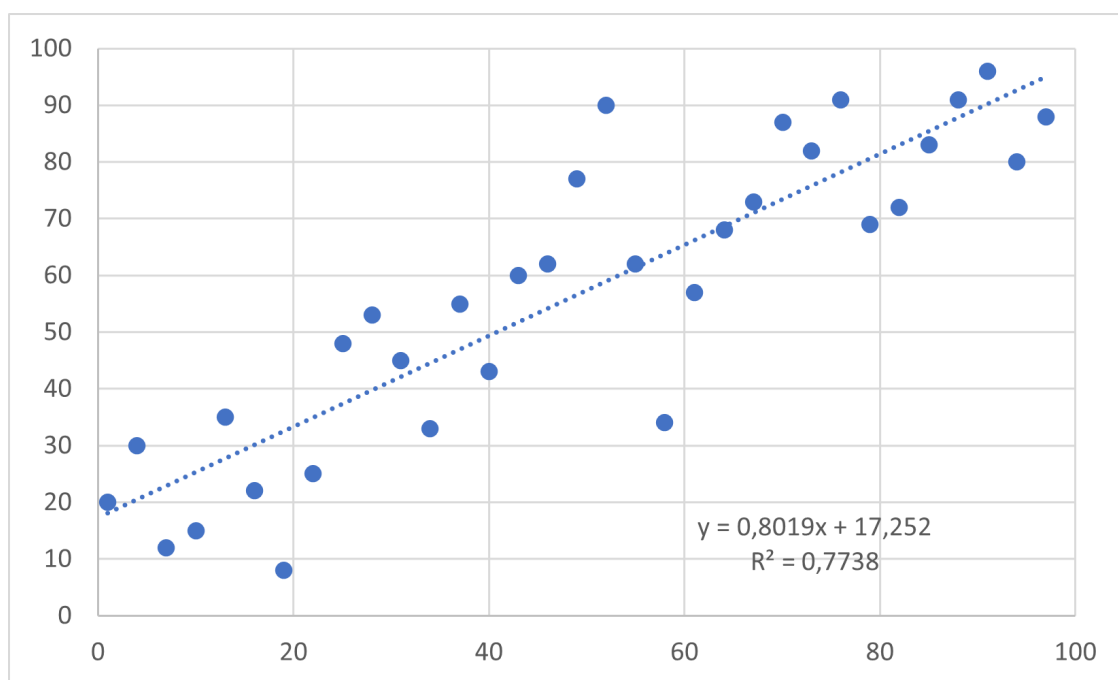
Till skillnad från R-kvadrat, som ger ett värde på hur precist modellen kan prediktera variationen hos responsvariabeln, så ger standardfelet ett medelvärde av differensen mellan de verkliga värdena och de skattade värdena och talar därmed om hur stort medelfelet är i responsvariabelns enhet [41]. S beräknas på följande sätt [37]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum \epsilon_i^2}{n - f - 1}} \quad (8)$$

n : antalet observationer

f : antalet förklarande variabler

För att förklara regression med ett exempel används Figur 13a igen men med värden på axlarna.



Figur 14: Punktdiagram med regressionslinje.

Låt oss säga att datapunkterna i Figur 14 är ett urval från en större population, då är $\hat{\alpha} = 17.252$, $\hat{\beta} = 0.8019$, $R^2 = 0.7738$ från Ekvation 7 och $S = 12.778$ från Ekvation 8.

Ytterligare en sak som är viktig att studera vid en regression är hur residualerna beter sig. För en bra modell ska residualerna vara normalfördelade kring 0 med standardavvikelsen S . Ett enkelt sätt att undersöka detta är att skapa ett punktdiagram med residualerna på y-axeln och värdena av den förklarande variabeln på x-axeln. Om mer än en förklarande variabel används får motsvarande antal punktdiagram eller ett flerdimensionellt diagram skapas. Vid de fall som residualerna inte är normalfördelade, utan uppvisar något mönster som till exempel ökande magnitud i x-led eller olinjärt beteende, bör modellen ses över [42]. För att en modell, skapad av ett urval data, ska anses vara representativ för en population av data är det angivet i en mängd litteratur att urvalet bör bestå av åtminstone 100 datapunkter [43]. En förutsättning för en bra regressionsmodell är att de förklarande variablerna inte är inbördes korrelerade med varandra. Korrelationskoefficienten ska gärna vara så nära noll som möjligt. Vid inbördes korrelation reduceras precisionen av de skattade parametrarna $\hat{\alpha}$ och $\hat{\beta}$ [44].

3.6.3 Konfidensintervall

Ett konfidensintervall anger det intervall av värden som en parameter kan anta med en viss säkerhet. Oftast använder man en säkerhetsnivå på 95 %. Det innebär att om man vill ta reda på ett värde av en parameter med en statistisk undersökning så kommer den sannolikt att befinna sig inom intervallet 95 % av antalet gånger man utför undersökningen [45]. För en regressionsanalys är det värdefullt att undersöka om konfidensintervallet för parametrarna $\hat{\alpha}$ och $\hat{\beta}$ inte täcker över noll. Om en parameter har ett skattat värde av 2, då kan ett möjligt konfidensintervall vara -1 till 5 (skattningen ligger alltid i mitten av intervallet). Det här intervallet täcker över noll och därmed finns det en sannolikhet att parameterns verkliga värde är just noll. Om det här till exempel skulle vara parametern β_1 i Ekvation 4, då kommer inte motsvarande förklarande variabel ha någon inverkan på responsvariabeln i det fall parametern är noll. [46]

Metod

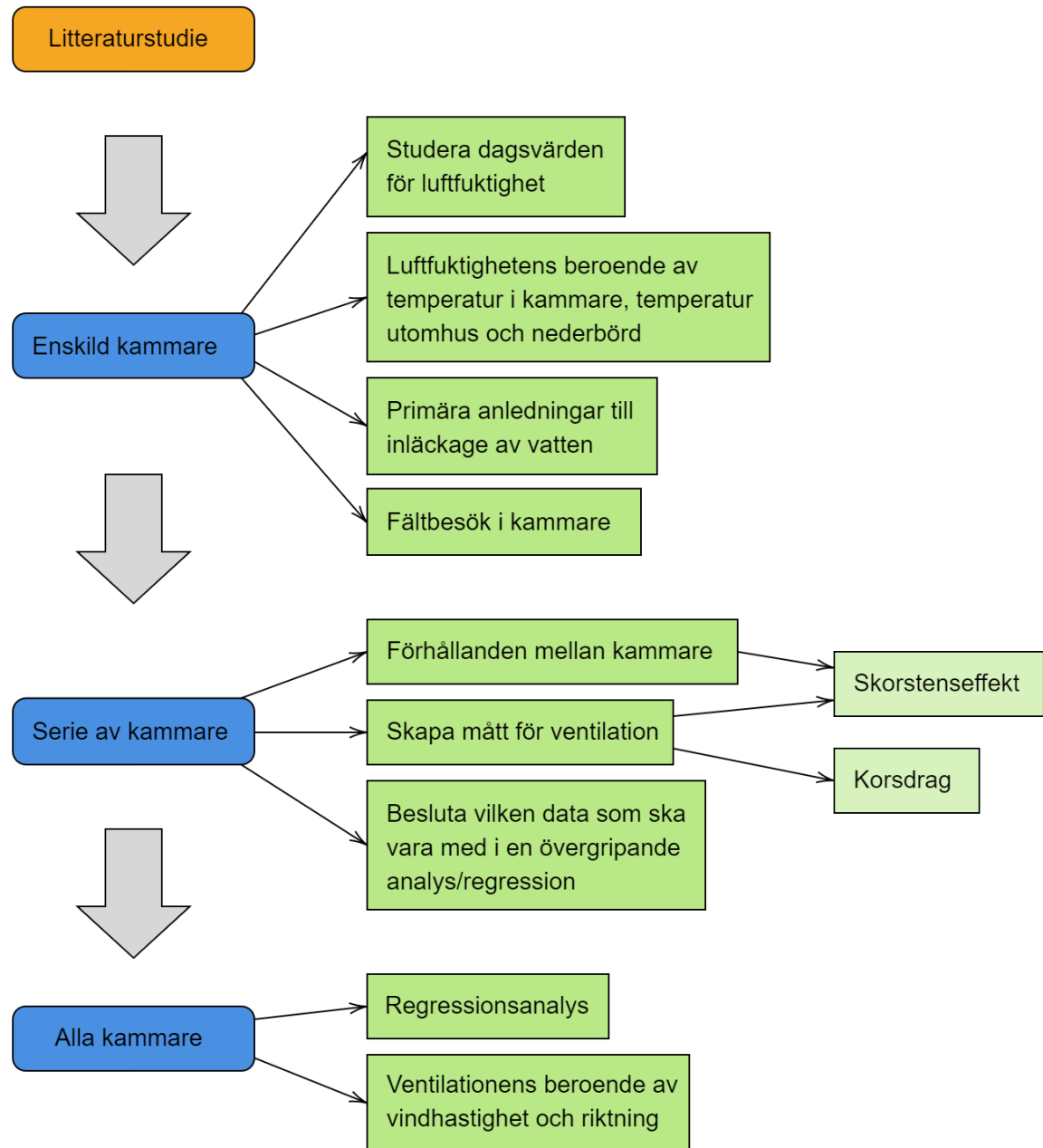
Metoden som har använts kan beskrivas som sökning och bearbetning av information från två olika källor inom Öresundskraft samt data från SMHI. Källorna inom Öresundskraft är:

- datavisualiseringsprogrammet, MS PBI, varifrån datan från SAB hämtas och
- nätverk- och informationssystem, Trimble NIS, där information om fjärrvärmenätets uppbyggnad kan hämtas

Litteratur studerades innan arbetets början men också löpande under arbetets gång för att tillgodose den teoretiska bakgrund som behövs för att förstå systemets uppbyggnad, för luftfuktigheten påverkande faktorer och de många begrepp som används inom fjärrvärmebranschen. Det viktigaste från litteraturen finns förklarat i bakgrunden och teorin och har verkat som en utgångspunkt för att forma metoden.

Tanken med analysen är att den ska kunna återupprepas av Öresundskrafts personal med framtida data. Därför är det viktigt att metoden som används är relativt enkel och inte kräver svåråtkomlig information eller programvaror som Öresundskraft inte har tillgång till.

Figur 15 visar metoden på ett övergripande sätt. Det bör noteras att analysen inte nödvändigtvis har utförts i kronologisk ordning så som de stora pilarna visar. Analysen har snarare varit parallell och iterativ.



Figur 15: Metodens flödesschema.

4.1 Analys av data från SAB

I det här avsnittet presenteras de metoder för hur bearbetningen av datan från SAB har analyserats för att extrahera de viktigaste sambanden och lärdomarna. Data har analyserats under en period från början av november 2021 till slutet av april 2022, där mätvärden finns tillgängliga för var sjätte minut. Luftfuktigheten i kamrarna är den centrala parametern som analysen kretsar kring. Trender och nivåer av luftfuktigheten är det som är av störst intresse i analysen. För att hitta påverkande faktorer till luftfuktigheten beslöts det att studera

temperaturer i kamrarna och ventilationen däri, men även förhållande till yttre faktorer så som temperatur utomhus, regn, vindhastighet och vindriktning. SAB mäter vattennivån i kamrarna vilket är en parameter som skulle vara värdefull att ha med i analysarbetet. Mätvärdena visade sig dock vara opålitliga eller helt felaktiga i vissa fall, varpå denna utslöts ur analysen för att inte ta fram missvisande resultat. Analysen kan delas in i tre fokusområden: enskild kammare, en serie av kammare sammankopplade med kulvert och alla kammare i hela systemet som har en installerad SAB.

Excel är den programvara som främst användes för att studera datan. Det är en smidig programvara då stora mängder data behöver bearbetas och enklare statistiska beräkningar behöver utföras. I senare delen av arbetet när regressionsanalyser användes för att sammanställa stora delar av datan användes MATLAB, då det tillgodoser fler verktyg och valmöjligheter än Excel när en sådan analys utförs.

4.1.1 Luftfuktighet i kammare och kulvert

Det första steget i analysen var att importera data för luftfuktighet från olika kammare. Datan hämtades från MS PBI och importerades till Microsoft Excel. Data från nio olika serier av kammare studerades mer ingående. Serierna är uppdelade i tre betongkulvertar och sex eternitkulvertar, i det här arbetet kallade för BTG1 – BTG3 och ETN1 – ETN6.

Antal kammare	
BTG	33
ETN metallstöd	19
ETN polyuretanstöd & cellbetongstöd	29

Tabell 1: Antal kammare som har studerats ingående.

Grafer över luftfuktighet som funktion av tid (datum) skapades i Excel, både för varje enskilda mätvärde men också för medelvärden av alla dygnsvärden. Grafer med luftfuktighetens medelvärde över ett dygn är mycket tydligare för att kunna urskilja trender, medan grafer innehållande alla mätvärden ger värdefull information om hur stor spridningen är mellan dagsvärdena och kan därmed användas för att ta reda på hur pålitlig medelvärdetrenden är eller om det möjligtvis är något fel på givaren.

För att ta reda på hur de yttre faktorerna utomhustemperatur och regn påverkar luftfuktigheten i kamrarna importerades dygnsvärden från SMHI från station *Helsingborg A* [47]. Det finns fyra stationer i Helsingborg, men de tre övriga stationerna har inte data från de tre senaste månaderna och kunde därför inte användas med den tillgängliga datan från SAB. Annars hade station *Helsingborg* troligtvis varit det bästa alternativet eftersom den ligger närmast fjärrvärmenätet. Trenderna för dessa yttre faktorer studerades både visuellt och deras korrelation med luftfuktigheten. Informationen som detta bidrog med talar om hur känsliga kamrarna och de anslutande kulvertsträckorna är för vatten som tar sig in i systemet vid regn samt hur luftutbytet mellan systemet och omgivningen är, vilket kommer förklaras mer om i avsnitt 4.1.3. Korrelationskoefficienten med nederbörd beräknades med

värden från samma dag men även med tidsförskjutning upp till sex dagar. Eftersom det kan finnas tröghet i hur snabbt luftfuktigheten i kammare påverkas av regn kan det ge värdefull information med tidsförskjuten korrelation om till exempel luftfuktigheten korrelerar som mest med nederbörden efter tre dagar medan den kanske är obetydlig samma dag.

Relativ luftfuktighet beror på den absoluta luftfuktigheten och lufttemperaturen. Därför importerades också data från MS PBI om temperaturerna i kamrarna. Precis som med luftfuktigheten så skapades dygnsmedelvärden för temperaturen. Det är en viktig parameter för att förstå luftfuktighetens nivå, snarare än trend (hur den ändras från dag till dag).

Eftersom data för relativ luftfuktighet och temperatur i kamrarna finns tillgänglig samt motsvarande data utomhus från SMHI beräknades den absoluta luftfuktigheten i kammare och utomhus. Det intressanta med dessa två värden är skillnaden mellan dessa. Som ett tankeexperiment, anta att en kammare är helt tät, inget vatten tränger sig in vare sig från kammare eller anslutande kulvert, och ventilationen är god, då borde fukten i kammaren endast komma från den fukt i luften som kommer in genom ventilationen. På så sätt är det möjligt att identifiera kammare som har problem med att vatten från till exempel nederbörd eller grundvatten tränger sig in i systemet om skillnaden i absolut fuktighet är på en förhöjd nivå. Det kan även indikera att ventilationen bör förbättras för att få ut fukt från systemet.

4.1.2 Luftfuktighetens temperaturberoende

Med Ekvation 2 beräknades den teoretiska relativa luftfuktigheten med olika värden för temperatur och absolut luftfuktighet. Resultatet plottades mot temperaturen för att bilda en uppfattning om hur grafen ser ut. För att skapa en funktion som endast beror på temperaturen med verklig data valdes ett urval av kammare vars periodmedelvärde av temperatur och luftfuktighet bildade en kurva som efterliknade den teoretiska grafen. Det eftersträvades att uppnå ett utseende som efterliknade en teoretisk graf med förhållandevis låg absolut luftfuktighet. Detta för att inte normalisera att det kan finnas vatten eller för hög fuktighet i kamrarna. Urvalet av kammare baserades därför på att använda data med liten skillnad i absolut luftfuktighet men samtidigt i balans med att använda mycket data. Tre funktioner skapades sedan: en som inkluderar data från båda kulverttyperna och en funktion var för sig. Med dessa datapunkter beräknades en funktion $RF = f(T)$.

4.1.3 Ventilation i kammare och kulvert

Genom att bara visuellt studera trenderna för luftfuktigheten kan man se om det finns likheter mellan kammare men för att få ett tydligare resultat har korrelationskoefficienten för luftfuktigheten beräknats, som beskrivet i avsnitt 3.6.1, mellan inbördes kammare i samma serie. Syftet med att ta reda på om det finns likheter eller skillnader mellan trenderna i luftfuktighet var främst att bekräfta eller dementera att kammare i betongkulvert och eternitkulvert med metallstöd har mer liknande trender än för de i eternitkulvert med polyuretanstöd eller cellbetongstöd på grund av att de tillåter ett genomströmmande luftflöde.

Ventilation är, som beskrivet i avsnitt 2.4 och 3.5, en viktig funktion i fjärrvärmenätet för att upprätthålla förhållanden som inte leder till korrosionsangrepp. Det är önskvärt att ta reda på hur mycket ventilationen påverkar luftfuktigheten i kammare och kulvert. I Öresundskrafts NIS-system går det att se vilken typ av ventilation som finns inbyggd i kamrarna men det säger inte särskilt mycket om hur väl den fungerar. Det finns inte heller data över ventilation uttryckt i luftflöde, därför har en stor del av analysen gått åt att skapa ett mått med de mätvärden som finns tillgängliga. Flera olika metoder har testats för att skapa ett mått på ventilationen, varav alla har sina för- och nackdelar. Det mått som ansågs ha mest potential att beskriva ventilationen, och som har använts vidare i analysen, är korrelationskoefficienten mellan luftfuktigheten i kammaren och temperaturen utomhus, alltså ett värde mellan och inklusive -1 och $+1$. Tanken bakom måttet, som snarare bör anses vara en indikation, kan förklaras med följande exempel.

Om temperaturen utomhus under en morgon ligger på 5°C och sedan stiger till 15°C till eftermiddagen kommer den absoluta luftfuktigheten att stiga i takt med temperaturen för att uppnå ett jämviktsläge. Genom ventilationen kommer därmed en kammare att få in luft med stadigt ökande absolut luftfuktighet. Temperaturen i kamrarna är generellt sett rätt konstant. Normalt är att den långsamt pendlar med $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ på månadsbasis. Därmed anses temperaturen vara konstant i det här avseendet för att göra det enkelt. Är lufttemperaturen i kammaren konstant beror den relativa luftfuktigheten endast på den ökande absoluta luftfuktigheten som kommer in genom ventilationen, och kommer därför att öka i takt med den. På samma sätt om temperaturen utomhus sjunker så kommer luftfuktigheten i kammaren att sjunka. Om korrelationen mellan utomhustemperaturen och luftfuktigheten i kammaren är stor innebär det att luften i kammaren påverkas mycket av luften utomhus och därmed att ventilationen kan anses vara god.

Vindförhållanden är tydligt säsongsberoende, både i hastighet och riktning. Därför har det kort undersökts hur dessa två parametrar påverkar ventilationsmättet. Vinddata från SMHI hämtades och sedan skapades en så kallad vindros för två olika perioder och jämfördes med ventilationsmättet under samma perioder.

4.2 Information från NIS

Öresundskrafts nätverk- och informationssystem bidrar med information om fjärrvärmenätets uppbyggnad och alla dess tillhörande komponenter. För att utvidga analysen om ventilationen har typ av ventilationstorn och antal torn för alla kammare som har en installerad SAB noterats. Därtill har även de kammare som har två torn placerade på så sätt som främjar korsdrag studerats närmare. Detta för att ta reda på om det går att urskilja bättre ventilation i dessa kammare. Denna typ av analys har endast gjorts för stängd eternitkulvert där ventilationen i kamrarna är avskilda från varandra.

För att kunna påvisa skorstenseffektens påverkan i öppen kulvert har data för kamrarnas höjd importerats från NIS och använts i samband med ventilationsmättet samt lufttemperaturen i kamrarna. Enligt teorin om skorstenseffekten bör temperaturen öka med höjden på kammare. Samtidigt bör korrelationen mellan utomhustemperaturen och luftfuktigheten minska längs luftflödet. Även om det teoretiskt sett borde vara möjligt för skorstenseffekten att verka

i eternitkulvert med metallstöd är det endast betongkulverten som har undersökts i det här avseendet. Detta eftersom kammare bredvid varandra i anslutning till betongkulvert uppvisade mer överensstämmande trendkurvor för luftfuktigheten.

4.3 Fältbesök

Två besök i utvalda kammare har gjordes i början av arbetet. Tanken med det första besöket var att skapa förståelse för hur en kammare ser ut inuti, hur kulverten är ansluten till den och hur givarna som är kopplade till SAB är placerade. Fokus för det andra besöket var att studera kammare som hade problem med hög luftfuktighet och ta reda på hur vatten utifrån kunde ta sig in.

4.4 Regressionsanalys och felsökning

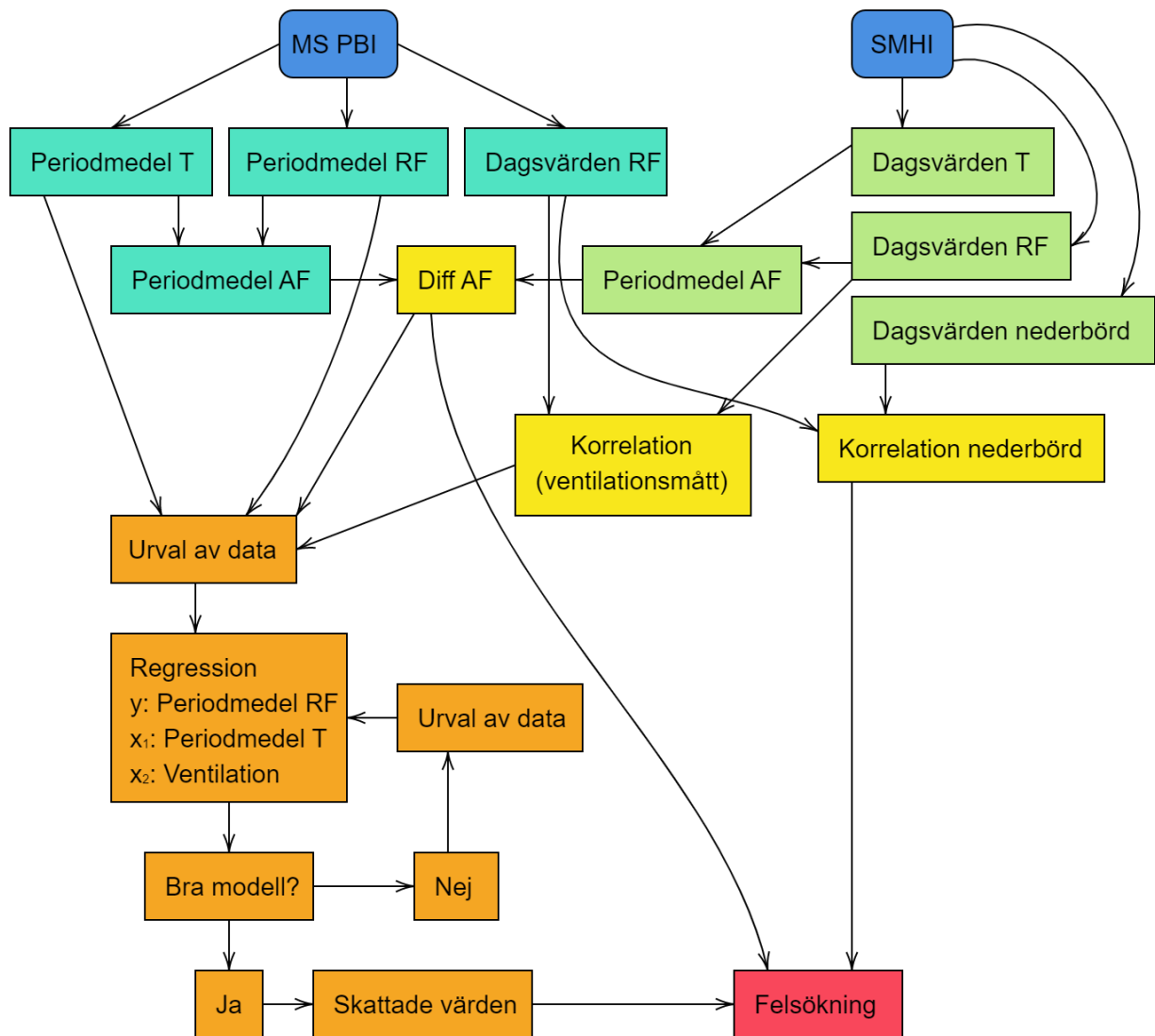
Två regressionsanalyser skapades med den relativa luftfuktigheten i kamrarna som responsvariabel i båda samt lufttemperatur respektive lufttemperatur och ventilation som förklarande variabler. I den tidigare användes data från både betong- och eternitkulvert och i den senare delades de upp i två regressioner för respektive kulvert. Tanken med regressionsanalysen var att skapa en modell som på ett bra sätt förklarar önskade förhållanden i kamrarna. Modellen beräknar ett referensvärde för luftfuktigheten som kan jämföras med det verkliga värdet i kamrarna. På så sätt kan avvikande beteende hos kammare och intilliggande kulvert upptäckas. Till skillnad från tidigare analyser som studerade vissa kammare eller serier av kammare lite närmare, användes data från alla kammare med en SAB i fjärrvärmenätet. Den data som har hämtats från MS PBI är precis som tidigare för luftfuktighet och temperatur i kammare. Istället för att hämta alla tillgängliga data (mätvärden med sex minuters intervall) har endast en datapunkt per dag hämtats: ett mätvärde för luftfuktighet och temperatur för varje kammare. Alla data från MS PBI är från tiden 00:00. Det bör finnas en viss tröghet i ventilationen som gör att luftfuktigheten i kamrarna reagerar med en viss fördröjning på svängningar i temperaturen utomhus. Därför användes värden för temperaturen utomhus från en timme innan värdena från MS PBI vid beräkning av korrelationen, alltså från 23:00 dagen innan. Data för nederbörden är den ackumulerade mängden från dagen innan datan från MS PBI.

De kammare som ansågs ha för hög skillnad mellan absolut luftfuktighet i kammare och utomhus rensades bort innan regressionen utfördes. Detta för att, som tidigare nämnts, inte normalisera att det kan finnas vatten eller för hög luftfuktighet i kamrarna. Initiala regressioner skapades varefter residualerna studerades. Datapunkter med för stora residualer rensades bort för att sedan göra om analysen med de kvarvarande datapunkterna. Dessa steg repeterades tills en godkänd modell med tillräckligt många datapunkter erhöles. Det ansågs vara viktigt att hitta balansen mellan hur väl modellen beskriver luftfuktigheten, stort R^2 och litet S , för att erhålla precisa referensvärden, men samtidigt använda så mycket data som möjligt för att skapa en modell som är representativ för en större mängd data. För regressionen med både temperatur och ventilation som förklarande variabler, beräknades också den inbördes korrelationen för att säkerställa så att den inte var för stor. Detta eftersom precisionen av de skattade parametrarna minskar vid ökande inbördes korrelation.

Resultatet av regressionsanalysen gav en funktion som användes för att beräkna skattade värden för de kammare som regressionen riktar sig åt. Skillnaden mellan de verkliga värdena och de skattade värdena utgjorde sedan grunden till felsökningen. Ju större (positiv) skillnad desto mer kritiskt är det i det här sammanhanget, eftersom det innebär att det verkliga värdet på luftfuktigheten är större än vad det borde vara för en kammare med goda förhållanden. För att utvärdera skillnaden i verkligt och skattat värde användes sedan de verktyg som tidigare nämnts i kapitel 4:

- Skillnad i absolut luftfuktighet användes för att undersöka om det kan finnas vatten eller fukt i kammaren.
- Korrelation mellan luftfuktighet och nederbörd användes för att få en uppfattning om hur det läcker in vatten i systemet. Tar sig vatten in genom betäckningen bör det ske relativt snabbt vid regn och därmed visa sig i korrelationskoefficienten utan tidsförskjutning för de kammare som har det problemet.
- Ventilationsmättet (om det inte används som indata till regressionen) användes för att utvärdera om bristande ventilation kan vara en orsak till förhöjd luftfuktighet. Hur ser det ut med luftflöde genom kulvert och möjlighet till korsdrag?

Figur 16 illustrerar processen för regressionsanalysen. Blå rutor är för datakällor, turkosa för data och beräkningar med data från kammare, gröna för data och beräkningar med data från SMHI, gula för beräkningar med data från båda källorna och orange för delmomenten i regressionen. Varje datapunkt (y , x_1 och x_2) representerar en kammare. Schemat visar processen för regression med temperatur och ventilation som förklarande variabler. För regression med bara temperatur som förklarande variabel ser schemat i princip likadant ut. Den enda skillnaden är att pilen från rutan med "Korrelation (ventilationsmätt)" går till "felsökning" istället för "urval av data". **T** är temperatur, **RF** är relativ luftfuktighet och **AF** är absolut luftfuktighet.



Figur 16: Flödesschema för regressionen.

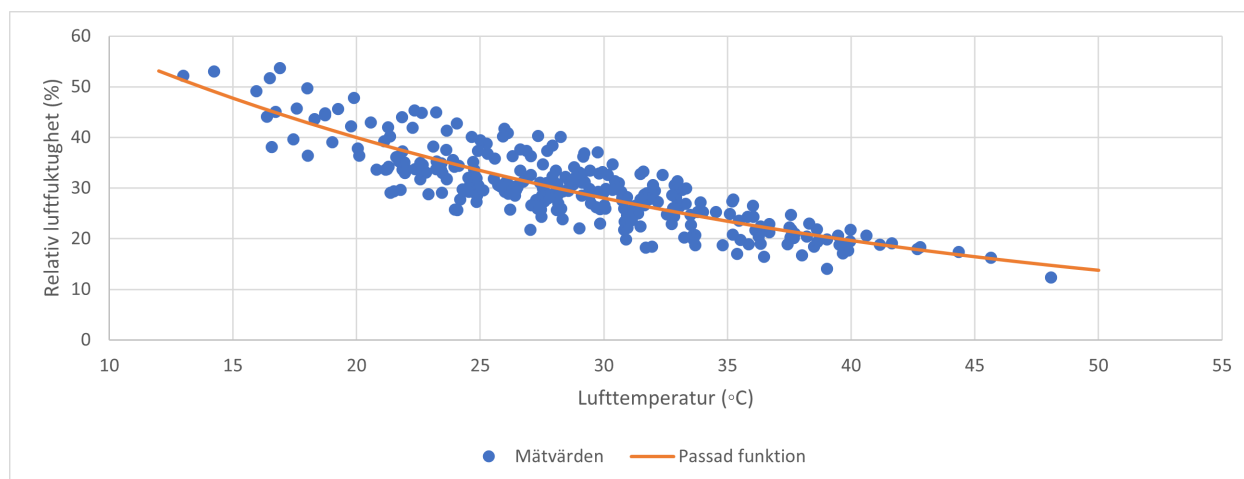
Resultat

I det här kapitlet presenteras resultaten av analysen av data och övriga resultat. Endast ett urval av resultaten från serierna BTG1 – ETN6 presenteras i kapitlet. De viktigaste beräkningarna för alla kamrarna i dessa serier visas i Appendix A.

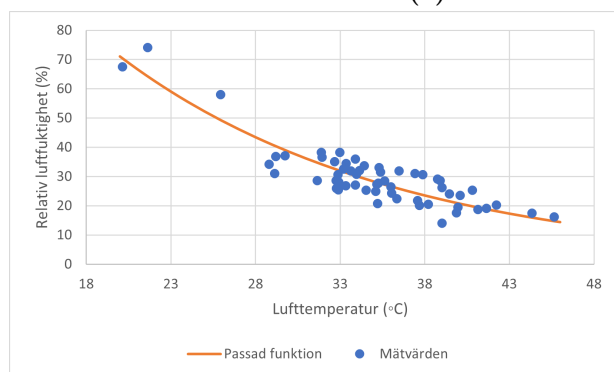
5.1 Luftfuktighet som funktion av temperatur

Det här avsnittet visar hur luftfuktigheten förhåller sig till temperaturen i kamrarna. Syftet är att se om det stämmer överens med teorin i avsnitt 3.4 och skapa funktioner som kommer att användas senare i avsnitt 5.4.

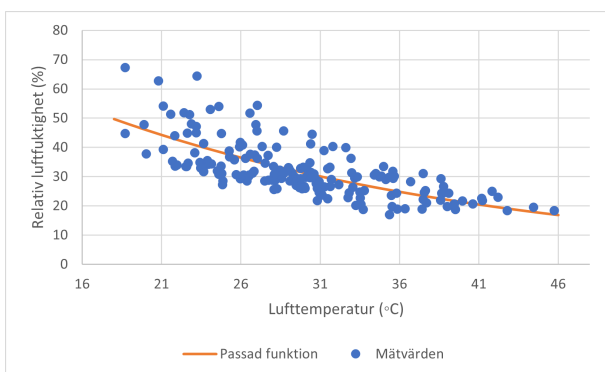
Med ett urval av kammare används data för att skapa tre funktioner (en för betong respektive eternit och en med båda) där relativ luftfuktighet endast beror på temperaturen. Urvalet av kammare är baserat på skillnaden i absolut luftfuktighet mellan luften utomhus och inne i kamrarna. Tanken är att använda kammare som har liten skillnad för att de är troligare att vara torra och därmed ha gynnsamma förhållande som inte ska leda till korrosionsangrepp.



(a) Urval av data från alla kammare.



(b) Urval av data från betongkulvert.



(c) Urval av data från eternitkulvert.

Figur 17: Relativ luftfuktighet som en funktion av temperatur, skapad med verklig data.

Funktionerna är:

$$\begin{aligned}
 \text{Alla} : \quad RF(T) &= 81.36 \cdot e^{-0,03557 \cdot T} \\
 \text{BTG} : \quad RF(T) &= 243.4 \cdot e^{-0,06152 \cdot T} \\
 \text{ETN} : \quad RF(T) &= 99.5 \cdot e^{-0,03386 \cdot T}
 \end{aligned} \tag{9}$$

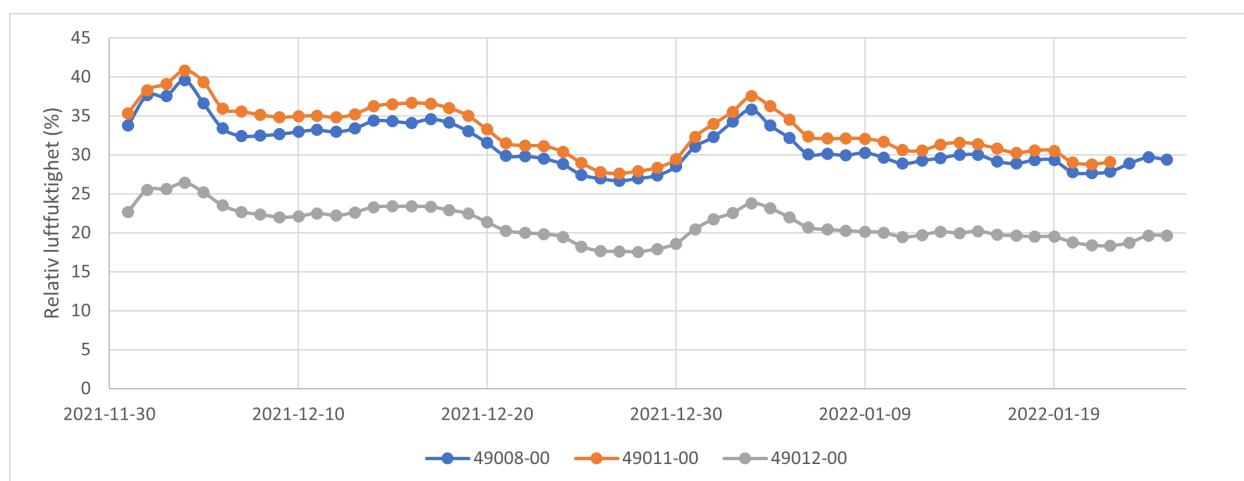
Jämförs utseendet av de anpassade funktionerna i Figur 17 med de teoretiska graferna i Figur 11 syns det att de anpassade funktionerna ungefär ligger inom intervallet 6-12 g/m³ i absolut luftfuktighet.

Sett till alla kammare för de två kulverttyperna har kammare i betongkulvert generellt sett högre temperatur än dem i eternitkulvert, och samtidigt är luftfuktigheten lägre. För perioden 13:e december 2021 till 22:e februari 2022 var medelvärdet av temperaturen för kammare i betongkulvert 35.9° C och medelvärdet av luftfuktigheten är 32.3 %. Motsvarande för eternitkulvert var 30.6° C och 37.0 %.

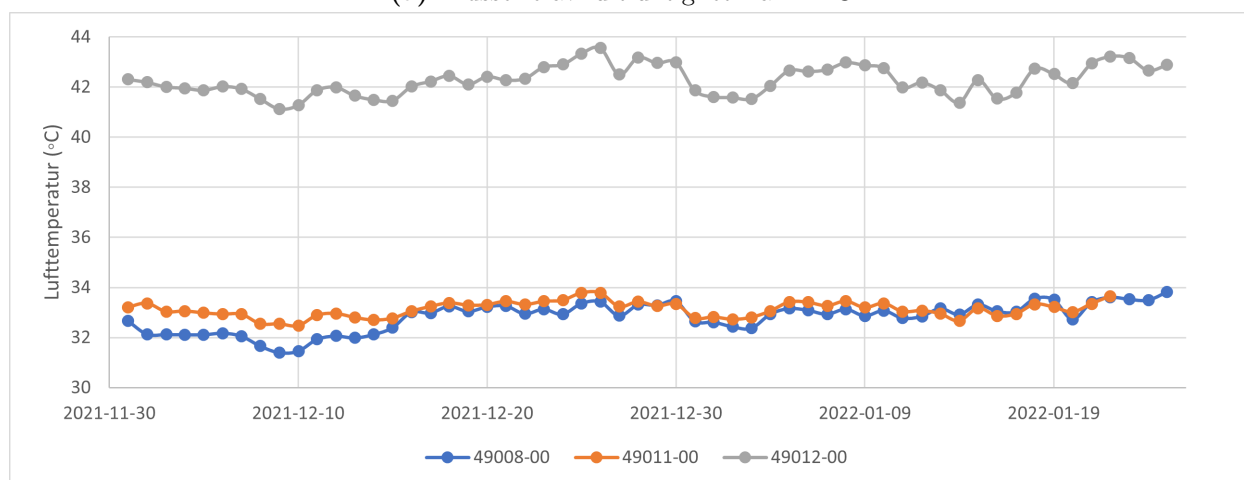
5.2 Tidsserie av luftfuktighet och temperatur

Det här avsnittet visar hur luftfuktigheten och temperaturen beter sig över tid i de olika kulverttyperna. Syftet är att med några exempel visuellt visa på skillnaderna mellan kulvertarna och slutsatsen man kan dra av dessa.

Serierna BTG1 – BTG3 uppvisar i de flesta fall liknande tidsserier för luftfuktigheten kammare mellan. Figur 18a visar tre kammare på rad i BTG2 som är ett bra exempel på det här. Förändringen i temperatur över tid är rätt jämn med fluktuationer på $\pm 1^\circ\text{C}$ kring medelvärdena. Korrelationskoefficienten mellan de tre tidsserierna för luftfuktigheten ligger alla runt 0.98. Det faktum att samvariationen är så pass stor indikerar att det finns ett luftflöde genom kulverten som sprider ut fukten i systemet. Karaktäristiskt för betongkulvert är också att tidsserierna för luftfuktighet är jämna, alltså att det inte är några större fluktuationer från dag till dag. Detta är också troligtvis till följd av just luftflödet i kulverten som motverkar snabba förändringar i luftfuktigheten för varje kammare längs vägen.



(a) Tidsserie av luftfuktighet från BTG2.

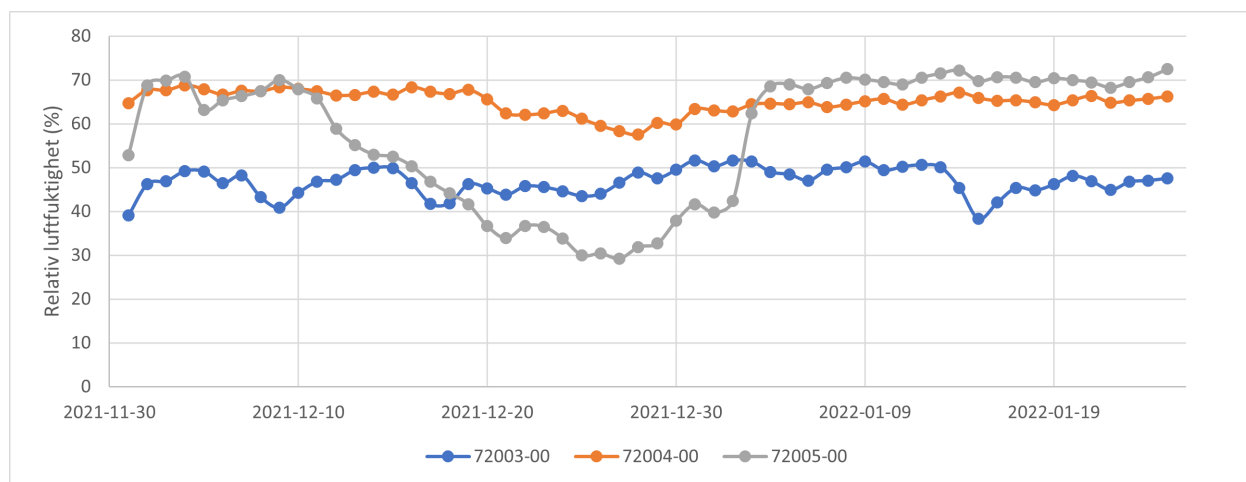


(b) Tidsserie av temperatur från BTG2.

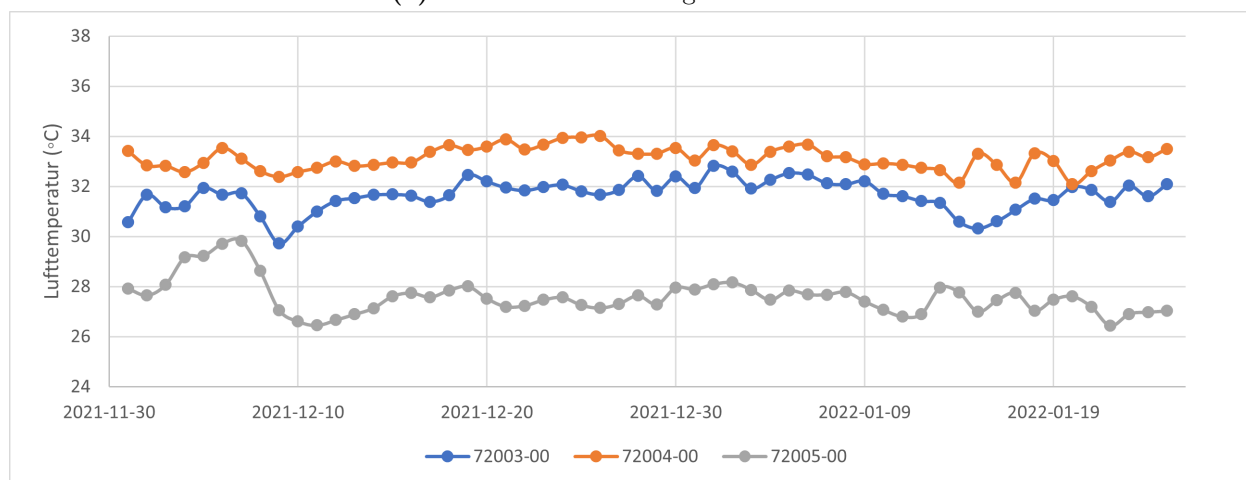
Figur 18: Tidsserier BTG2.

Som Figur 11 illustrerar sjunker den relativa luftfuktigheten med ökande temperatur, såvida den absoluta luftfuktigheten är samma. Det är en trolig förklaring till varför kammare 49012-00 har en konstant lägre luftfuktighet än de andra två med cirka 10 procentenheter; den har en markant högre lufttemperatur vilket syns i Figur 18b. Det finns andra faktorer som potentiellt kan påverka att den absoluta luftfuktigheten skiljer sig åt och därmed den relativa luftfuktigheten, men de tre kamrarna ligger inom spannet 11-12 g/m³ för medelvärdet av absolut luftfuktighet under perioden, och den skillnaden är inte tillräcklig för att beskriva skillnaden i relativ luftfuktighet.

Som motexempel till de överensstämmande trenderna i Figur 18a visar Figur 19a tre tidsserier från tre kammare i ETN1. Denna kulvert har polyuretanstöd som i Figur 3 och 4. Lufttemperaturerna i de tre kamrarna är för det mesta stabila kring en viss temperatur, om än något mer fluktuerande än för dem i Figur 18b. Noterbart är att det är annat som påverkar luftfuktigheten än bara temperaturen. Luftfuktigheten i 72005-00 gör ett stort fall under en längre period medan temperaturen fortfarande är jämn, och 72004-00 har konstant högre luftfuktighet än 72003-00 trots att temperaturen är högre.



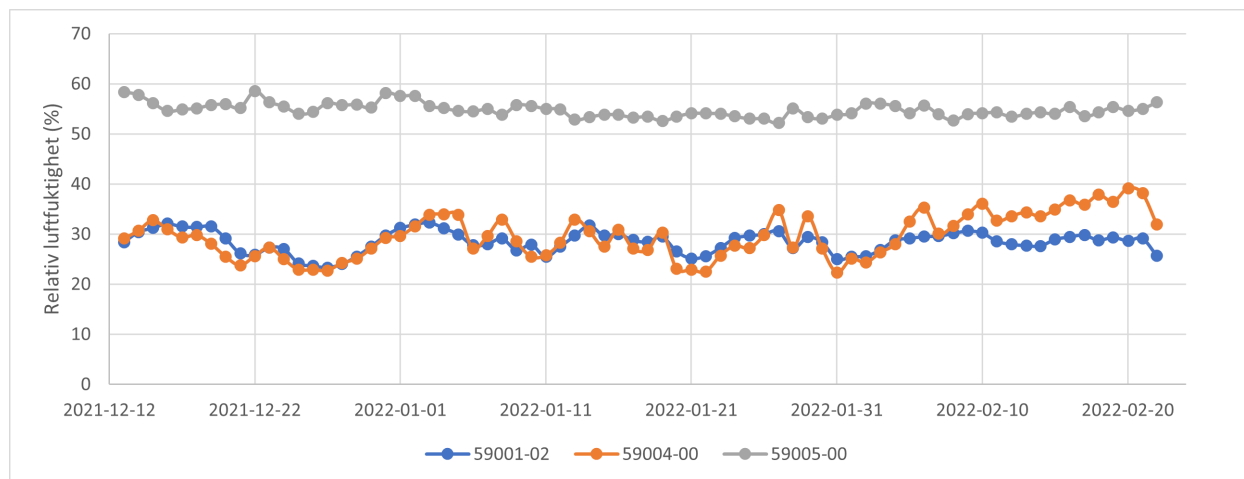
(a) Tidsserie av luftfuktighet från ETN1.



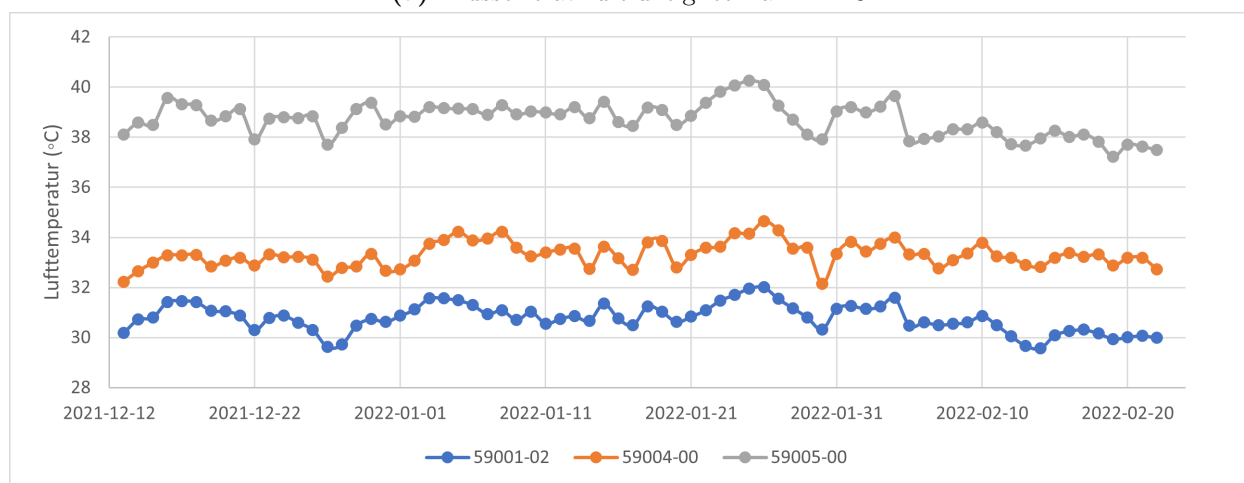
(b) Tidsserie av temperatur från ETN1.

Figur 19: Tidsserier ETN1.

Grannkammare i eternitkulvert med cellbetongstöd har för det mesta åtskiljande trender likt de med polyuretanstöd, enligt datan som har analyserats. Figur 20 visar luftfuktigheten och temperaturen för tre kammare i serien ETN3. 59001-02 och 59004-00 har dock någorlunda liknande tidsserier för luftfuktigheten och en korrelationskoefficient på 0.64. Samtidigt korrelerar båda mycket med utomhustemperaturen vilket kan förklara varför de samvarierar.



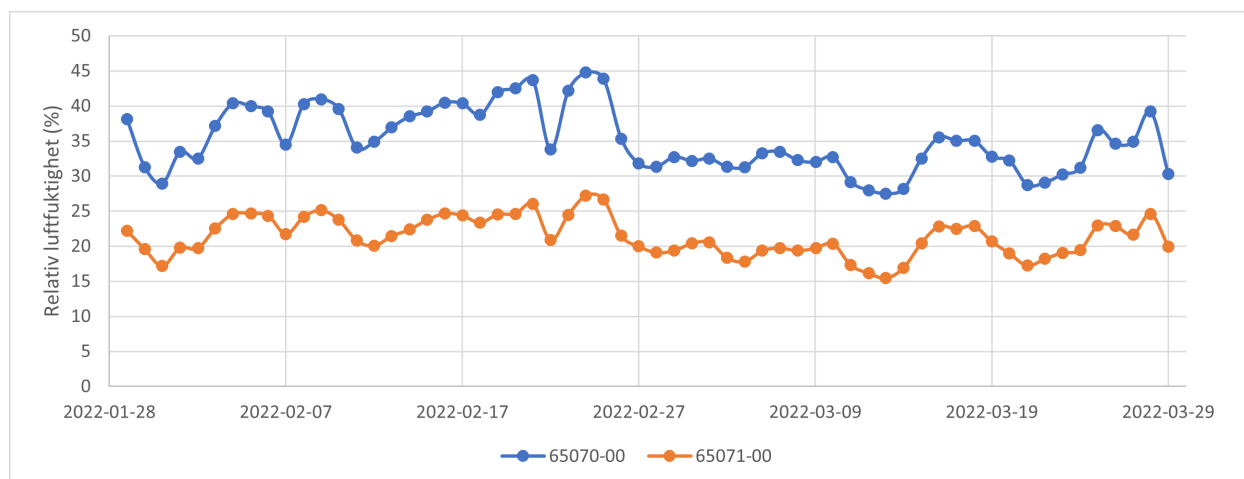
(a) Tidsserie av luftfuktighet från ETN3.



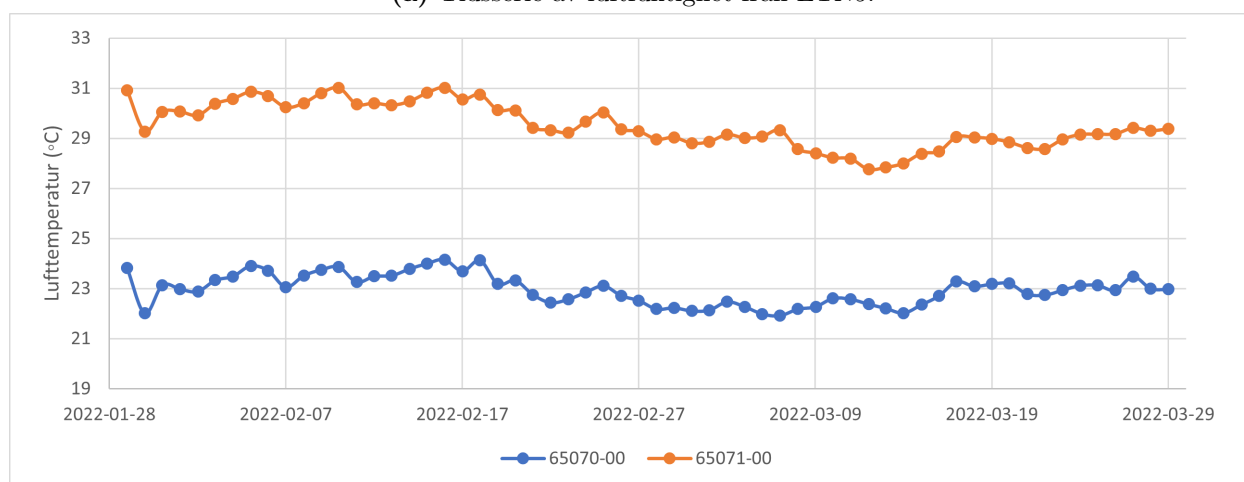
(b) Tidsserie av temperatur från ETN3.

Figur 20: Tidsserier ETN3.

Eternitkulvert med metallstöd uppvisar i de allra flesta fall liten kovarians mellan tidsserierna. Det finns endast ett fall i denna typ av kulvert, av det studerade urvalet, där två grannkammars luftfuktighet korrelerar, se Figur 21a, och därmed tyder på att det finns ett luftflöde däremellan. Båda dessa kammars luftfuktighet har liten kovarians med temperaturen utomhus och nederbörden, vilket påvisar att de inte korrelerar med varandra på grund av att de båda samvarierar med omgivningen. Även i det här fallet är lufttemperaturerna i kamrarna relativt stabila med ungefär $\pm 1.5^\circ \text{C}$ kring ett medelvärde.



(a) Tidsserie av luftfuktighet från ETN5.



(b) Tidsserie av temperatur från ETN5.

Figur 21: Tidsserier ETN5.

Poängen med att visa temperaturen i samband med luftfuktigheten är för att betona att den förändras lite över tid, och beskriver därför inte förändringen i luftfuktighet, utan påverkar snarare nivån eller medelvärdet av den. Alla tre exempel ovan från eternitkulverten visar att luftfuktigheten svänger mer från dag till dag, inte nödvändigtvis mycket kring medelvärdet, men det är en identifierbar skillnad från betongkulverten.

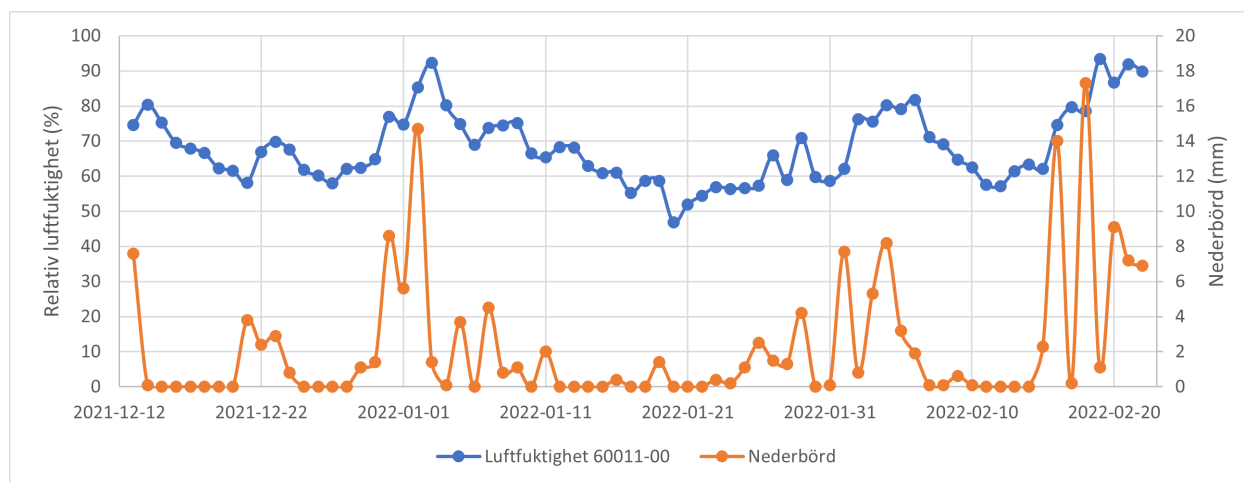
Figurerna 18a, 19a, 20a och 21a visar alla luftfuktighetens trend för kammare placerade bredvid varandra, från fyra olika typer av kulvertar. För att snabbare få en uppfattning om hur pass trenderna liknar varandra i respektive kulvert beräknas korrelationskoefficienterna av trenderna för varje grannkammare och sedan medelvärdet av dessa. Resultatet visas i Tabell 2 och indikerar hur lika tidsserierna av luftfuktighet är och i förlängningen om hur pass bra luftflödet genom kulverttypen är. Ju högre medelvärde desto bättre luftutbyte mellan kammare. Eternitkulvert med polyuertanstöd och cellbetongstöd anses ha liknande förutsättningar och analyseras som en.

Medelvärde korrelation med grannkammare		
BTG	ETN metallstöd	ETN polyuretanstöd & cellbetongstöd
0.88	0.39	0.49

Tabell 2: Medelvärdet av alla korrelationskoefficienter för grannkamrarnas luftfuktighet.

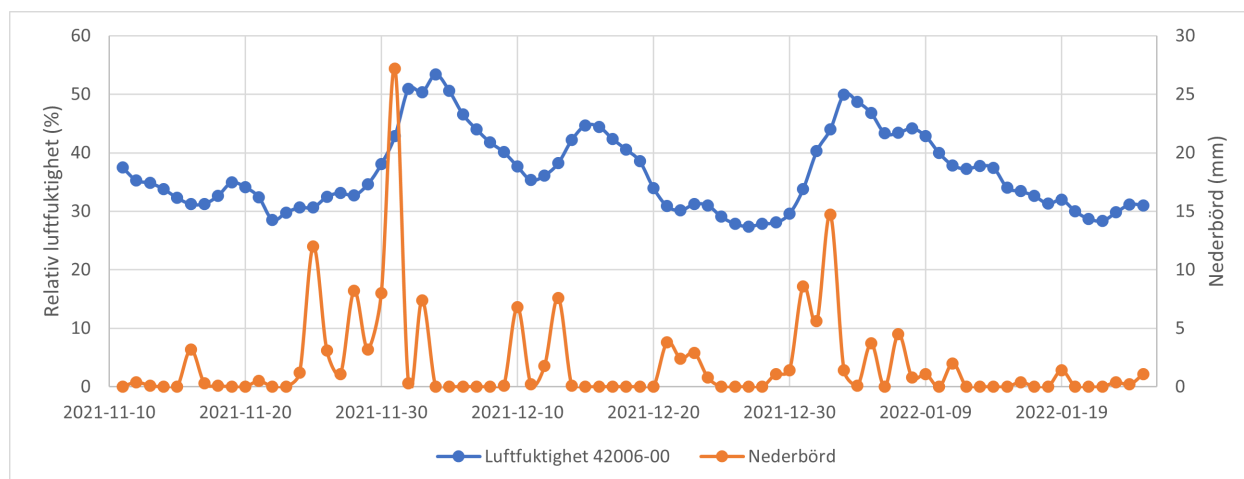
5.2.1 Inverkan av nederbörd

För att studera inverkan av nederbörd på luftfuktighet har samtliga kammars trender plottats tillsammans med regnmängden i Helsingborg för samma tidsperiod. En betydande andel kammare visar tydlig kovarians med nederbörd. I Figur 22 visas kammare 60011-00 från BTG3, den kammare som har det starkaste sambandet av de totalt 81 stycken som har studerats. Av grafen kan man se att det är en viss tidsförskjutning mellan mätvärdena. Genom att beräkna korrelationskoefficienten för olika tidsförskjutningar erhålls resultatet att den största korrelationen sker vid en dags förskjutning. I det här fallet är korrelationskoefficienten 0.69. Av grafen att döma är det trögheten i luftfuktigheten som främst förhindrar korrelationen att bli större. Trögheten beror troligtvis på att det tar tid för systemet att sjunka ned till en lägre luftfuktighet igen efter dagar med regn tätt inpå varandra. Det syns till exempel vid de två topparna med regn i mitten av februari.



Figur 22: Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 60011-00 och nederbörd.

Ytterligare ett exempel på en kammare som påverkas av regn är kammare 42006-00 från BTG1 som syns i Figur 23. Till skillnad från 60011-00 ovan tar det längre tid innan luftfuktigheten når ett maxvärde efter att det har regnat. I det här fallet är korrelationskoefficienten som störst efter tre dagar med ett värde på 0.52 medan den är 0.13 utan tidsförskjutning.



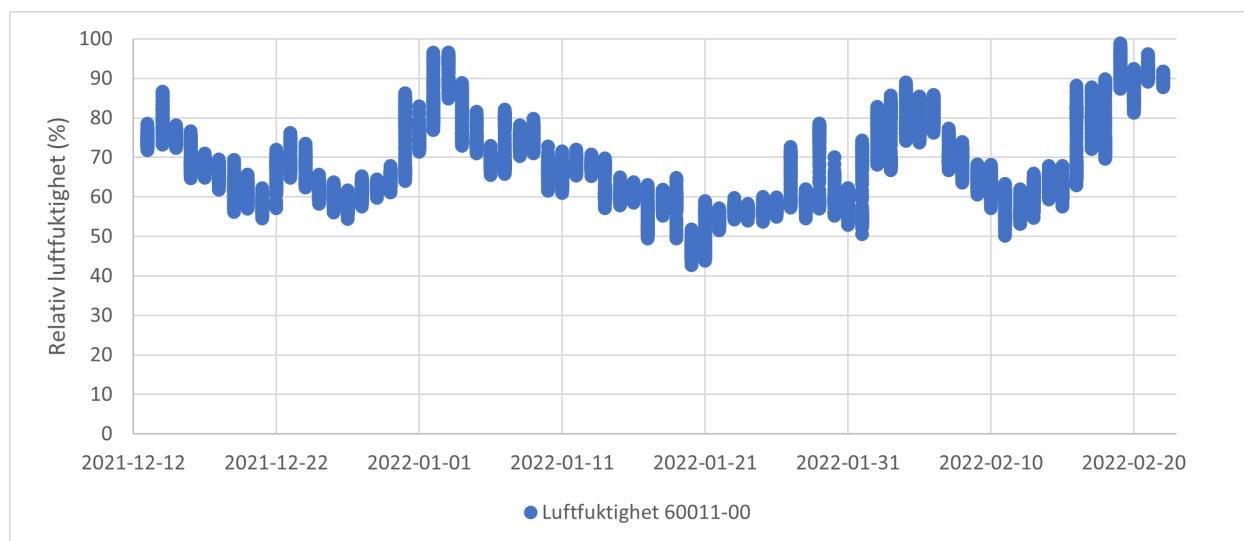
Figur 23: Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 42006-00 och nederbörd.

Att det tar olika lång tid för nederbörd att påverka luftfuktigheten kan tyda på att vatten tar sig in i systemet på olika sätt. Ingen eller kort tidsförskjutning tyder på att det går snabbt och att vatten möjligtvis tar sig in genom betäckningen och innerlocket. Längre tidsförskjutning, från två eller tre dagar och uppåt, innebär eventuellt att regnvatten sjunker ned i marken och tar sig in via öppningar i strukturen. Serierna BTG1 och ETN1 ligger i ett område med mycket gräs på marknivå, där vatten kan sugas upp av marken. Båda dessa serier har kammare med hög luftfuktighetsnivå och identifierbar påverkan av regn. Detta är till skillnad från övriga serier som ligger mer centralt i Helsingborg med asfalterad mark ovan.

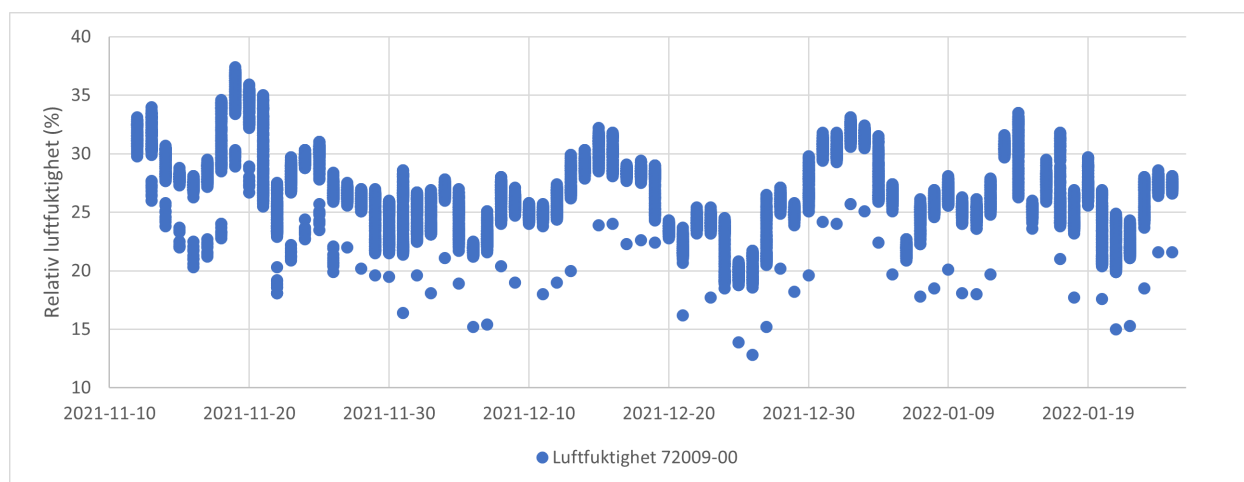
5.2.2 Spridning i dagsvärden

Nedan visas två exempel på alla sexminuters värden av luftfuktigheten plottade över en längre period. Syftet med att studera dessa diagram är för att skapa sig en uppfattning om medelvärdestrenden går att lita på och om det potentiellt kan vara något fel med fuktsensorer.

Figur 24 visar att spridningen mellan värdena för luftfuktigheten i kammare 60011-00 under en dag varierar med ungefär tio procentenheter, vilket är normalt för de studerade kamrarna. De flesta kammare uppvisar ett intervall mellan fem till femton procentenheters skillnad under en dag. Oftast är spridningen i den större ordningen under de dagar med nederbörd. Figur 25 visar spridningen i kammare 72009-00. Spridningen är förvisso inom ett normalt intervall men det finns många dagar som har ett avstickande värden, vilket inte är normalt och kan indikera att sensorn inte ger korrekta värden.



Figur 24: Daglig spridning av mätningar för relativ luftfuktighet i kammare 60011-00.

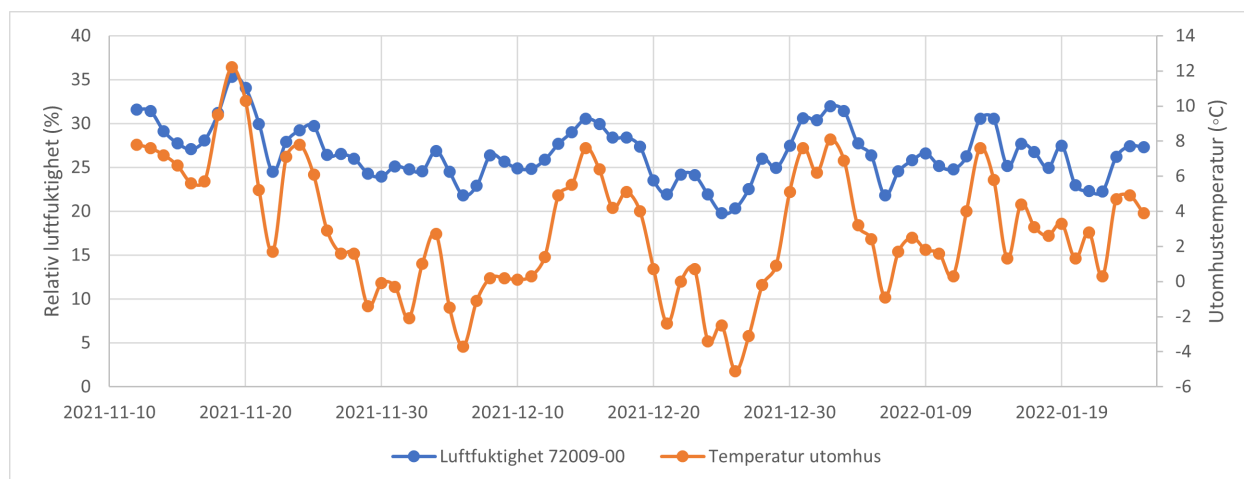


Figur 25: Daglig spridning av mätningar för relativ luftfuktighet i kammare 72009-00.

5.3 Ventilation

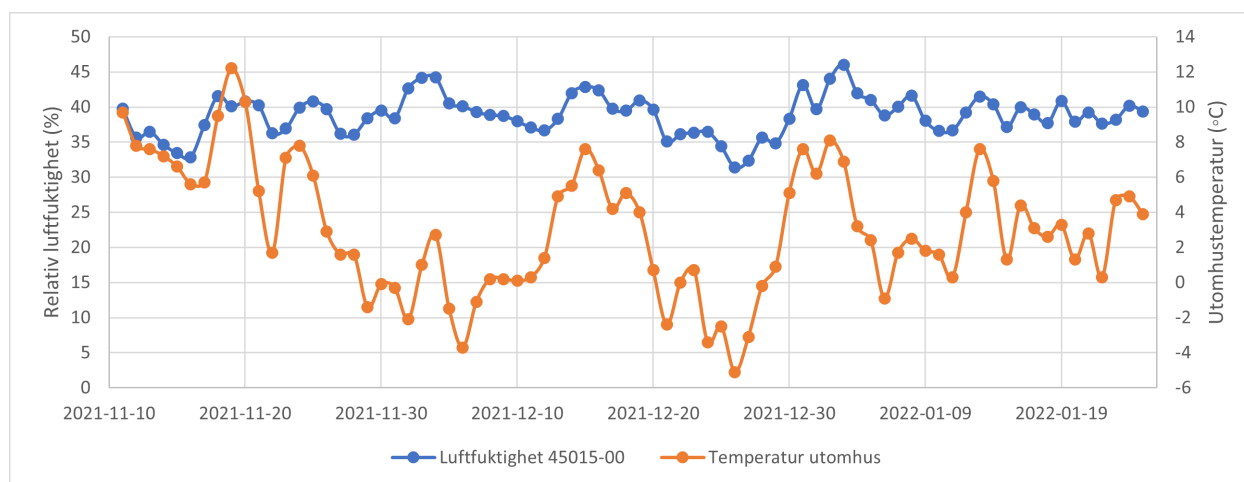
Det här avsnittet visar hur luftfuktigheten i kammare förhåller sig till utomhustemperaturen, och kan fungera som en indikation på ventilation som beskrivet i avsnitt 4.1.3. Syftet är att återigen visa på skillnaden mellan betong- och eternitkulvert, och att styrka resonemanget bakom måttet med att ventilationen ändras beroende på vindförhållanden och att styrkan av korsdrag påvisas.

Figur 26 visar tidsserien för luftfuktigheten i kammare 72009-00, som tillhör ETN1, samt temperaturen utomhus för motsvarande datum. Det är en av de kammare som uppvisar störst kovarians med temperaturen utomhus. Förändringen från dag till dag i luftfuktigheten är till synes rätt skarp och följer svängningarna i temperaturen utomhus. Korrelationskoefficienten för tidsserierna är 0.92. Koefficienten är beräknad med medelvärden för motsvarande dag.



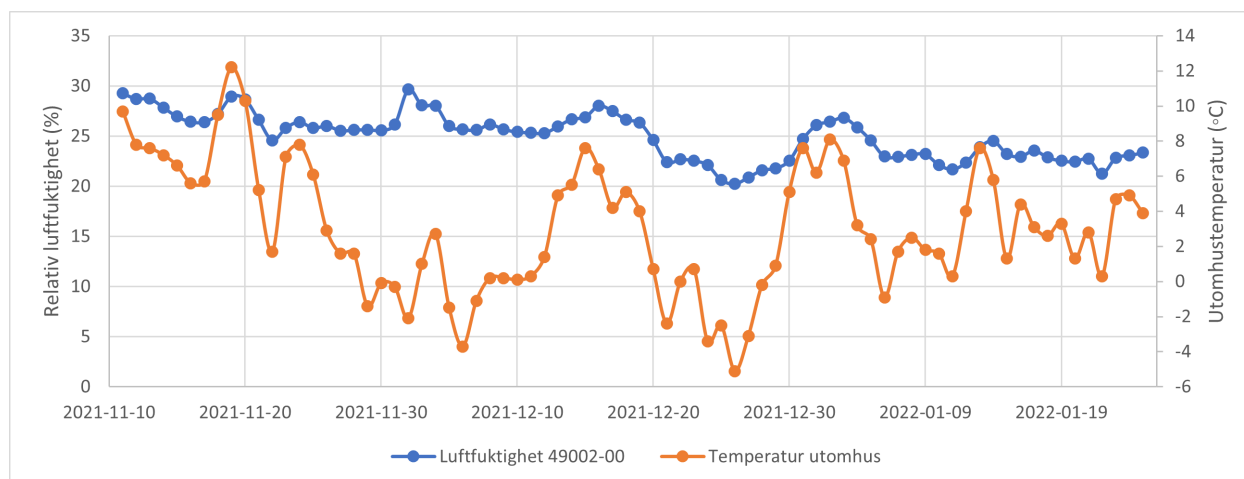
Figur 26: Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 72009-00 och utomhustemperatur.

Figur 27 visar ytterligare ett exempel på hur luftfuktigheten i en kammare förhåller sig till temperaturen utomhus. Kammaren ligger i ETN2 och även i det här fallet syns det att fuktigheten i stort följer temperaturen men att det finns en viss tröghet som, till skillnad från i Figur 26, gör att fluktuationen inte är lika snabb. Det ska också noteras att det regnade en del i slutet av november och i början av december som resulterade i att luftfuktigheten stannade kring 40 % snarare än att sjunka tillsammans med temperaturen utomhus. Korrelationskoefficienten för dessa två tidsserier är 0.37.



Figur 27: Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 45015-00 och utomhustemperatur.

För kammare i betongkulvert är luftfuktigheten jämnare över tid. Till skillnad från exemplen i Figur 26 och 27, som varierar en del från dag till dag, är det mjukare trender i betongkulvert. I Figur 28 syns det att luftfuktigheten följer temperaturen något vid topparna men svängningarna är tröga och hinner inte med temperaturförändringarna utomhus. Korrelationskoefficienten är 0.54.



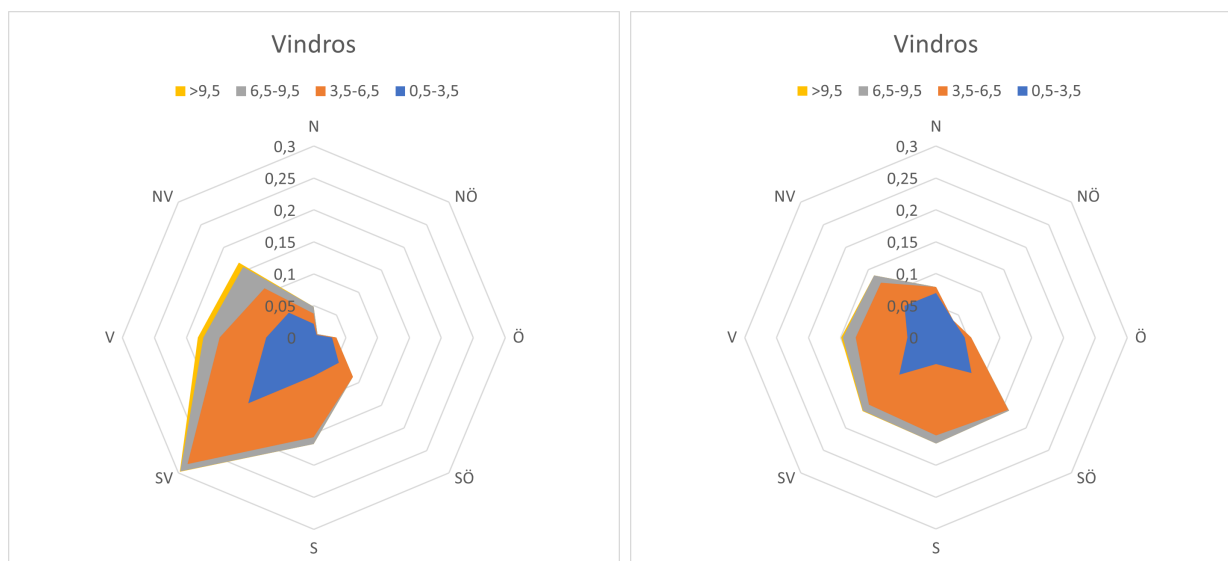
Figur 28: Dagligt medelvärde av relativ luftfuktighet för kammare 49002-00 och utomhustemperatur.

Tabell 3 visar de fem kammare som har störst korrelationskoefficient, och indikerar bra ventilation, för två olika perioder, samt medelvärdet för alla kammare i fjärrvärmenätet med en SAB. Noterbart är att magnituden på koefficienterna skiljer sig åt en del och även medelvärdet mellan de två perioderna. En möjlig förklaring till detta beteende kan vara att vindförhållandena under de två perioderna är olika. Figur 29 visar vindens riktning, hastighet och hastighetsfrekvens under båda perioderna. Konturerna är frekvensen av ett hastighetsintervall och färgerna indikerar vilket hastighetsintervall. Figur 29b visar att det under den senare perioden var fler tillfällen med vindstilla förhållanden eftersom den totala arean är mindre och att det var generellt lägre hastigheter med mer utspridd vindriktning.

13:e dec 2021 – 22:e feb 2022		7:e feb 2022 – 29:e mars 2022	
Kammare	Korr. koefficient	Kammare	Korr. koefficient
1	0.94	1	0.84
2	0.92	2	0.83
3	0.92	3	0.80
4	0.91	4	0.79
5	0.91	5	0.79
Medelvärde alla	0.52	Medelvärde alla	0.34

Tabell 3: Korrelationskoefficienter mellan luftfuktighet i kammare och temperatur utomhus.

Det finns ingen specifik anledning varför perioderna överlappar. Olika perioder studerades med tiden utan att det från början var tänkt att jämföra dem med varandra vid ett senare tillfälle. Optimalt sett borde det inte finnas överlappande datum.



(a) Data mellan 13:e december och 22:a februari.

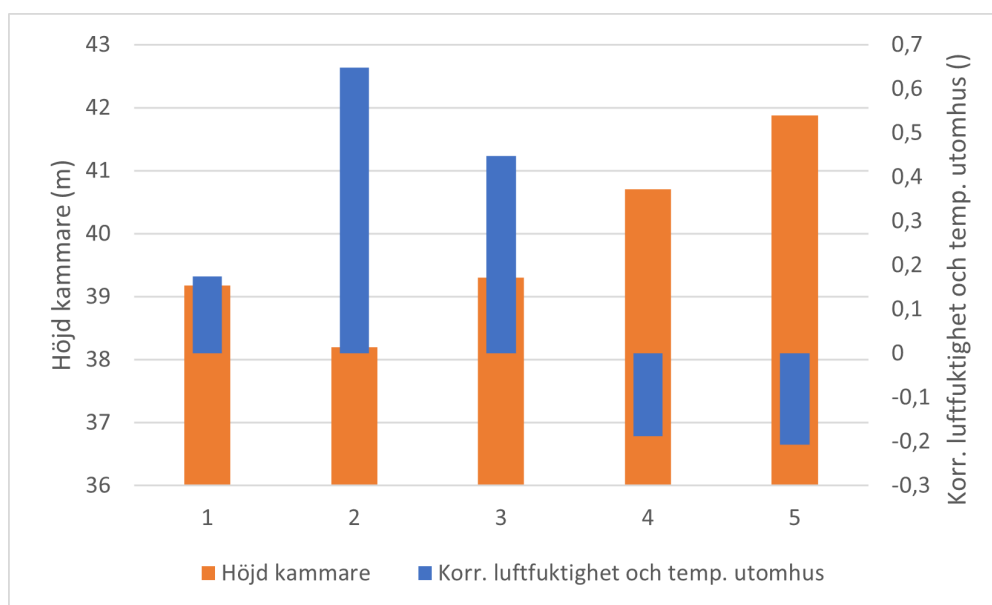
(b) Data mellan 7:e februari och 29:e mars.

Figur 29: Vindros i Helsingborg för två olika perioder. Vindhastighet i m/s.

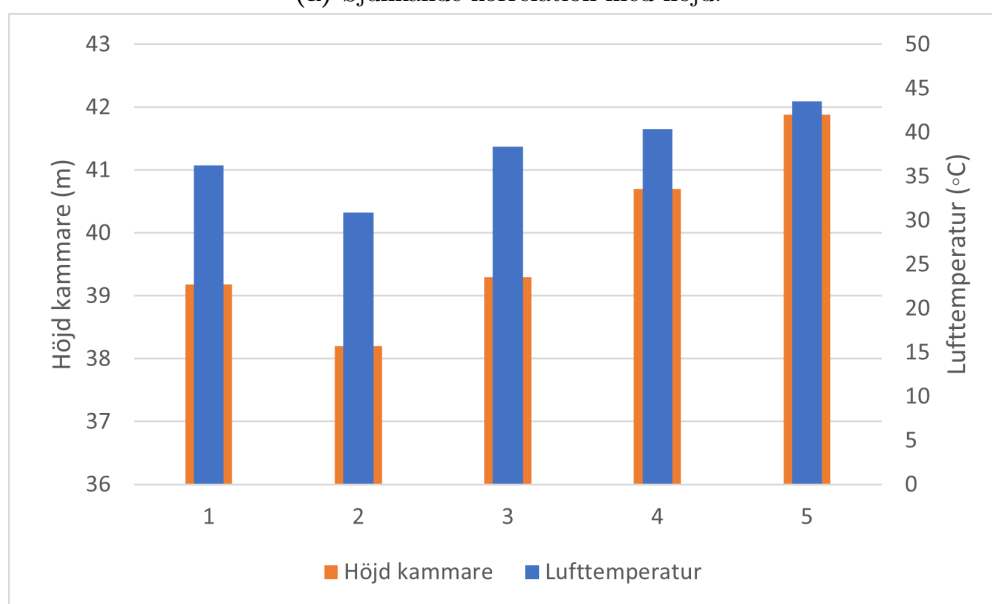
Källa: [47]

5.3.1 Betongkulvert

Med information om kammarens höjd, lufttemperatur och korrelation mellan luftfuktighet och utomhustemperatur är det möjligt att få en uppfattning om var i en betongkulvert skorstenseffekten verkar. Som nämnt i avsnitt 3.5 stiger varm luft uppåt. Samtidigt är det tydligt att korrelationen minskar längs med luftflödet, alltså uppåt. Figur 30 visar att just detta inträffar på en viss sträcka. Det finns andra sträckor med höjdskillnad där det går att identifiera samma beteende.



(a) Sjunkande korrelation med höjd.



(b) Ökande temperatur med höjd.

Figur 30: En sekvens av kammare där skorstenseffekten manifesteras.

5.3.2 Eternitkulvert

Kammare belägna i eternitkulvert kan inte förlita sig på ventilation med luftflöde genom kulverten (med undantag för kanske vissa delar med metallstöd). Istället är de beroende av separat ventilation genom ventilationstornen för varje kammare. Måttet på ventilation visas i Tabell 4 för de kammare som har två torn på motsatt sida om kammaren samt medelvärde för alla kammare i eternitkulvert. Värdena i tabellen indikerar att ventilationen är bättre i kammare som har förutsättning för korsdrag.

13:e dec 2021 – 22:e feb 2022		7:e feb 2022 – 29:e mars 2022	
Kammare	Korr. koefficient	Kammare	Korr. koefficient
1	0.91	1	0.80
2	0.90	2	0.75
3	0.90	3	0.74
4	0.87	4	0.73
5	0.78	5	0.68
6	0.68	6	0.53
Medelvärde alla	0.52	Medelvärde alla	0.34

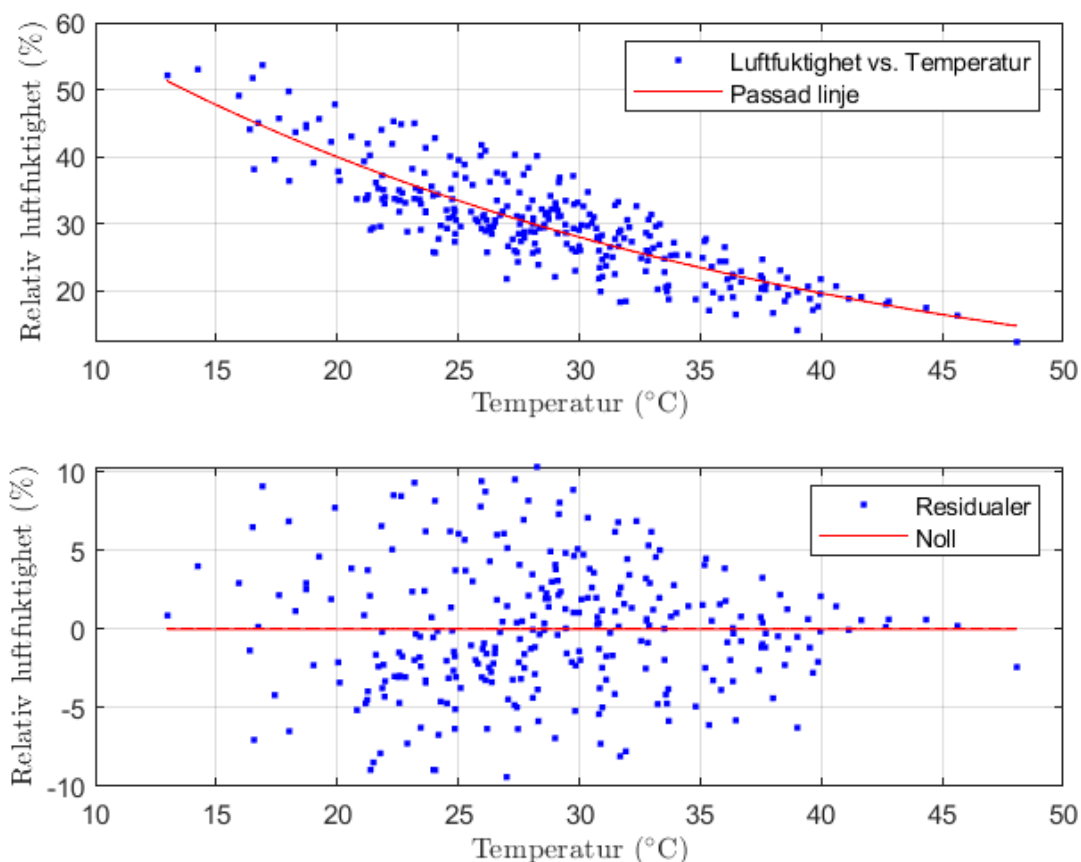
Tabell 4: Korrelationskoefficienter mellan luftfuktighet i kammare och temperatur utomhus, för kammare med förutsättning till korsdrag.

5.4 Regressionsanalys

I det här avsnittet presenteras resultatet av regressionsanalysen och hur den kan användas för att felsöka höga nivåer av luftfuktighet. Fortsättningsvis kommer korrelation mellan luftfuktighet i kammare och temperatur utomhus benämnas som ventilation.

5.4.1 Endast temperatur

För regressionsanalysen med endast temperatur som förklarande variabel används data från båda kulverttyperna. Bara kammare med en skillnad i absolut luftfuktighet mindre än 6 g/m^3 har tagits med. Det innebär att 46 % av kamrarna har rensats bort på grund av för hög absolut luftfuktighet. Värdet är en avvägning mellan en stor datamängd och låg absolut luftfuktighet. Efter residualanalysen har ytterligare sjutton punkter tagits bort. Totalt har 287 datapunkter (kammare) använts, av totalt 530, för att skapa modellen. Resultatet syns i Figur 31. Den övre grafen i figuren är samma som Figur 17a samt även funktionen som skapas är samma som den översta i Ekvation 9.



Figur 31: Regression med luftfuktighet i kammare som y och temperatur i kammare som x.

$$\begin{aligned}
 \text{Funktion : } & RF(T) = 81.36 \cdot e^{-0,03557 \cdot T} \\
 \text{Konfidensintervall } \alpha & 95 \% : (75.56, 87.16) \\
 \text{Konfidensintervall } \beta & 95 \% : (-0.03823, -0.03291) \\
 R^2 & = 0.716 \\
 S & = 4.07
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Tolkningen av resultatet är att periodmedelvärdet av temperaturen kan förklara 71.6 % av variansen i periodmedelvärdet av luftfuktigheten i kamrarna, för de kammare som inte har 6 g/m^3 mer fukt i luften än luften utomhus. En slumpmässigt vald punkt från datan som har skapat modellen bör ligga ungefär 4 procentenheter, alltså S -värdet i Ekvation 10, ifrån det skattade värdet. Båda parametrarnas konfidensintervall är skilda från noll och därför bör motsvarande förklarande variabler vara med i modellen. Residualerna ser också ut att vara normalfördelade kring noll och ingen särskild trend kan utläsas från det undre punktdiagrammet i Figur 31. Det innebär att modellen kan antas beskriva datan bra och att förhållandet mellan luftfuktigheten och temperaturen är exponentiellt som funktionen i Ekvation 10 visar.

5.4.2 Temperatur och ventilation

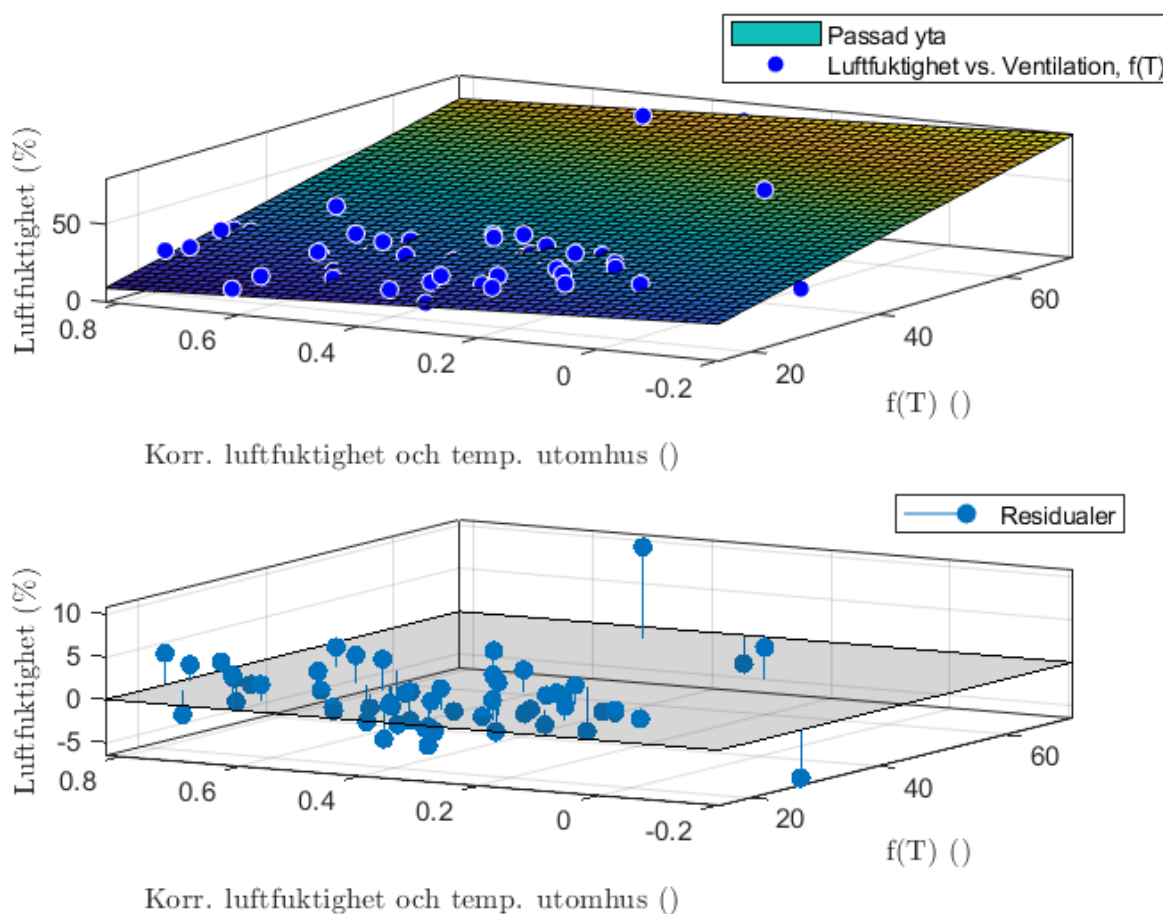
Används både temperatur och ventilation som förklarande variabler i samma modell erhålls resultaten i Figur 32 och 33. Till skillnad från regressionen ovan är det inte temperaturen direkt som används som variabel, utan det är den andra och tredje funktionen i Ekvation 9 för betong- respektive eternitkulvert.

$$\text{BTG : } RF(T) = 243.4 \cdot e^{-0,06152 \cdot T}$$

$$\text{ETN : } RF(T) = 99.5 \cdot e^{-0,03386 \cdot T}$$

Anledningen är att det var svårt att skapa en regression i MATLAB med en variabel med linjärt förhållande och en med exponentiellt förhållande.

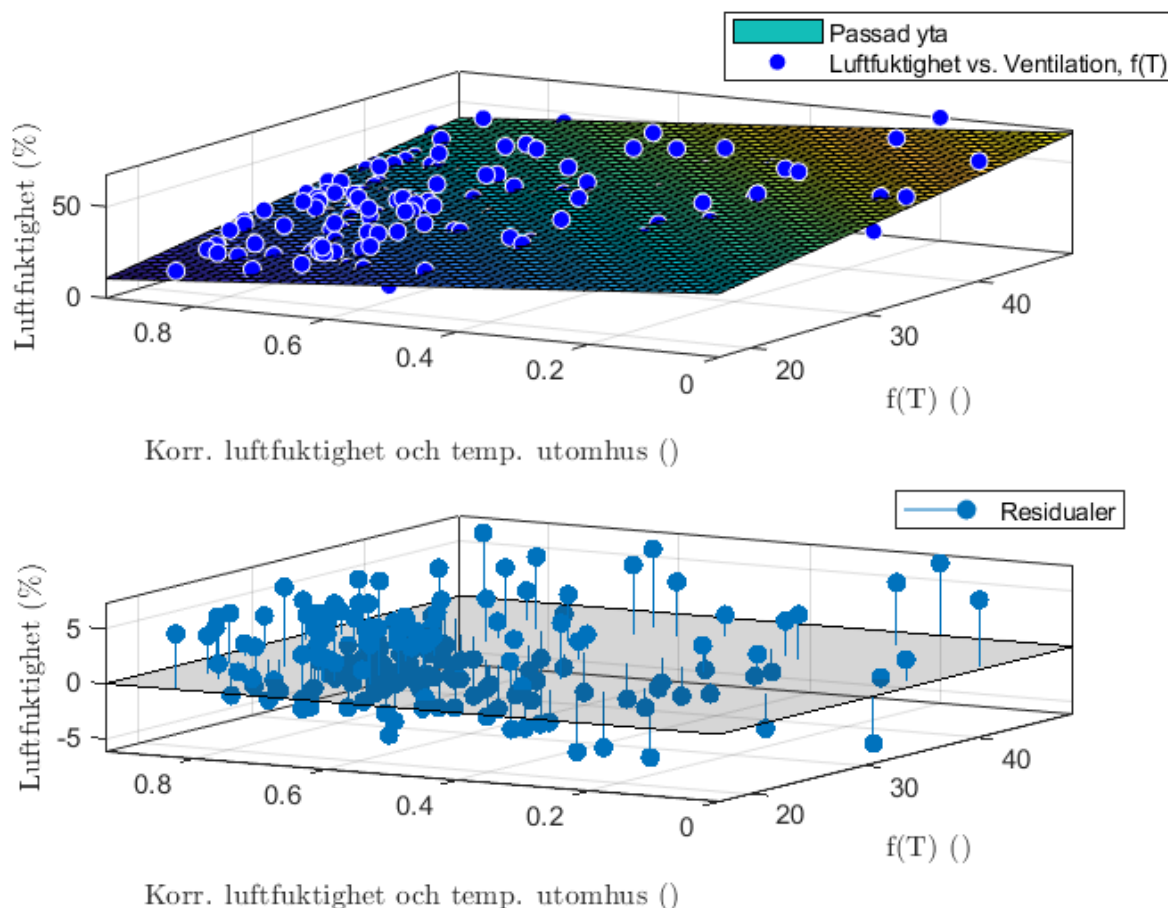
Kammare med skillnad i absolut luftfuktighet mindre än 9 g/m^3 används i regressionerna för betong- och eternitkulvert. Att gränsen är högre än för den föregående regressionen är till följd av att det finns en mindre mängd data att välja från. Hade samma gränsvärde använts hade datamängden blivit väldigt liten. I Ekvationerna 11 och 12 betecknas ventilation med V .



Figur 32: Betongkulvert. Regression med luftfuktighet i kammare som y , funktion av temperatur i kammare som x_1 och ventilation som x_2 .

$$\begin{aligned}
\text{Funktion : } RF(T, V) &= 6.96 + 0.982 \cdot f(T) - 15.21 \cdot V \\
f(T) &= 243.4 \cdot e^{-0,06152 \cdot T} \\
\text{Konfidensintervall } \alpha \text{ 95 \% : } & (3.78, 10.14) \\
\text{Konfidensintervall } \beta_1 \text{ 95 \% : } & (0.89, 1.07) \\
\text{Konfidensintervall } \beta_2 \text{ 95 \% : } & (-19.15, -11.27) \\
R^2 &= 0.909 \\
S &= 3.27 \\
\text{Korrelation mellan RF och } f(T) &: 0.900 \\
\text{Korrelation mellan RF och } V &: -0.301 \\
\text{Korrelation mellan } f(T) \text{ och } V &: 0.016
\end{aligned}
\tag{11}$$

Luftfuktighet och ventilation har negativ korrelation, vilket innebär att ju bättre ventilationen är desto lägre är luftfuktigheten. Inbördes korrelation mellan de förklarande variablerna är liten, så det är godkänt att använda båda variablerna i regressionen för betongkulvert. Det är dock tydligt att det är temperaturen som till störst del förklarar luftfuktigheten. Alla parametrarnas konfidensintervall är skilda från noll och de är därmed signifikanta i modellen. 58 observationer har använts för att skapa modellen.



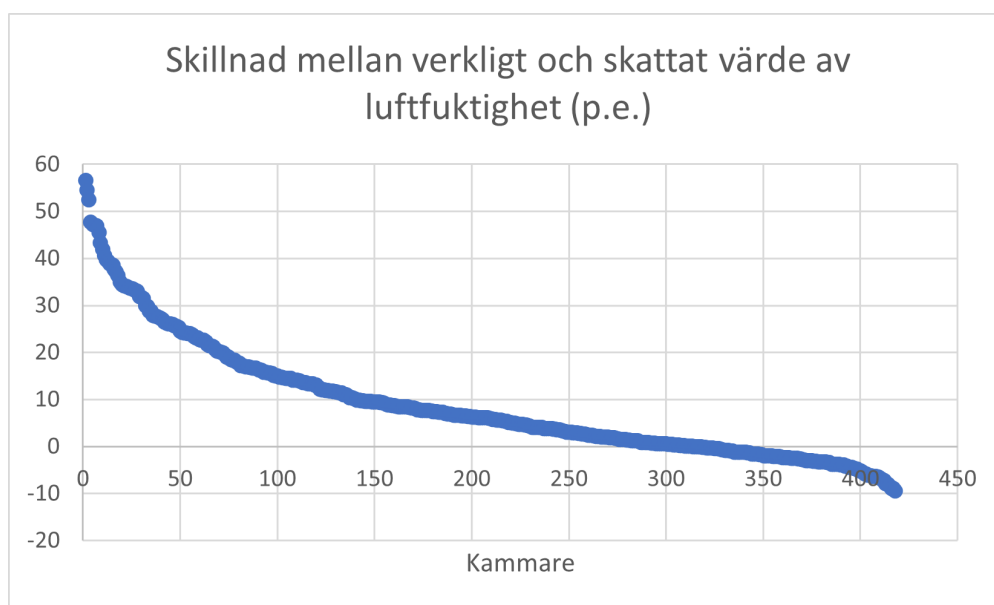
Figur 33: Eternitkulvert. Regression med luftfuktighet i kammare som y, funktion av temperatur i kammare som x_1 och ventilation som x_2 .

$$\begin{aligned} \text{Funktion : } RF(T, V) &= 18.4 + 0.987 \cdot f(T) - 26.46 \cdot V \\ f(T) &= 99.5 \cdot e^{-0,03386 \cdot T} \\ \text{Konfidensintervall } \alpha \text{ 95 \% : } & (15.55, 21.24) \\ \text{Konfidensintervall } \beta_1 \text{ 95 \% : } & (0.91, 1.06) \\ \text{Konfidensintervall } \beta_2 \text{ 95 \% : } & (-28.79, -24.14) \\ R^2 &= 0.874 \\ S &= 3.29 \\ \text{Korrelation mellan RF och f(T) : } & 0.718 \\ \text{Korrelation mellan RF och V : } & -0.597 \\ \text{Korrelation mellan f(T) och V : } & 0.004 \end{aligned} \tag{12}$$

Precis som för betongkulvert är den inbördes korrelationen mellan de förklarande variablerna liten även för eternitkulvert. I det här fallet bidrar ventilation betydligt mer till att förklara luftfuktigheten. Det kan troligtvis förklaras med att kulverten är stängd (förutom vissa delar med metallstöd) och att alla kammare därmed har separat ventilation genom sina ventilationstorn. Då finns det en direkt koppling mellan omgivningen utomhus och kammaren, vilket är nödvändigt för att måttet, som är baserat på hur luftfuktigheten följer temperaturen utomhus, ska fungera så bra som möjligt. Alla parametrarnas konfidensintervall är skilda från noll och de är därmed signifikanta i modellen. 179 observationer har använts för att skapa modellen.

5.4.3 Felsökning

Regressionsmodellen med endast temperatur som förklarande variabel har en stor spridning i skillnad mellan verkligt och skattat värde (mellan -9 och 57 procentenheter), se Figur 34. Den anses därför vara tillräckligt bra för att kunna peka ut en mängd kammare som inte möter kraven för att anses ha goda förhållanden. Därför kommer den modellen att användas vidare för att studera exempel på felsökning.



Figur 34: Fördelningen av differensen mellan verkligt och skattat värde av luftfuktighet. Från regressionsmodellen med temperatur som förklarande variabel.

Kammare	RF (%)	RF – RF _{skatt} (p.e.)	Diff AF (g/m ³)	Korr. nederbörd ()	Ventilation ()
60011-00 (BTG)	67.5	27.8	6.5	0.69	0.35
45002-00 (ETN)	66.0	40.6	17.9	0.63	0.26
26003-00 (ETN)	39.7	24.2	22.9	0.34	0.31
38357-00 (ETN)	71.1	47.2	22.1	0.09	0.02
60007-00 (BTG)	18.3	-8.1	0.8	0.41	0.85
64012-00 (ETN)	36.4	-6.5	0.3	0.29	0.83

Tabell 5: Felsökning av regression. p.e. står för procentenhet.

Tabell 5 visar sex exempel på kammare med olika förhållanden. De första två är exempel på kammare som påverkas mycket av regn (stor korrelation mellan luftfuktighet och nederbörd) och bör därmed undersökas om locket in till kammaren är otätt och släpper in vatten. Värdena för korrelation med nederbörd är utan tidsförskjutning. Stora värden indikerar därför att luftfuktigheten påverkas snabbt av regn och att det troligtvis rör sig om inläckage från marknivå. De två i mitten av tabellen visar kammare som har stor skillnad i absolut luftfuktighet jämfört med den utomhus, men inte särskilt nämnvärd risk för inläckage från marknivå vid regn. Därmed kan det bero på att vatten kommer in från annat håll som till exempel genom en spricka i kammaren eller anslutande kulvert. Det går även att se att ventilationen inte är i det högre laget för någon av de två kamrarna. Problemet med fukt kan möjligtvis reduceras om ventilationen förbättras. Sett till att båda kamrarna i mitten ligger i eternitkulvert innebär det att ventilationsmättet är mer tillförlitligt än om de hade legat i betongkulvert, med tanke på att det finns en direkt koppling mellan omgivningen utomhus och kammaren. De två sista raderna i Tabell 5 visar två kammare med liten skillnad i absolut luftfuktighet och kan mycket väl bero på att ventilationen är så pass bra. De fyra

första raderna har stor skillnad mellan luftfuktigheten och modellens skattade värde och ger därmed upphov till felsökningen. De två sista raderna har negativ skillnad och har lägre luftfuktighet än vad modellen skattar och får därmed anses vara kammare med förhållanden av det bättre laget. Öresundskraft har som mål att luftfuktighetens medelvärde under längre perioder (inte bestämt ännu vilken längd på perioden men ungefär två månader) inte ska vara över 50 %. Med det målet bör man vara uppmärksam på kammare som har en skillnad mellan verkligt och skattat värde över 13 procentenheter, baserat på regressionsmodellen. Gränsen på 50 % är satt för att ha marginal upp till 60 % då korrosionshastigheten markant ökar.

5.5 Fältbesök

För att illustrera hur det kan se ut i kammare som kan sticka ut då regressionsmodellens skattade värde jämförs med det verkliga, visas några exempel nedan från besök ute i kammare i fjärrvärmenätet.

Figur 35 visar kammare 65003-00 där vatten har läckt in både genom en spricka i kammarväggen (Figur 35a) och från marken genom betäckningen och runnit ned längs väggen (Figur 35b). Golvet var torrt och luften i kammaren var inte särskilt fuktig vid besöket, vilket kan tyda på att det var ett tag sedan det läckte in. Skillnaden mellan verkligt och skattat värde av luftfuktigheten under perioden 13:e december 2021 till 22:e februari 2022 var 20.3 procentenheter, vilket hade uppmärksammats vid regressionsanalysen, med tanke på gränsvärdet på 13 procentenheter.



(a) Spricka i kammarväggen.



(b) Inläckage från betäckningen.

Figur 35: Kammare som är drabbad av inläckage både genom betäckning och kammarvägg.

Figur 36 visar kammare 72004-00 där fukten i luften kondenserar på väg ut från ventilationstornet och rinner tillbaka in igen vid skarven mellan utlopp och kammarvägg.

Tidsserien över luftfuktigheten för denna kammare visas i Figur 19a och ligger ganska konstant på en nivå strax under 70 %. Skillnaden mellan verkligt och skattat värde av luftfuktigheten är 39.4 procentenheter och blir därmed uppmärksammat under felsökningen. Skillnaden i absolut luftfuktighet är 17.8 g/m^3 , medan korrelation med nederbörd samma dag är liten. Det tyder på att det inte rör sig om inläckage från betäckningen, vilket det inte heller rör sig om i det här fallet.



(a) Vatten läcker in genom ventilationsrör.

(b) Vatten på golvet och fuktig betong.

Figur 36: Kammare 72004-00 som med undermålig ventilation inte blir av med fukt.

Figur 37 visar ett sprucket innerlock till en kammare. Kammaren är okänd och därför kan den inte jämföras med data. Det är dock ett potentiellt fall där vatten snabbt kan ta sig in vid regn och visa sig i just luftfuktighetens korrelation med nederbörd. Just att locket är sprucket kan vara en utgångspunkt för att hitta felet som leder till stark påverkan av regn på luftfuktighet.



Figur 37: Trasigt innerlock till kammare

Diskussion

Det antas i arbetet att förhållandena i kulverten är samma som i de anslutande kammarna. Detta antagande behöver givetvis inte alltid stämma. Två exempel kan vara:

- En del av eternitkulvert som är avskild från närliggande kammare med polyuretanstöd eller cellbetongstöd. Om vatten har tagit sig in genom en spricka i kulverten eller en otät skarv kan det därmed lokalt finnas vatten och inte märkas av på mätvärden från SAB från kammarna bredvid.
- Vissa kulvertsträckor utan kammare är relativt långa. Även om det finns ett visst luftflöde därigenom kan det förekomma olika förhållanden längs vägen. Speciellt om det finns en lokal lågpunkt där vatten kan ansamlas.

Förhållandena i dessa fall går inte att ta reda på endast utifrån mätvärdena från kammare. Därmed går det inte utifrån metodiken i detta arbete att försäkra sig om luftfuktigheten och vattenintrång i alla delar av nätet.

Säkerheten i mätvärdena är också värda att nämnas kort. Temperaturgivarna ska ha en noggrannhet på $\pm 0.5^\circ \text{C}$ och fuktsensorerna $\pm 2\%$. Om alla mätvärden verkligen befinner sig inom dessa toleranser är de tillräckligt bra för det större sammanhanget som analyseras. Det finns dock ett fåtal kammare som ofta registrerar värden för relativ luftfuktighet över 100 %, vilket inte är teoretiskt möjligt. Tidsseriernas mönster, hur de förändras över tid, kan fortfarande vara trovärdiga men att nivån är felaktig. Även om det bara är ett fåtal värden som man direkt kan veta är fel kan man inte utesluta att det finns andra givare som visar värden under 100 % som också är fel. Det kan till exempel finnas en givare som visar en tidsserie som fluktuerar kring 60 % relativ luftfuktighet men som i själva verket ligger runt 50 % och därför bör kalibreras ned med tio procentenheter. Fall som dessa går inte att veta om de finns om man inte kontrollmäter med en givare till. Spridningen i dagsvärden för relativ luftfuktighet är också ett hjälpmedel som kan användas för att ta reda på om fuktsensorerna är pålitliga. Figur 25 är ett exempel på en sensor i en kammare som vid flera dagar visar ett enstaka avstickande värde. Ett värde har ingen betydande påverkan på en tidsserie av dygnsmedelvärden men det vittnar ändå om att det kan vara något fel på sensorn.

I många delar av analysen reduceras data ned till medelvärden över längre perioder och medelvärden för flera kammare, eller en korrelationskoefficient. I och med detta finns det alltid en del information som går förlorad vilket man borde vara medveten om. Till exempel luftfuktigheten i kammare 72005-00 i Figur 19a har en stor dipp från 70 % till 30 %. Medelvärdet över perioden är 58 % och säger absolut ingenting om hur luftfuktigheten rör sig från dag till dag eller att luftfuktigheten under en längre tid har legat runt 70 % som är inom riskzonen för att korrosion kan ske. Därför är det viktigt att i samband med de övergripande analyserna också studera detaljerna i tidsserierna för att försäkra sig om att ingen kunskap går förlorad.

6.1 Ventilation

6.1.1 Antagande

Det egenskapade måttet för ventilation som är baserat på korrelationen mellan tidsserier för luftfuktigheten i en kammare och temperaturen utomhus bygger på antagandet, som nämnt i avsnitt 4.1.3, att temperaturen i kammaren är konstant. För de fall som studerades lite närmare kunde det konstateras att svängningarna i temperatur var i de allra flesta fall försumbara i sammanhanget. Det går dock inte att utesluta att det finns andra kammare som har kraftigare svängningar där temperaturen inte längre är konstant. Det kan ske till exempel i kammare med relativt låga temperaturer och bra ventilation, där värmekällan (fjärrvärmevattnet) inte helt kan motverka förändringarna i temperatur till följd av luften som kommer in genom ventilationen. Ett annat fall kan vara vid avstängning av en viss del av nätet, då kommer värmekällan att försvinna i de berörda delarna och temperaturen drastiskt ändras.

6.1.2 Nackdelar med måttet

Det finns en gråzon när ventilationsmåttet är svårtytt. Gråzonen är för de kammare som har en korrelation mindre än cirka 0.3. De är svåra att jämföra ur ett ventilationsperspektiv. Även om en kammare har en korrelationskoefficient på 0.2 och en annan har ett värde på -0.2 dras ingen slutsats om att ventilationen är bättre i den föregående kammaren. Det beror på att det alltid finns en viss slump i hur variablerna förändras, som kan medföra en svag korrelation mellan de två. Ytterligare en nackdel med det här måttet på ventilation är att luftfuktigheten kan påverkas av annat än temperaturen utomhus. Till exempel om en kammare läcker in vatten genom betäckningen vid kraftigt regn kommer det synas i trenden för luftfuktighet och därmed göra att korrelationen mellan dessa blir något högre. I sin tur kommer korrelationen med utomhustemperaturen bli mindre. Det behöver inte nödvändigtvis innebära att den verkliga ventilationen, mätt i luftflöde, är sämre än för en kammare som inte har problem med inläckage av vatten. Det finns en tredje nackdel som är specifik för betongkulvert och i viss mån för eternitkulvert med metallstöd, alltså kulvert som tillåter genomströmning av luft. För en kulvertsträcka med ett visst antal kammare samt **en** kammare där luften tar sig in via ventilationen kommer korrelationen mellan utomhustemperaturen och luftfuktigheten vara som störst för den kammare där luften tar sig in för att sedan sjunka längs med luftflödets riktning i kulverten. Det beror på att lufttemperaturen kommer att jämnas ut längs vägen och därmed kommer också fukten i luften att uppnå en jämnare nivå. Därför är det rimligt att anta att korrelationen kommer att minska. På samma sätt som den andra nackdelen innebär det inte att den verkliga ventilationen nödvändigtvis är sämre för att korrelationen är mindre. Denna nackdel går dock att vända till en fördel genom att utnyttja den för att upptäcka skorstenseffekten i öppna kulvertar, som i Figur 30. I nuläget är det dock inte helt problemfritt att undersöka luftflödet och skorstenseffekten i betongkulverten med den valda metoden på grund av främst två anledningar. Det är inte alla kammare som är utrustade med en SAB och därför försvinner en del viktig information om ventilationen från dessa som gör att det blir svårt att upptäcka mönstret i Figur 30. Men eftersom målet är att varje kammare ska installeras med en SAB kommer det bli enklare i framtiden att studera detta. Den andra anledningen är att det behöver vara en viss höjdskillnad längs sträckan för att

skorstenseffekten ska manifesteras. När det bara är ett fåtal decimeters höjdskillnad mellan kammare, som det är i vissa fall, är det svårt att urskilja temperaturökning med höjden och minskning av korrelation mellan luftfuktighet och utomhustemperatur eftersom det alltid kan finnas en viss slump i korrelationen som ställer till det.

6.1.3 Varierande ventilation

I avsnitt 5.3 förs resonemanget att ventilationen kan variera under perioder med olika vindförhållanden baserat på information i Tabell 3 och vinddata från SMHI i Figur 29. Exakt vad det beror på har inte studerats närmare, om det framförallt är högre vindhastigheter i den tidigare perioden som påverkar utfallet eller om det är färre vindstilla timmar eller vindriktningen. Alla ventilationstorn står placerade i väst-östlig riktning såvida det inte finns något hinder i vägen. Sett till resultaten i Figur 29 är det en okej riktning men att en sydväst-nordöstlig riktning är ännu bättre. För att ta reda på vilken vindriktning som är mest frekvent behöver dock data från åtminstone ett helt år användas. Framförallt T-rör bör placeras i den vanligaste vindriktningen, men eftersom den kan skilja sig åt beroende på tid på året bör tornen kanske placeras i den vanligaste riktningen vid den perioden på året då ventilation behövs som mest. När ventilation behövs som mest är inte helt enkelt att besvara men en bra gissning är då det brukar regna som mest eftersom det är då vatten utifrån tar sig in lättast i systemet och behöver ventileras bort.

6.1.4 Luftflöde genom kulvert

Korrelationerna för luftfuktighet mellan grannkammare behöver inte nödvändigtvis innebära att det finns ett luftflöde mellan dem om värdet är stort. Det finns vissa fall i eternitkulvert där luftflödet mellan kammare borde vara icke-existerande men korrelationen är relativt stor. I dessa fall beror det oftast på att båda kammare har bra inflöde av luft genom ventilationstornen och influeras därför av luften utomhus, som i Figur 20a. Om båda kammare har stark korrelation med temperaturen utomhus kommer de även att korrelera med varandra till en viss grad, även om det inte finns ett luftflöde däremellan. Som det beskrivs i avsnitt 3.6.1 finns det alltså en bakomliggande variabel som medför korrelation mellan två andra variabler. Med det sagt är dessa fall relativt få och värdena som presenteras i Tabell 2 borde vara representativa för hur pass bra luftutbytet är i de olika kulverttyperna. Det viktiga som bör tas med från den delen av analysen är att luftflödet genom eternitkulvert med metallstöd är mindre än vad på förhand trott. Dock är det bara ett urval på nitton kammare i eternitkulvert med metallstöd där luftflödet genom kulverten har studerats, varav ett fall påvisade att det fanns (Figur 21). Det kan dock finnas fler fall som inte har analyserats som också skulle påvisa detta. På förhand var hypotesen att trenderna för luftfuktigheten skulle vara mer samvarierande mellan grannkammare, som för i betongkulvert. En anledning till att det inte är så kan vara att isoleringen har blivit blöt på vissa sträckor efter att vatten har tagit sig in i kulverten och gjort så att isoleringen har fallit av från medieröret och delvis täppt igen kulverten och försämrat flödet av luft därigenom [48].

I många fall är dock kovariansen mellan grannkammares luftfuktighet ett bättre mått på ventilationen än korrelation med utomhustemperatur. Till exempel så visar Figur 18a

att trenderna för luftfuktighet i princip är samma vilket tyder på bra genomströmning av luft, medan korrelationen med utomhustemperatur för alla tre ligger runt 0.32 som med det måttet indikerar att ventilationen inte skulle vara särskilt bra. Problemet är att det bara är applicerbart på öppen kulvert och går därför inte att använda i majoriteten av fjärrvärmenätet. Det visade sig också vara problematiskt att beräkna måttet för alla kammare, främst på grund av att det inte fanns mätvärden för alla dagar som ledde till att det blev mycket manuellt och tidskrävande arbete att utföra beräkningarna.

Det är oklart hur pass bra ventilationen är i själva kulverten i de delar av nätet med stöd som täpper igen luftflödet. Kammare i anslutning kan ha bra ventilation, som resultatet visar i många fall, om de har två ventilationstorn som är installerade på rätt sätt, och framförallt om de skapar förutsättning för korsdrag. Det betyder inte tvunget att det skapas ett flöde inne i kulverten. Det kan vara så att luften endast cirkulerar i kamrarna.

Det bör inses att det är för komplext att analysera luftens rörelsemönster genom betongkulvert endast med statistiska metoder för att använda korrelation som ett mått på ventilation. De allra flesta kammare har åtminstone ett ventilationstorn i anslutning. Hur luften rör sig in och ut genom dessa torn och samspelar med det större luftflödet genom kulverten går inte med träffsäkerhet att komma fram till bara med den givna datan. Vill man verkligen veta hur väl ventilationen fungerar behöver man i så fall mäta luftflödet in och ut genom kulvert och ventilationstorn.

6.2 Regressionsmodell för felsökning

En regressionsanalys kan ha olika syften. En avsikt kan vara att skapa en förklarande modell som är representativ för en större datamängd och som kan prediktera en variabel så bra som möjligt. Syftet i den här analysen skiljer sig lite från det. Istället för att skapa en modell som förklarar hela den tillgängliga datamängden (luftfuktigheten i alla kammare) på ett bra sätt så är intentionen att förklara en del av mängden, den som anses beskriva förhållanden i kammare som är bra och värda att sträva efter. På så sätt erhålls en modell som kan peka ut de kammare som inte förhåller sig till de eftersträlvade förhållandena, genom att beräkna skillnaden mellan de verkliga värdena och skattade värdena och sedan felsöka med tillgängliga verktyg.

Regressionsanalysen som skapades med både temperatur och ventilation som förklarande variabler försökte anpassas så bra som möjligt till den givna datan för att uppnå ett stort R^2 -värde och litet S -värde. Det resulterade i att utfallet inte blev särskilt bra. Detta är eftersom ventilationsmättet inte förklarar ventilationen lika bra för alla kammare och att modellen då behövde skapas utifrån data från de kammare som kan förklaras med måttet. Då försvann en stor del av kamrarna i betongkulverten och även en del i eternitkulvert som inte förklaras bra av olika anledningar. Eftersom tanken med regressionen är att använda residualerna till felsökning blir det missvisande i många fall för de som inte förhåller sig till ventilationsmättet. Med det sagt är inte måttet helt oanvändbart. Det ska faktiskt påpekas att korrelationen mellan ventilationsmättet och luftfuktighet var -0.6 för de utvalda kamrarna i eternitkulverten (Ekvation 12). För kammare i anslutning till eternitkulvert kan det användas i syfte av felsökning tillsammans med korrelation med nederbörd samt skillnad

i absolut luftfuktighet. För betongkulvert kan det användas för att identifiera de kammare där luften tar sig in. Dessa kammare kan agera som utgångspunkt om man vill förbättra ventilationen. Har man en bra uppfattning om var luften tar sig in så kan man utnyttja det för att experimentera med att förbättra inflödet där och ta bort eller stänga igen överflödiga ventilationstorn längs kulverten som kan störa luftflödet.

Regression med endast temperatur som förklarande variabel anses i slutändan vara det bättre alternativet. Varför förklaras nedan i punktlistan med nackdelarna med att använda ventilationsmättet som en förklarande variabel.

- Mättet är inte lika applicerbart på alla kammare, framförallt för många kammare i betongkulvert och möjligtvis en del kammare i eternitkulvert med metallstöd. Det fungerar bäst om det finns ett direkt luftutbyte genom ventilationstornen, vilket det *bör* finnas i stängd kulvert. Om mättet ska användas i en regression som en förklarande variabel till luftfuktigheten borde den förklaras lika bra för alla kammare, annars blir resultatet missvisande. Används mättet som förklarande variabel kommer många kammare i öppen kulvert framstå som att de har dålig ventilation, eftersom sambandet mellan temperaturen utomhus och luftfuktigheten reduceras längs med luftflödet i kulverten. I själva verket kan de ha fullgod ventilation i och med just luftflödet genom kulverten.
- Urvalet av kammare som används för att skapa modellen resulterar i att luftfuktigheten förklaras olika mycket av temperatur och ventilation för betong- respektive eternitkulvert. Det leder till att det blir bättre att skapa två separata modeller istället för en gemensam, vilket innebär att det kommer bli en större arbetsbörda för Öresundskraft att återskapa modellen. Dels för att det är två regressioner som behöver skapas men också för att det krävs att mer tid läggs på att göra urvalet av kammare som modellen ska baseras på.
- Som visat i Tabell 3 skiljer sig mättet åt för ventilation under olika perioder. I förlängningen innebär det att funktionen som regressionen genererar ser olika ut för olika perioder. Därför fungerar inte en funktion skapad med data från en period till att förklara data på ett bra sätt för andra perioder med andra vindförhållanden.

6.2.1 Felsökning

Tre verktyg har använts vid felsökning: skillnad i absolut luftfuktighet mellan kammare och utomhus, korrelation mellan luftfuktighet i kammare och nederbörd, och ventilation. Relativ luftfuktighet som är responsvariabeln, och som ska undersökas i felsökningen, beror på temperatur och absolut luftfuktighet. Temperatur har redan tagits hänsyn till i regressionen, så det är absolut luftfuktighet som är den variabel som står för den resterande variationen i responsvariabeln. Med den utgångspunkten kan man se det som att korrelation med regn och ventilation i sin tur förklarar nivån av absolut luftfuktighet. Om det är absolut luftfuktighet i kammare eller skillnad mellan kammare och utomhus som används för att förklara variationen i skillnaden mellan verkligt och skattat värde av relativ luftfuktighet

spelar ingen roll eftersom det bara är en konstant som skiljer dem åt.

Absolut luftfuktighet utomhus kan möjligtvis skilja sig åt lite på olika platser i Helsingborg, beroende på lokala temperaturskillnader samt närhet till vattenkälla som kan mata på med fukt till luften. Därför blir det inte helt korrekt att jämföra fuktigheten i alla kammare med värden från en väderstation i Helsingborg genom att beräkna skillnaden. Till exempel kan det tänkas att temperaturen kan vara något mindre i närheten av havet än vad den är centralt i staden. I slutändan anses skillnaderna vara tillräckligt små för att skillnad i absolut luftfuktighet ska fungera som en indikator för kammare som har problem med vattenintrång.

Tidsserierna för luftfuktigheten i kammare 72004-00 (Figur 19a) och kammare 59005-00 (Figur 20a) är båda rätt jämna och ligger på höga nivåer relativt andra tidsserier. Just detta samband går att identifiera i ett fåtal kammare. En rimlig förklaring är att fukten inte bara finns i luften utan den har satt sig i strukturen också. Då kommer luften i kammaren att konstant matas på med fukt från strukturen och befinna sig på en jämnhögt nivå tills allt har ventilerats ut. Båda dessa kammare skulle sticka ut i en regression med felsökning eftersom skillnaden i absolut luftfuktighet är 18.3 respektive 21.0, vilka ligger i topp 3 % av de kammare med högst skillnad.

Vid användning av korrelation mellan luftfuktighet och nederbörd som ett verktyg för felsökning fungerar det bäst om man har hämtat data för en något mer regnintensiv period eftersom det givetvis inte går att urskilja påverkan från nederbörd om det inte har regnat.

6.2.2 Utvärdering av regression

Som nämndes i avsnitt 4.4 användes endast ett mätvärde per dag för luftfuktighet respektive temperatur. Det är möjligt att resultaten av analysen hade blivit något mer precisa om alla tillgängliga data hade använts och skapat medelvärden av dessa, som i analyserna för enskilda kammare och serier av kammare. Dock hade det tagit allt för lång tid för att vara ett genomförbart alternativ eftersom det hade resulterat i ungefär åtta miljoner rader i Excel (beroende på hur lång perioden är som undersöks). I slutändan anses resultatet hålla den nödvändiga kvalitén oavsett eftersom det fortfarande går att hitta tydliga samband mellan luftfuktighet och yttre faktorer som temperatur utomhus och nederbörd.

6.3 Övriga observationer från analysen

Det visade sig att kammare i betongkylvert överlag har högre lufttemperatur än de i eternitkylvert, som i sin tur bidrar till att luftfuktigheten också generellt sett är lägre. Det är troligtvis en konsekvens av de högre värmeförlusterna i betongkylverten. Även om värmeförluster inte är önskade på grund av ekonomiska och miljömässiga skäl, så leder förlusterna till lägre luftfuktighet och minskad risk för korrosion föranlett av hög luftfuktighet.

Under analysen var det emellanåt problem med att det inte fanns data från vissa kammare på grund av att SAB var inaktiva. Detta orsakade att potentiellt värdefull information gick

förlorad. När data analyserades för de 81 utvalda kammarna i olika serier var det en del kammare som helt saknade data för vissa dagar. För att minimera risken med förlorad data krävs det att spänningen som de termoelektriska generatorerna genererar kan hållas över 3.65 V samt att batterierna inte dräneras på laddning för snabbt. Om det finns ett mönster för var inaktiva SAB är placerade har inte studerats i arbetet men skulle vara intressant att ta reda på. Eftersom större spänning genereras av större skillnad i temperatur borde rimligtvis de kammare som har lägst temperaturskillnad vara mest utsatta för inaktivitet. Värmeförlusterna är generellt sett större i betongkulverten som nämnt i avsnitt 3.1 och som även medelvärdet av lufttemperaturen indikerar i avsnitt 5.1. Lufttemperaturen borde därmed rimligtvis vara närmare framledningstemperaturen och resultera i lägre spänning. För att inte tömma batterierna för snabbt bör man reducera antalet tillfällen som mätvärden hämtas. I nuläget är det var sjätte minut vilket det, åtminstone i det här arbetet, inte finns någon anledning till att det är så ofta. En gång i timmen hade varit ett rimligare intervall att sätta. Dock är det uppkopplingen mot databasen som är det mest energikrävande, och inte mätningen. Därför hade man även kunnat reducera antalet gånger uppkopplingen sker till färre än fem gånger per dag.

Målet för Öresundskraft med arbetet är att hjälpa dem att förbättra sin statusbedömning av fjärrvärmenätet. Även om luftfuktigheten är central i den frågan så berättar den inte allt. Korrekta mätningar av vattennivån i kammare hade också behövts för att särskilja flytande vatten från fukt i systemet. Finns det vatten i en kammare kan det mycket möjligt finnas vatten i en större del av den anslutande kulverten och därmed risk för delvis dränkta medierör eller åtminstone blöt isolering. Skulle det här uppstå är det svårt i dagsläget att urskilja med regression och felsökning att det verkligen finns vatten i systemet, och inte att det endast är mycket fukt i luften eller strukturen.

Som nämns i avsnitt 3.3 och visas i Figur 9 så utgör kostnaderna för korrosionsskador majoriteten av kostnaderna för reparationer av totala skador. Även om korrosion inte utgör majoriteten av skadorna så leder de till störst kostnader. Det är med andra ord en viktig del i det förebyggande underhållet att ha kunskap att kunna förutse skador av denna typ innan de sker. På så sätt kan man inom företaget spara mycket pengar avsett till underhållskostnader, samt ytterligare förbättra leveranssäkerheten, arbetsmiljö och goodwill. Resultatet av det här arbetet är tänkt att ge ett bidrag till Öresundskrafts beslutsstödssystem, som förhoppningsvis kan leda till att de delar av fjärrvärmenätet som är i riskzonen för korrosionsangrepp kan upptäckas i tid och åtgärdas innan skador har skett.

Teorin pekar ut att ledningar under tättrafikerade vägar och framförallt de som saltas i vintertid har stor andel korrosionsskador av de totala antalet. Lyckligtvis är det inget som Öresundskraft har märkt av i sin statistik. Figur 10 visar att en tredjedel av skador i våt mark är korrosionsrelaterade. Resultatet av arbetet pekar också på att det är ledningar i våt mark som ligger i riskzonen för korrosion, som de i serierna BTG1 och BTG2.

6.4 Framtida studier

Initialt var tanken med arbetet att mätningarna av medierörens hållfasthetstjocklek skulle utgöra utgångspunkten för arbetet, vartill allt annat arbete skulle relateras i slutändan.

Under tidsperioden som det här arbetet har utförts har det tyvärr funnit allt för lite data från tjockleksmätning och från en för kort period. Det intressanta hade varit att kunna studera trendkurvor för tjockleken över flera år. Jämn korrosion av medierör är en väldigt långsam process i förhållande till de förändringar som skulle vara möjliga att utläsa från den tillgängliga datan. Därmed fanns det inte tillräckligt med underlag för att kunna dra slutsatser om förändrad tjocklek på grund av korrosion till de andra mätvärdena. Längre fram i tiden när mer data har samlats in, både i tid och fler mätställen, skulle det vara lämpligt att studera det som var den initiala tanken med det här arbetet.

Även om en fördjupad analys av tjockleksmätningen inte kan göras nu så innebär det inte att mätningen är onödig. Med metoden går det att upptäcka rör som har degraderad tjocklek till följd av äldre korrosionsangrepp och kan därför vara till grund för beslut om förnyelse eller reparation. Vidare, om det till exempel skulle visa sig att flera mätningar på en längre sträcka ger utslag på försämrade tjocklek, medan samma typ av ledning på annan plats som är konstruerad samtidigt har liten till oförändrad tjocklek, kan det vara en indikation på undermåliga förhållanden i form av dålig ventilation och dränering eller inläckage av vatten.

Det har flera gånger diskuterats om vad som kan vara intressant att undersöka i fortsättningsstudier. Begrepp som har nämnts är maskininlärning och klustring av data. Maskininlärning kan vara ett kraftfullt verktyg för att bygga vidare på metodiken och resultaten från det här arbetet. Analysen har byggt på manuellt datorarbete och förenklingar av den givna datan. Om alla data för varje tidpunkt används, istället för medelvärden, och matas in i ett maskininlärningsprogram går det säkerligen att få ut mer ögonöppnande information, och på ett sätt som sparar mycket arbetstid. Med utgångspunkten i att ta reda på vad som påverkar luftfuktigheten kan samma data användas som i den här analysen, alltså luftfuktighet och temperatur i kammare och utomhus, samt nederbörd, vindhastighet och riktning och vattennivå i kammare (om värdena stämmer). Indatan kan också utökas till att inkludera statistiska data som typ av kulvert, antal, typ och riktning på ventilationstorn, höjd på kammare samt markförhållanden. Verkligt luftflöde i ventilationstorn och kulvert mätt i till exempel m^3/h skulle också vara intressant att ha med som indata. Det kommer dock krävas en större arbetsinsats för att få fram sådana resultat, och kanske inte är värt arbetet sett till ändamålet. Det skulle vara väldigt intressant att se vilka resultat som en maskininlärningsprocess med den ovan nämnda datan skulle ge. Det går säkert att få fram en förfinad bild av vad som påverkar luftfuktigheten på kortare sikt, till skillnad från regressionen i det här arbetet som är lite trubbig i det avseendet. Vidare, bör data från hela året studeras. I det här arbetet är det data från slutet av hösten till början av våren som har analyserats, och påverkande faktorer till luftfuktigheten kan säkert se annorlunda ut under sommar och höst, som till exempel vindförhållanden. Även om detta arbetets resultat kan vara tillräckliga för Öresundskraft i deras mål att motverka korrosionsskador kan vidare studier vara spännande för branschen i stort och för akademien.

6.5 Användningsområde

Användning av resultatet är främst avsett för Öresundskraft. Därmed bör försiktighet vidtas vid användning av arbetets resultat och slutsatser utanför Öresundskrafts gränser och de

studerade systemen däri. Eftersom fjärrvärmenätens uppbyggnad och förhållanden kan skilja sig åt stort mellan olika platser bör man försäkra sig om att likheterna är tillräckligt stora för att applicera resultaten på andra fjärrvärmenät.

Vissa delresultat är mer generella än andra och går att utnyttja hos andra fjärrvärmebolag, men en förutsättning är att det är kulvertsystem som resultaten är tillämpliga på. Vikten av att ha bra ventilation i nätet är välkänt sen tidigare men har poängterats i analysen, med data som backar upp det. Vill man föra samma strategi som Öresundskraft och behålla sitt anläggningskapital så länge som möjligt är det därför en bra idé att se över ventilationen. Man kan försöka skapa luftflöde genom öppna kulvertar antingen med skorstenseffekt eller mekaniskt, och utnyttja korsdrag i stängda kulvertar. En relativt enkel arbetsuppgift är att kontrollera alla betäckningar och innerlock för att försäkra sig om att de är täta. Många kammare i Öresundskrafts nät visar ju tydlig inverkan på luftfuktigheten av nederbörd och det bör rimligtvis vara likadant i andra fjärrvärmenät.

Användning av mätdata från fjärrvärmenätet är på framgång och det finns andra bolag som också har börjat använda sig av SAB i deras nät. Dessa bolag kan använda sig av metodiken med regression och felsökning med sin egen data. Regressionen med temperatur som förklarande variabel ska kunna appliceras direkt utan justering.

Med tanke på Öresundskrafts intresse för området digitalisering av fjärrvärmenät samt deras projektdeltaganden som nämndes i 2.1 är det möjligt att det här arbetet också kan få större spridning, både i Sverige och utomlands. Konceptet att implementera digitala metoder för statusbedömning och kapitalförvaltning må vara ny mark för branschen och det krävs givetvis fortsättningsstudier för att nå den fulla potentialen av det. Resultaten och metodiken i det här arbetet har dock rört vid den första och andra punkten av målen för projektet BSAM (avsnitt 2.2) och förhoppningsvis kan de övriga involverade parterna i projektet ta till sig insikterna och fortsätta att utforska området.

Slutsats

Luftfuktigheten och närvaro av vatten i kulvertsystem och anliggande kammare är två viktiga parametrar att ha koll på och kontrollera för att undvika korrosionsskador. Analysen har främst fokuserat på luftfuktigheten men vissa slutsatser kan även göras om vattenintrång.

Kulverten kan delas in i betong och eternit. Eternitkulvert kan i sin tur kategoriseras efter vilket typ av röstöd som används, polyuretan-, cellbetong- eller metallstöd. Den i sammanhanget stora skillnaden mellan de olika typerna är att betong- och eternitkulvert med metallstöd är öppen, vilket tillåter luft att flöda igenom kulverten. Polyuretan- och cellbetongstöd täpper å andra sidan igen kulverten och medför att kamrarna längs vägen skiljs av från varandra. Resultaten visar tydligt att kammare på samma sträcka i betongkulvert har mycket liknande förändring av luftfuktigheten över tid, samt att det finns en viss tröghet i förändringarna som reducerar dagliga fluktuationer. Det bör vara till följd av luftflödet genom kulverten som sprider ut fukten i systemet, och motverkar snabba lokala förändringar i luftfuktigheten. För de studerade kamrarna i eternitkulvert med metallstöd beter sig inte luftfuktigheten som för dem i betongkulvert. Även om konstruktionen bör tillåta luftflöde, visar inte resultaten att tidsserierna är liknande för grannkammare. Dagliga snabba förändringar i luftfuktigheten är också tydligare i dessa fall. Vad det beror på går inte helt säkert att säga utan att undersöka kulverten på plats. Luftfuktigheten i eternitkulvert med polyuretan- och cellbetongstöd beter sig som på förhand trots. Det bör inte finnas en direkt koppling mellan kammare bredvid varandra och det syns i tidsserierna för de studerade kamrarna.

Relativ luftfuktighet beror endast på temperatur och absolut luftfuktighet. Temperaturen är mer eller mindre konstant för individuella kammare och är den störst påverkande faktorn till nivån av den relativa luftfuktigheten. Absolut luftfuktighet bör snarare ses som en variabel som påverkar fluktuationer i relativ luftfuktighet i systemet. Två faktorer som i förlängningen kan påverka den absoluta luftfuktigheten är temperaturen utomhus och nederbörd. En del kammare indikerar förhöjda nivåer av luftfuktighet vid kraftigt regn, och därmed möjligt inläckage av vatten. Tidsförskjutningen i korrelationen mellan luftfuktighet och nederbörd indikerar hur snabbt vatten tar sig in och i förlängningen på vilket sätt. Ingen till kort tidsförskjutning kan antyda att regnvatten tränger sig in genom betäckningen och innerlocket medan längre förskjutning kan innebära att det tar sig in genom strukturen från fuktig mark. Luftfuktighet som följer förändringarna i temperaturen utomhus har oftast goda förhållanden och kan anses vara en indikation på bra ventilation. Luftfuktigheten i en stor mängd kammare följer nästan enbart förändringarna i utomhustemperaturen. Det här är för det mesta sant för stängda kulvertsträckor där luft inte kan passera genom kulverten. Luftflöde genom öppen kulvert kan inte relateras särskilt bra till temperatur utomhus men kan istället identifieras med hur pass överensstämmande svängningarna i luftfuktigheten är för kammare i serie.

En regressionsmodell har utvecklats som Öresundskraft kan använda sig av för att använda mätdatan de samlar in till att utvärdera luftfuktigheten i fjärrvärmenätet.

Regressionen har skapats med periodmedelvärde av relativ luftfuktighet som responsvariabel och periodmedelvärde av temperatur som förklarande variabel. Skillnaden mellan verkligt värde och modellens skattade värde ger en indikation på om luftfuktigheten ligger på en rimlig nivå eller inte och om det därmed finns risk för att korrosionsangrepp kan ske. Stora skillnader bör uppmärksammas och utvärderas med felsökningsmetoder som luftfuktighetens korrelation med temperatur utomhus och nederbörd samt skillnad i absolut luftfuktighet mellan kammare och utomhus. Dessa tre verktyg kan användas för att få en uppfattning om vad som föranleder förhöjda nivåer av luftfuktighet, om det är bristande ventilation, inläckage av vatten eller en kombination av de två.

Resultaten från analysen har skapat en transparens i vad som påverkar luftfuktigheten och hur den beter sig över tid. Arbetsmetodiken som har tagits fram är ett första steg för Öresundskraft att utnyttja mätdata och har skapat en grund för deras beslutsstödssystem. Metodiken anses kunna peka ut delar av nätet som befinner sig i farozonen för korrosionsskador och den kan med enkelhet utföras av Öresundskraft och andra fjärrvärmebolag som använder sig av mätdata. Det finns aspekter som det inte fanns tid till att undersöka i arbetet men som är intressanta att studera vidare för att ge Öresundskraft ett bättre underlag till beslutsfattande. Framtida studier bör därför utföras som bygger vidare på insikterna från det här arbetet, där maskininlärning kan vara ett rimligt nästa steg att ta.

Referenser

- [1] R. Khodayari. ”Tillförd Energi”. (2021), URL: <https://www.energiforetagen.se/statistik/fjarrvarmestatistik/tillford-energi/> (hämtad 27 jan. 2022).
- [2] A. Johannesson. ”Färdplan uppvärmning – nyckeln till klimatmålen”. (25 mars 2022), URL: <https://www.energiforetagen.se/fardplan-energi/fossilfri-uppvarmning--nyckeln-till-klimatmalen/> (hämtad 31 maj 2022).
- [3] M. Henriksen och S. Probert, ”Framtida risker och sårbarheter för fjärrvärmenät”, Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lund, mars 2021.
- [4] Svensk Fjärrvärme, *Underhållshandboken för Fjärrvärmedistribution*. Svensk Fjärrvärme AB, 2015, ISBN: 978-91-85775-29-3.
- [5] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund och B. V. Mathiesen, ”4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems”, *Energy*, årg. 68, s. 1–11, 2014, ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002369>.
- [6] J. Sörensen och O. Penttinen, ”Utvärdering av icke-förstörande mätmetoder för lokalisering av skador på rörledningar i mark – rapportering av projektet Pipe Status”, 2019. URL: <https://www.swedenwaterresearch.se/projekt/pipestatus-2/>.
- [7] K. Sernhed, E. Ekdahl och P. Skoglund, *Statusbedömning av Betongkulvert*. Svensk Fjärrvärme AB, 2012, ISBN: 978-91-7381-090-6.
- [8] J. Wickström. ”Ljudvågor avslöjar rostiga rörsystem”. (16 okt. 2019), URL: <https://www.energi.se/artiklar/ljudvagor-avslojar-rostiga-rorsystem/> (hämtad 3 juni 2022).
- [9] K. Davidsson och S. Månsson, ”Automatic Identification of Poorly Performing Substations and Meter Devices – The Future of District Heating Analysis”, Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2016.
- [10] Vinnova, ”UDI – Pipe Status – Slutrapportering Steg 2 Samverkansprojekt”, 2019. URL: <https://www.swedenwaterresearch.se/projekt/pipestatus-2/> (hämtad 2 juni 2022).
- [11] Öresundskraft. ”Snabba fakta om Öresundskraft”. (u. å.), URL: <https://www.oresundskraft.se/om-oss/snabba-fakta/> (hämtad 27 jan. 2022).
- [12] —, ”Vad är fjärrvärme?” (U. å.), URL: <https://www.oresundskraft.se/villa/fjarrvarme/vad-ar-fjarrvarme/> (hämtad 13 febr. 2022).
- [13] Europeiska kommissionen. ”2020 climate & energy package”. (u. å.), URL: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2020-climate-energy-package_en (hämtad 10 maj 2022).
- [14] A. Runesson. ”Project: Baltic Smart Asset Management (BSAM)”. (15 mars 2022), URL: <https://lnu.se/en/research/searchresearch/research-projects/project-baltic-smart-asset-management-bsam/> (hämtad 10 maj 2022).
- [15] A. Khalifeh och B. Ofir, ”Modell för reinvesteringsplanering”, Examensarbete, Högskolan i Halmstad, Halmstad, 2013.

- [16] K. Sernhed, M. Jönsson och M. Olsson, *Riskhantering för underhåll av fjärrvärmenät*. Energiforsk AB, 2015, ISBN: 978-91-7673-185-7.
- [17] A. Malm, S. Mokhlesi, K. Sernhed och N. Yarahmadi, ”Kartläggning av materialfördelning och skadestatistik av vatten- och fjärrvärmeledningar i Sverige som underlag till rekommendationer för datainsamling”, 2016. URL: <https://www.swedenwaterresearch.se/wp-content/uploads/2019/05/Litteraturstudierapport-slutversion.pdf>.
- [18] M. Ohlsson, Öresundskraft AB, Personlig kommunikation, Mejl: magnus.ohlsson@oresundskraft.se, 10 febr. 2022.
- [19] N. Jolsäter och O. Lindell, ”Modell för reinvesteringsplanering”, Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, Campus Helsingborg, Helsingborg, 2011.
- [20] J. Spangler. ”How Bad Can Excess Moisture Be?” (U.å.), URL: <https://www.concretemoisture.com/contractors/bad-excess-moisture-be/> (hämtad 14 mars 2022).
- [21] East Riding Laboratories Ltd. ”Water Absorption”. (u.å.), URL: <https://eastridinglabs.co.uk/water-absorption/#:~:text=The%20Control%20of%20Asbestos%20Regulations,than%2030%25%20water%20by%20weight.> (hämtad 14 mars 2022).
- [22] Arne Jensen AB. ”Smart Active Box”. (u.å.), URL: <https://www.smartactivebox.com/> (hämtad 5 febr. 2022).
- [23] M. Ohlsson, ”Smart Aktiv Box - Smart Asset Management”, Opublicerat dokument, u.å.
- [24] Arne Jensen AB, ”SAB”, PowerPoint, Opublicerad presentation, 2017.
- [25] —, ”Delta-t[®] – Statuskontroll av fjärrvärmeledningar”. (u.å.), URL: <https://www.arnejensen.se/delta-t/> (hämtad 4 maj 2022).
- [26] P. Persaud, Arne Jensen AB, Personlig kommunikation, Mejl: paavo@jensenab.se, 26 jan. 2022.
- [27] Wikipedia. ”Korrosion — Wikipedia”. (2021), URL: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Korrosion> (hämtad 7 febr. 2022).
- [28] Munters. ”Korrosion”. (u.å.), URL: <https://www.munters.com/sv/we-can-help-you-with/corrosion/> (hämtad 7 febr. 2022).
- [29] G. Sund, ”Utvändig Korrosion på Fjärrvärmerör”, 2002. URL: <https://www.yumpu.com/sv/document/read/20484181/utvandig-korrosion-pa-fjarrvarmeror-svensk-fjarrvarme>.
- [30] Vaisala Oyj, ”Humidity Conversion Formulas”, 2013.
- [31] Wikipedia contributors. ”Stack effect — Wikipedia”. (2022), URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Stack_effect (hämtad 18 april 2022).
- [32] CPP. ”Get to know a flow feature: The stack effect”. (u.å.), URL: <https://cppwind.com/get-to-know-a-flow-feature-the-stack-effect/> (hämtad 18 april 2022).
- [33] JMP. ”Correlation”. (u.å.), URL: https://www.jmp.com/en_ca/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation.html#404f1893-ae56-43ed-b84c-f6c99f313eca (hämtad 14 april 2022).

- [34] S. Glen. "Correlation Coefficient: Simple Definition, Formula, Easy Steps". (u.å.), URL: https://www.jmp.com/en_ca/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation.html#404f1893-ae56-43ed-b84c-f6c99f313eca (hämtad 14 april 2022).
- [35] Wikipedia contributors. "Correlation — Wikipedia". (2022), URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Correlation> (hämtad 14 april 2022).
- [36] A. Madhavan. "Correlation vs Causation: Understand the Difference for Your Product". (u.å.), URL: <https://amplitude.com/blog/causation-correlation#:~:text=correlation%20and%20causation%3F-,While%20causation%20and%20correlation%20can%20exist%20at%20the%20same%20time,correlation%20is%20simply%20a%20relationship.> (hämtad 2 juni 2022).
- [37] Wikipedia contributors. "Regression analysis — Wikipedia". (2022), URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis (hämtad 14 april 2022).
- [38] J. Frost. "Standard Error of the Regression vs. R-squared". (u.å.), URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/standard-error-regression-vs-r-squared/> (hämtad 15 april 2022).
- [39] —, "How To Interpret R-squared in Regression Analysis". (u.å.), URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/interpret-r-squared-regression/> (hämtad 15 april 2022).
- [40] Wikipedia contributors. "Coefficient of determination — Wikipedia". (2022), URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination (hämtad 15 april 2022).
- [41] Zach. "Understanding the Standard Error of the Regression". (2019), URL: <https://www.statology.org/standard-error-regression/> (hämtad 15 april 2022).
- [42] Qualtrics. "Interpreting Residual Plots to Improve Your Regression". (u.å.), URL: <https://www.qualtrics.com/support/stats-iq/analyses/regression-guides/interpreting-residual-plots-improve-regression/#ObservationsPredictionsResiduals> (hämtad 15 april 2022).
- [43] S. Glen. "Regression Analysis: Step by Step Articles, Videos, Simple Definitions". (u.å.), URL: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/regression-analysis/> (hämtad 15 april 2022).
- [44] J. Frost. "Multicollinearity in Regression Analysis: Problems, Detection, and Solutions". (u.å.), URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/multicollinearity-in-regression-analysis/#:~:text=Multicollinearity%20occurs%20when%20independent%20variables,model%20and%20interpret%20the%20results.> (hämtad 16 april 2022).
- [45] S. Glen. "Confidence Interval: How to Find it: The Easy Way!" (U.å.), URL: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/confidence-interval/> (hämtad 15 april 2022).
- [46] L. Zetterqvist, Lunds Tekniska Högskola, Föreläsning 9+10, Matematisk Statistik, Mejl: [lena.zetterqvist@matstat.lu.se](mailto:lens.zetterqvist@matstat.lu.se), 2020. (hämtad 15 april 2022).
- [47] SMHI. "Ladda ner meteorologiska observationer". (25 jan. 2022), URL: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=precipitation24HourSum,stations=all,stationid=62040>.
- [48] L. Istrell, Öresundskraft AB, Personlig kommunikation, Mejl: lars.istrell@oresundskraft.se, 6 april 2022.

Appendix

A Data från serie av kammare

Korrelation mellan luftfuktighet och nederbörd är inte med i tabellen eftersom datan är från olika perioder för olika serier och kan därför inte jämföras rättvist.

Serie	Kammare	RF	Temperatur	Korr. RF och utomhustemp.	Diff AF	RF - RF_skatt	
BTG1	35201-00	52,45625013	30,33816712	-0,312828284	11,12835931	24,80267146	
	42001-00	32,25378363	38,1506033	-0,155255404	9,949702961	11,3094782	
	42002-00	36,28761942	33,614737	-0,116113279	8,288055552	11,6762734	
	42004-00	34,9004615	28,93378725	0,309457475	4,929491496	5,830396832	
	42006-00	37,82472097	32,24174198	-0,023151622	7,881954177	11,98158611	
	42007-00	37,77997585	29,92895476	0,508872862	6,355668233	9,720936713	
	42008-00	29,95279481	32,06362962	0,344904603	5,099234779	3,945412151	
	42009-00	52,34530642	31,17157897	-0,356228549	11,85710224	25,49947142	
	42011-00	73,81109082	21,75895519	-0,32467521	9,064930527	36,28945523	
	42012-00	35,98029808	37,23422168	-0,414145907	10,93129552	14,34205015	
	42013-00	53,65281397	40,43367323	-0,210550883	22,99872065	34,34214007	
	BTG2	32011-01	21,30091591	37,50748894	0,227545351	4,51041543	-0,128024626
		49002-00	24,27778204	35,89460454	0,544669876	4,993340929	1,583507528
49003-00		27,36483088	33,86358232	0,464045771	5,13446838	2,970369139	
49005-00		24,2395993	39,97043954	0,405327146	7,305587839	4,608103261	
49006-00		26,48188797	33,0478894	0,569595721	4,388843522	1,369272566	
49007-00		28,90502928	32,9421915	0,434655759	5,193612221	3,697820907	
49008-00		31,28198122	32,82012007	0,313493643	5,957620654	5,965083149	
49011-00		33,08525735	33,1234565	0,330223449	6,851158082	8,040052056	
49012-00		21,04893934	42,27403428	0,32015463	6,978736959	2,961886809	
49013-00		21,69987401	38,06645774	0,331695564	4,975036098	0,692787162	
49014-00		21,17304448	43,15063122	0,25783551	7,584466974	3,641254574	
49017-00		29,65260951	32,91478557	0,154917518	5,444260884	4,420816434	
BTG3		60001-01	18,75097506	41,28233899	0,623407996	4,950859433	0,014522638
		60003-00	23,27913811	36,44558331	0,846698821	4,660693067	1,025303112
	60004-00	24,24408942	37,6779457	0,837628615	5,757394905	2,944682608	
	60005-00	15,17262339	39,08550161	0,829345786	2,135190717	-5,086646467	
	60006-00	12,37199537	48,26685369	0,845215135	4,189233925	-2,242761549	
	60007-00	20,34233427	31,74028581	0,89410459	1,507227757	-5,965894875	
	60008-00	23,89155803	33,37221514	0,815168858	3,411019651	-0,933016214	
	60011-00	68,12807667	20,0360917	0,312742268	6,545262985	28,23511257	
	60012-00	37,05798652	29,08359514	0,237728219	5,469865759	8,142414549	
	60015-00	25,21139747	35,12828176	0,609894028	4,777089708	1,890012028	

Figur 38: Data från alla kammare i serierna, från betongkulvert.

APPENDIX

Serie	Kammare	RF	Temperatur	Korr. RF och utomhustemp.	Diff AF	RF - RF_skatt	
ETN1	48004-00	47,38554564	42,74173361	0,403790925	22,76494888	29,59690144	
	48301-00	32,71749349	35,29240063	0,460571535	8,079543095	9,531854879	
	72001-00	53,71187477	29,05751787	0,622394752	10,42639562	24,76946918	
	72003-00	46,82589802	31,65760826	0,207638697	10,20795391	20,44018669	
	72004-00	65,00393615	33,13056363	0,522003539	18,25683751	39,96506149	
	72005-00	57,58712253	27,58350246	0,380205356	10,25514999	27,08676002	
	72006-00	36,16038321	34,04836391	0,374384144	8,476882019	11,92573272	
	72008-00	28,92532112	35,43275675	0,414265119	6,639737037	5,855147589	
	72009-00	25,92278009	31,71692951	0,924497163	3,556699789	-0,407314574	
ETN2	45014-00	59,59775086	36,24404513	-0,210131937	20,14520777	37,18381131	
	45015-00	39,11895946	37,60281706	0,371176311	12,64362298	17,76255757	
	45016-00	39,67597363	32,16039873	-0,046184375	8,469736257	13,7579565	
	45017-00	37,65886764	38,03911087	0,464119876	12,39850204	16,63133666	
	45018-00	21,6090479	41,24789043	0,66787691	6,71365155	2,849622969	
	45019-00	23,27809064	37,7059316	0,793585237	5,532138627	1,999875945	
	45020-00	40,67044428	33,64096236	0,685956858	9,925548292	16,08204591	
	ETN3	59001-02	28,47708667	30,78595165	0,759815426	3,76025713	1,260476588
59004-00		29,62805714	33,3107293	0,566486222	5,47557158	4,749130866	
59005-00		54,82439055	38,70538573	-0,02907531	21,02040815	34,28934057	
59006-00		19,88027959	39,06010587	0,737727153	4,429515566	-0,397299262	
59007-00		26,03014274	39,92859335	0,338412546	7,936637117	6,369404068	
59008-00		20,38150419	43,02277882	0,417550602	6,860397743	2,769803217	
59009-00		24,11446563	38,75691125	0,743481896	6,320998891	3,61701706	
59010-00		18,01541059	37,51665497	0,857786451	2,851592523	-3,406544497	
59012-00		24,80197677	38,6018865	0,763428848	6,553642567	4,191188341	
59012-01		18,97131341	35,86876319	0,812440854	2,604860192	-3,743830736	
ETN4		54000-00	56,97975048	34,70846989	0,646644114	16,97729299	33,30750043
		54001-00	19,69811927	35,54761719	0,724965128	2,765854528	-3,277991372
	54003-00	42,14566681	34,27429084	0,765287108	10,809284	18,10499086	
	54004-00	30,16515777	34,70114139	0,67369056	6,524318467	6,486736162	
	54005-00	25,097479	41,82471126	0,483569447	8,794780403	6,719029196	
	54007-00	20,48701983	39,27788148	0,87494376	4,839641119	0,365909935	
	54008-00	31,06715616	36,85355099	0,211662964	8,214809493	9,133923871	
	54009-00	30,34765994	35,67702379	0,597444614	7,150068289	7,477065141	
	54010-00	29,29365436	35,59598199	0,835687496	6,685521024	6,357036371	
	54011-00	30,37620877	25,72432073	0,891331452	2,031574101	-2,20936484	
	ETN5	65066-00	39,43441776	28,35917031	0,05550065	6,088115452	9,764072704
65069-00		38,96411208	25,53707424	0,374813878	4,398074881	6,160782523	
65070-00		35,08558741	22,95708951	0,280573021	2,371699865	-0,870560336	
65071-00		21,34410025	29,49989796	0,361946197	1,491223153	-7,146447702	
65072-00		34,26050511	25,52083489	0,139141663	3,265260036	1,438221776	
65074-00		42,73649781	30,19501684	-0,49174205	8,267703934	14,94175201	
ETN6	45001-00	55,69311886	32,59494499	0,019959978	14,66504271	30,17263142	
	45002-01	58,06127583	34,161025	-0,145004958	17,19920751	33,92354786	
	45003-00	37,66517243	37,63864984	-0,000186917	12,4012267	16,33597348	
	45004-00	54,00405135	24,62476238	0,442431363	7,384909874	20,11876281	
	45005-00	27,84905846	35,33394169	0,134184469	6,44540787	4,697654019	
	45006-00	25,4520903	31,38127563	0,184585317	3,52648094	-1,19424896	

Figur 39: Data från alla kammare i serierna, från eternitkulvert.

B Matlabkod

Endast koden för regressionen med ventilation och temperatur som förklarande variabler bifogas i appendix. Koden för regressionen med endast temperatur som förklarande variabel är i princip likadan och utelämnas därför.

```
1 %%
2
3 % BTG
4
5 array1 = table2array(RegressionBTG);
6 Luftfuktighet_BTG = array1(:,1);
7 Ventilation_BTG = array1(:,2);
8 Temperatur_BTG = array1(:,3);
9
10 [fitresult_BTG, gof_BTG] = createFit(Ventilation_BTG, ...
11     Temperatur_BTG, Luftfuktighet_BTG);
12
13 %%
14
15 % ETN
16
17 array2 = table2array(RegressionETN);
18 Luftfuktighet_ETN = array2(:,1);
19 Ventilation_ETN = array2(:,2);
20 Temperatur_ETN = array2(:,3);
21
22 [fitresult_ETN, gof_ETN] = createFit(Ventilation_ETN, ...
23     Temperatur_ETN, Luftfuktighet_ETN);

```

```
1 function [fitresult, gof] = createFit(Ventilation_BTG, ...
2     Temperatur_BTG, Luftfuktighet_BTG)
3 %CREATEFIT1(VENTILATION_BTG,TEMPERATUR_BTG,LUFTFUKTIGHET_BTG)
4 % Create a fit.
5 %
6 % Data for 'Regression BTG' fit:
7 %     X Input : Ventilation_BTG
8 %     Y Input : Temperatur_BTG
9 %     Z Output: Luftfuktighet_BTG
10 % Output:
11 %     fitresult : a fit object representing the fit.
12 %     gof : structure with goodness-of fit info.
13 %
14 % See also FIT, CFIT, SFIT.
15
```

```
16 % Auto-generated by MATLAB on 12-Apr-2022 16:50:17
17
18
19 %% Fit: 'Regression BTG'.
20 [xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( Ventilation_BTG ,...
21     Temperatur_BTG, Luftfuktighet_BTG );
22
23 % Set up fitype and options.
24 ft = fitype( 'poly11' );
25 opts = fitoptions( 'Method', 'LinearLeastSquares' );
26 opts.Robust = 'Bisquare';
27
28 % Fit model to data.
29 [fitresult, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, opts );
30
31 % Create a figure for the plots.
32 figure( 'Name', 'Regression' );
33
34 % Plot fit with data.
35 subplot( 2, 1, 1 );
36 h = plot( fitresult, [xData, yData], zData );
37 legend( h, 'Passad yta',...
38     'Luftfuktighet vs. Ventilation, Temperatur',...
39     'Location', 'NorthEast', 'Interpreter', 'none' );
40 % Label axes
41 xlabel( 'Korr. luftfuktighet och temp. utomhus ()',...
42     'Interpreter', 'latex' );
43 ylabel( 'Temperatur ( $^{\circ}$ C)', 'Interpreter', 'latex' );
44 zlabel( 'Luftfuktighet (\%)', 'Interpreter', 'latex' );
45 grid on
46 view( -60, 44.3 );
47
48 % Plot residuals.
49 subplot( 2, 1, 2 );
50 h = plot( fitresult, [xData, yData], zData, 'Style',...
51     'Residual' );
52 legend( h, 'Residualer', 'Location', 'NorthEast',...
53     'Interpreter', 'none' );
54 % Label axes
55 xlabel( 'Korr. luftfuktighet och temp. utomhus ()',...
56     'Interpreter', 'latex' );
57 ylabel( 'Temperatur ( $^{\circ}$ C)', 'Interpreter', 'latex' );
58 zlabel( 'Luftfuktighet (\%)', 'Interpreter', 'latex' );
59 grid on
60 view( -60, 34.3 );
```