



Framtida risker och sårbarheter för fjärrvärmenät

Mathilde Henriksen
Simon Probert

Examensarbete på Civilingenjörsnivå
Avdelningen för Energihushållning
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola | Lunds Universitet



Framtida risker och sårbarheter För fjärrvärmenät

Mathilde Henriksen & Simon Probert

Mars 2021, Lund

Föreliggande examensarbete på civilingenjörsnivå har genomförts vid Avd. för Energihushållning, Inst för Energivetenskaper, Lunds Universitet - LTH samt vid Öresundskraft AB i Helsingborg. Handledare på Öresundskraft AB: Magnus Ohlsson; handledare på LU-LTH: universitetslektor Per-Olof Johansson Kallioniemi; examinator på LU-LTH: universitetslektor Martin Andersson

Examensarbete på Civilingenjörsnivå

ISRN LUTMDN/TMHP-21/5471 -SE

ISSN 0282-1990

© 2021 Mathilde Henriksen och Simon Probert samt Energivetenskaper

Energihushållning

Institutionen för Energivetenskaper

Lunds Universitet - Lunds Tekniska Högskola

Box 118, 221 00 Lund

www.energy.lth.se

Förord

Detta examensarbete har utförts som den avslutande delen i civilingenjörsutbildningen i Ekosystemteknik med inriktning Energisystem vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet har genomförts vid avdelningen Energihushållning tillhörande institutionen för Energivetenskaper och i samarbete med Öresundskraft.

Vi vill rikta ett stort tack till alla som hjälpt till under arbetets gång. Ett särskilt stort tack till handledare Per-Olof Johansson Kallioniemi från avdelningen Energihushållning och Magnus Ohlsson från Öresundskraft för allt stöd och hjälp under arbetets gång. Ett stort tack riktas även till Madeleine Brask på Miljöbron som har utgjort länken mellan oss och Öresundskraft. Slutligen vill vi tacka Lena Zetterqvist, Universitetslektor i matematisk statistik för värdefulla tips.

Mars 2021, Lund

Mathilde Henriksen & Simon Probert

Abstract

District heating plays a significant role in the Swedish energysystem where many are dependent on the district heating working optimally. The system in general has a high security of supply, but unplanned interruptions in the supply do occasionally occur. Many of the district heating networks in Sweden began construction in the middle of the last century and some of the old pipes are expected to see increased failure rates. Replacing old piping is prohibitively expensive on a larger scale and it is necessary to maintain all parts of the network for as long as possible.

Today there are a number of preventative measures and ways to discover damages to pipes at early stages which can help district heating suppliers in prolonging the lifetime of the existing network. But it is not known where in the network these measures are best implemented. In this investigation a riskanalysis was performed in order to gain insight into which pipes are the most vulnerable, where preventative measures would be the most effective.

The study is divided into three parts where the first one looks into the probability of pipe failures based on data from Öresundskraft's grid. The second part investigates the effects of a supply disruption on a building's indoor temperature and energy consumption. The last part is a literature study on the consequences of an supply disruption with respect to different kinds of customers.

In the first part the failure rate is approximated based on the parameters: pipe type, year of installation, age, diameter, and water permeability of the surrounding soil. The pipe type PVC showed a significantly higher failure rate than the other types studied. The results also showed that pipes installed in the early decades in general had a higher failure rate. Many of the pipes showed an initial hump in the failure rate which then decreased with age. The analysis was not able to tell when the pipes' failure rates would start increasing at their end of life.

In the second part a model was derived describing how a disruption in supply affects the indoor temperature and the energy consumption of a building. In order to verify the model it was tested on data from a historical supply disruption. The model showed that the decrease in indoor temperature is exponential with respect to the difference between the outdoor temperature and the balance point temperature, and that the time constant and outage time are important factors. The model also estimated the decrease in energy consumption, but the accuracy and precision are unknown for general cases.

In the final part there was found to be a lack of previous studies on the effects of supply disruptions from a customer perspective. It emerged that there are different methods for determining the consequences in what the outage risks and what the economical costs are for different types of customers. Residential customers are least sensitive even during longer interruptions and there are large variations within other customer groups, which are also more affected by the duration of the interruption.

Keywords: District heating, Distribution, Supply disruption, Risk, Vulnerability, Failure rate, Indoor temperature, Energy consumption

Sammanfattning

Fjärrvärme har en betydande roll i det svenska energisystemet där många är beroende av att systemet ska fungera optimalt. Trots den generellt höga leveranssäkerheten i dagens system är oplanerade leveransavbrott är något som sker tidvis. I Sverige började många fjärrvärmenät byggas ut i mitten av 1900-talet och mängden skador i äldre ledningar förväntas öka med tiden. Att ersätta gamla ledningar i en större skala är väldigt dyrt och fjärrvärmeleverantörer behöver därför ta vara på och utnyttja alla delar av nätet så länge som möjligt.

Idag finns det åtgärder för att förebygga och upptäcka skador i ett tidigt skede men kunskap om var i nätet dessa är mest lönsamma saknas. För att undersöka detta och identifiera de mest sårbara ledningssträckorna gjordes en riskanalys över fjärrvärmenät.

Arbetet är uppdelat i tre delar där den första undersöker sannolikheten för avbrott baserat på data från Öresundskrafts fjärrvärmenät. Den andra delen undersöker konsekvenser på en byggnad vid avbrott i form av minskad inomhustemperatur och minskad energianvändning hos kunder. Den sista delen är en litteraturstudie för att se om det finns underlag för att kvantifiera konsekvenserna av ett avbrott med avseende på kunden.

I den första delen uppskattas skadefrekvenser och hur dessa påverkas av parametrarna ledningstyp, installationsår, ålder, nominell diameter och vattengenomsläppligheten i den omkringliggande marken. Ledningstypen PVC visar sig ha en markant högre skadefrekvens än andra ledningstyper. Det visar sig också att ledningar med tidiga installationsår överlag har en högre skadefrekvens. Många ledningar visar en högre skadefrekvens i tidig ålder som sen minskar över tid. Från statistiken går det inte att tyda när skadefrekvensen kommer vända och börja stiga mot slutet av ledningarnas livstid.

Den andra delen tog fram en modell fram för att beskriva hur ett avbrott i leveransen påverkar temperaturförändringar i en byggnad och den energianvändning som går förlorad. För att verifiera modellen testades den med data från ett verkligt avbrott i Helsingborg. Temperaturminskning var exponentiell i förhållande till skillnaden mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen där framförallt byggnadens tidskonstant och avbrottets varaktighet visade sig ha en stark påverkan. Modellen uppskattade också minskningen i energianvändning, men säkerheten av resultatet är okänd i generella fall.

I den sista delen konstateras det att det finns förhållandevis lite litteratur kring vad som utmärker en störningskänslig kund. Det framkommer en del olika metoder för att mäta störningskänsligheten i vad som riskeras och vad avbrottet kostar olika typer av kunder. Bostadskunder är minst känsliga även vid längre avbrott och stora variationer finns inom andra kundgrupper som dessutom påverkas mer av avbrottets varaktighet.

Nyckelord: Fjärrvärme, Distribution, Leveransavbrott, Risk, Sårbarhet, Skadefrekvens, Temperaturförändring, Energianvändning

Innehåll

Förord

Abstract

Sammanfattning

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Inledning	1
1.2	Syfte och frågeställningar	1
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Rapportens disposition	3
2	Bakgrund	4
2.1	Fjärrvärmedistribuition	4
2.2	Öresundskraft	5
2.2.1	Ledningstyper och material	6
2.3	Risk- och sårbarhetsbedömning	9
3	Teori och litteratursammanställning	11
3.1	Leveransavbrott	11
3.1.1	Kostnader	11
3.1.2	Teknisk livslängd av ledning	13
3.1.3	Skademekanismer	14
3.2	Energibalans för en byggnad	18
3.2.1	Rumsuppvärmning (I)	19
3.2.2	Interna tillskott (II)	19
3.2.3	Tillskott från varmvatten (III)	19
3.2.4	Principbild	20
3.2.5	Tidskonstanten	22
3.2.6	Dimensionerande vinterutetemperatur	22
4	Metod	23
4.1	Sannolikhet för skador	24
4.1.1	Kategorisering	24
4.1.2	Datainsamling och bearbetning	26
4.1.3	Beräkning av skadefrekvens och fördelningsfunktion	28
4.2	Utvärdering av avbrottets varaktighet	29
4.3	Modell över förändring i inomhustemperatur och energianvändning	30
4.3.1	Modellens grund	30
4.3.2	Inomhustemperatur	30
4.3.3	Energianvändning	32
4.4	Verifiering av modell	33
4.4.1	Bearbetning av data	34
4.4.2	Inparametrar till modellen	36
4.5	Identifiering av störningskänslighet hos kunder	37

5	Resultat	38
5.1	Sannolikhet för skador	38
5.1.1	Installationsår	38
5.1.2	Nominell diameter	43
5.1.3	Genomsläpplighet av jordart	44
5.2	Avbrotts varaktighet	45
5.3	Förändring i inomhustemperatur och energianvändning	47
5.3.1	Inomhustemperatur	47
5.3.2	Energianvändning	48
5.3.3	Bearbetning av data	49
5.3.4	Validering av modell	50
5.4	Störningskänslighet hos kunder	52
5.4.1	Regler och krav	52
5.4.2	Rekommenderad varaktighet av avbrott	52
5.4.3	Indelning i kundgrupper	53
5.4.4	Kostnader för olika kundgrupper	53
5.4.5	Kunders betalningsvilja	55
6	Analys	56
6.1	Skadefrekvens	56
6.2	Beroende parametrar	57
6.3	Avbrotts varaktighet med avseende på kunder	57
6.4	Identifiering av sårbara ledningar	58
7	Diskussion och metodutvärdering	61
7.1	Beräkning av sannolikhet	61
7.1.1	Ledningslängd	61
7.1.2	Passning av weibullfördelningar till installationsår	62
7.1.3	Beräkning av konfidensintervall	63
7.1.4	Uteslutna parametrar	64
7.1.5	Omfattande statistisk modell	64
7.2	Avbrotts varaktighet	64
7.3	Temperaturförändring	65
7.3.1	Normalisering mot utomhustemperatur	65
7.3.2	Varmvattenanvändning	66
7.3.3	Framtagen modell över inomhustemperatur	66
7.3.4	Konstant återkommande effekt	67
7.3.5	Justering av den återkommande effekten	67
7.3.6	Förbättrad modell	68
7.4	Riskbedömning	68
8	Slutsats	70
9	Rekommendationer för framtida studier	71
	Referenser	74
	Bilaga	75

1 Introduktion

I detta kapitel introduceras rapporten och dess syfte, mål och frågeställningar. Vidare beskrivs arbetets avgränsningar och disposition.

1.1 Inledning

Fjärrvärme har en betydande roll i det svenska energisystemet och står idag för drygt hälften av energin till uppvärmning och varmvatten i landet. Då många är beroende av att fjärrvärmesystemet fungerar är det av intresse att studera hur distributionen kan fungera så optimalt som möjligt. Ledningsnätet i Sverige började byggas i mitten av 1900-talet vilket innebär att man idag har flertalet olika typer av ledningar där många är av äldre karaktär. Nyanskaffningsvärdet är stort och att byta ut ledningar är väldigt dyrt eftersom de ofta ligger centralt placerade. Det finns därför starka incitament till att utnyttja och förvalta befintlig infrastruktur så länge som möjligt, men det är väsentligt att detta kan göras utan att äventyra säkerheten. Oplanerade avbrott i fjärrvärmenät är något som inträffar tidvis, men även om de sällan är långvariga påverkar det leveransförmågan till kunder. Dessutom är kostnaderna för återställning av ledningar höga och kräver ofta omfattande arbete. I svar till detta har olika system implementerats för att upptäcka potentiella läckor i ett tidigt stadiet. Det finns idag ett flertal förebyggande åtgärder att tillämpa men problematiken ligger i var i nätet dessa är mest lönsamma och vilka kunder som är mest utsatta vid ett avbrott. För att kunna göra dessa prioriteringar behövs ett underlag som på ett strukturerat sätt statusbedömer ledningarna, undersöker hur avbrott påverkar fjärrvärmeföretaget och kunder och kartlägger sårbarheterna i nätet.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med arbetet är att undersöka risken för oplanerade avbrott i fjärrvärmenät och bedöma sårbarheten i ledningar. För att undersöka detta ska följande frågeställningar besvaras.

- ⇒ Vad är sannolikheten för oplanerade avbrott i olika ledningar och vilka parametrar är avgörande?
- ⇒ Hur förändras en byggnads inomhustemperatur och energianvändning vid avbrott och vilka faktorer är avgörande?
- ⇒ Vad utmärker en störningskänslig kund?
- ⇒ Hur kan sårbara ledningar identifieras?

Arbetet förväntas utöka kunskapen om trender i ledningars skadefrekvenser och vad oplanerade avbrott innebär för fjärrvärmeleverantören och kunderna.

För att besvara den första frågeställningen kommer Öresundskrafts ledningsnät i Helsingborg att studeras tillsammans med statistik över historiska skador i nätet.

Den andra frågeställningen kommer att besvaras genom att ta fram en teoretisk modell som beskriver en byggnads energibalans. Validiteten av denna modell kommer sedan att undersökas med data från ett verkligt avbrott i Öresundskrafts nät.

För den tredje frågeställningen kommer en litteraturstudie att genomföras över olika kundgruppers känslighet för avbrott i värmeleverans och vilka krav som finns beträffande avbrottets varaktighet.

I den sista frågeställningen sammanfattas tidigare resultat och en metod föreslås för att identifiera sårbara ledningar.

1.3 Avgränsningar

Arbetet utgår från underlag och data från centrala delarna av Helsingborg samt Råå, Ödåkra, Laröd och Hittarp och något geografiskt beroende kommer finnas.

Arbetet kommer inte undersöka olika sorters förebyggande åtgärder eller effektiviteten hos dessa.

Arbetet kommer endast undersöka markförlagda ledningar i nätet.

Arbetet antar att avbrott sker under uppvärmningsperioden.

Arbetet fokuserar på kostnader från minskad energianvändning för fjärrvärmeleverantören och diskuterar också konsekvenser för kunden och tredje partes kostnader. Andra kostnader och konsekvenser för fjärrvärmeleverantören nämns men ligger utanför arbetets huvudsakliga omfattning.

Arbetet utgår från risker kopplat till fjärrmeledningarna och inte nätet i stort, så som störningar i elektronisk kommunikation, elförsörjning eller tillgång till resurser för att hantera störningarna.

1.4 Rapportens disposition

Kapitel 1 börjar med en kort inledning vartefter arbetets syfte, mål och frågeställningar presenteras. Även avgränsningar förklaras och en kort disposition beskriver arbetets struktur.

Kapitel 2 ger en kort introduktion till fjärrvärmedistribution och risk- och sårbarhetsbedömning i stort. Dessutom presenteras de objekt som vidare kommer att studeras.

Kapitel 3 sammanfattar litteratur och tar upp teori som båda kommer att användas senare i arbetet. Bland annat beskrivs olika parametrar som kan anses ha en påverkande faktor på avbrottsfrekvensen samt teoretiska koncept rörande uppvärmning av byggnader.

Kapitel 4 beskriver metoderna som används i de olika delarna av arbetet. Dessa utgörs av delarna: sannolikhet för avbrott, avbrotts varaktighet, framtagning av en modell för energibalans, verifiering av modellen samt en litteraturstudie.

Kapitel 5 presenterar studiens resultat från den statistiska analysen av skadefrekvens samt den temperaturförändring och förlorad energianvändning som ett avbrott orsakar.

Kapitel 6 analyserar framtagna resultat och ställer det i ett större sammanhang. Här föreslås också en metod för att identifiera sårbarheterna i fjärrvärmenät.

Kapitel 7 behandlar en sammanfattande diskussion av resultatet och analys. Vidare följer en metodutvärdering med reflektioner kring arbetets generalitet och överförbarhet med hänsyn till metod, avgränsningar och antaganden.

Kapitel 8 innefattar arbetets slutsatser och besvarar de frågeställningar som studien fokuserat på samt en kommentar beträffande det huvudsakliga syftet.

Kapitel 9 ger förslag på vidare studier som låg utanför ramen för detta examensarbete.

2 Bakgrund

I mitten av 1900-talet började fjärrvärmenätet byggas ut i Sverige och idag finns det omkring 24 700 kilometer ledningar fördelat på 285 av landets 290 kommuner (Energiföretagen 2016). Under ett normalår produceras drygt 54 TWh vilket representerar 58% av all rumsuppvärmning och varmvattenproduktion (Energiföretagen 2020a). Konceptet bygger på att central värmeproduktion av bränslen och resurser som annars skulle gå till spillo distribueras till kunder i stora, flexibla nät. Det finns flera fördelarna med denna uppvärmningsform gentemot lokal produktion. Att produktionen sker centralt är bekvämt för värmeförbrukaren och förenklar möjligheterna att minska miljöpåverkan. Storskaligheten innebär högre säkerhet i värmeleveransen och ger möjlighet att använda fler och annorlunda bränslen. Vidare har fjärrvärme generellt hög leveranssäkerhet och bidrar till synergieffekter i samhället. Centraliseringen och storskaligheten innebär dock även att ett avbrott i energiförsörjningen kan innebära stora påfrestningar på samhället.

2.1 Fjärrvärmedistribution

Från centrala värmeanläggningar överförs värme i förgrenade fjärrvärmenät till kunder baserat på behov. Näten består av fram- och returledningar som ligger antingen som separata ledningar eller som tvillingrör med ett gemensamt omslutande mantelhölje. Sedan början av fjärrvärmsystemets utbyggnad i Sverige har många metoder testats för ledningarnas konstruktion och materialval. Vissa av dessa, som visat sig vara mer robusta, finns fortfarande kvar idag. Frederiksen & Werner (2014) identifierar tre generationer av distributionstekniker som avsevärt skiljer sig från varandra. Till första och andra generationen hör ledningar med mediator i stål inneslutna i kulvertformationer. Det som skiljer dem åt är att mediet i andra generationens rör är varmvatten medan i den föregående är ånga. Idag finns få ledningstyper från den första generationen i Sverige och de som finns distribueras endast till särskilda industrikunder. Tredje generationens ledningar har mediator av antingen stål, koppar eller plast inneslutna i en mantel av plast och anlagda direkt i marken. Framledningstemperaturerna på vattnet i tredje generationens system ligger normalt mellan 70-120°C vilket är betydligt lägre än den tidigare varianten. De tre generationerna av distributionstekniker visar att användningen av olika typer av distributionsrör beror på vilken typ av material och tekniker som var tillgängliga under samtliga tidsperioder. Den traditionella metallen för rör och det vanligaste materialet i distributionssystem är stål (Tereshchenko & Nord 2016). Till ny teknik hör oböjliga polymerrör samt flexibla polyeten- och kopparrör.

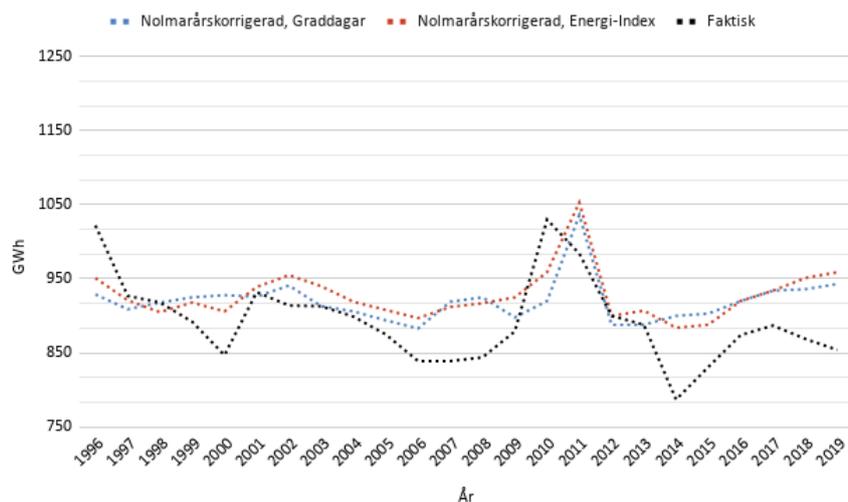
I Sverige är fjärrvärmenätet fysiskt skilt från byggnaders interna uppvärmningssystem och värmeöverföringen mellan de två systemen sker via en värmeväxlare i en fjärrvärmecentral. Typiskt är att småhus har en egen fjärrvärmecentral medan flerbostadshus har en gemensam central (Svensk Fjärrvärme 2014). Det finns en standard framtagen av Energiföretagen som fastställer krav på tekniska specifikationer i en fjärrvärmecentral. Utöver värmeväxlare är övriga huvudkomponenter

cirkulationspump, ställdon, expansionskärl, ventiler, reglercentral och mätare som mäter effekt-timvärdena, total energi och flödesförbrukning samt vattentemperaturer. En stor del av den kunddata som kommer att undersökas i detta arbete kommer från mätvärden i kundernas fjärrvärmecentraler.

2.2 Öresundskraft

Öresundskraft ägs av Helsingborg stad och är ett av de 10 största energi- och kommunikationsbolagen i Sverige. Företagets kärnverksamhet är distribution och försäljning av energi. Utöver el, gas och fjärrkyla producerar, distribuerar och säljer Öresundskraft fjärrvärme till Helsingborg och har även fjärrvärmeverksamhet i Höganäs och Ängelholm via dotterbolag.

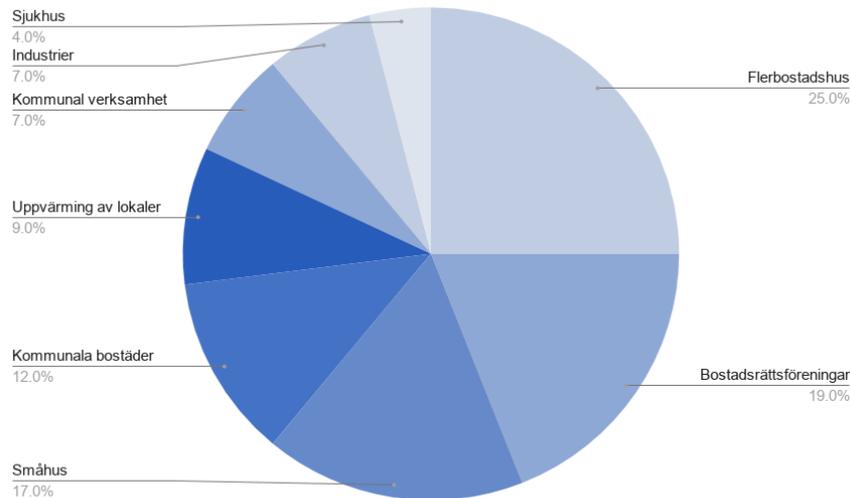
Under 2019 levererade Öresundskraft 920 *GWh* (exkluderat ca 15% distributionsförluster). Samma år bestod fjärrvärmen i Helsingborg till 99.98% av återvunnen och förnybar energi. Den årliga leveransen sedan år 1996 presenteras i figur 1.



Figur 1: Historiska fjärrvärmeleveranser i Helsingborg med omnejd. Källor: Energiföretagen Sverige, SMHI, Energimarknadsinspektionen och SCB

Basproduktionen är från avfallsförbränning i Filbornaverket och spillvärme från Kemira Kemi. Förutom Kemira levererar Elektrokoppar och krematoriet också restvärme. Västhamnsverkets värmepump och pelletsanna används till mellanlast beroende på elpriset. Västhamnsverkets gasturbin (naturgas) samt FC Israels oljeeldade och kombinerad naturgas/oljeeldad hetvattenpannor används som spets- och reservanläggningar.

I figur 2 återfinns kundgrupperna dit Öresundskrafts fjärrvärmeleveranser går. Från figuren framgår att flerbostadshus är den dominerande kunden och att 73% av leveranserna går till uppvärmning av bostäder.



Figur 2: Öresundskrafts kundgrupper med procentuell indelning av leveranserna.

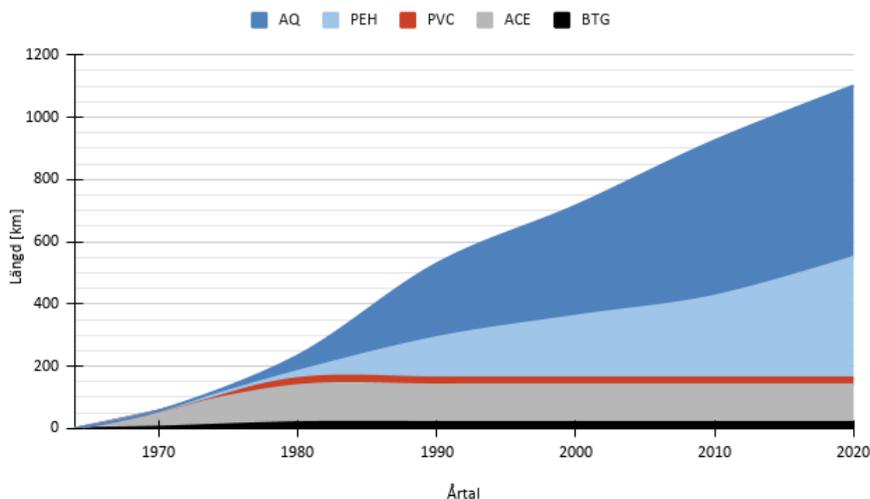
2.2.1 Ledningstyper och material

Helsingborgs fjärrvärmenät började byggas år 1964 och sedan dess har stora utvecklingar skett inom fjärrvärmetekniken. Idag finns därför en uppsjö av olika ledningstyper i varierande storlek och konstruktion. Nätet i Helsingborg är ihopkopplat med Landskronas fjärrvärmenät sedan 2005 som i sin tur leder ner till Lund via EVITA-ledningen sedan 2015. Statsnätet är omkring 1100 km långt med fram- och returledningar och 28 000 m³ stort. De levererar till 12 000 värmecentraler kopplade till 50 000 kunder.

Fjärrvärmenätet kan delas in i fem olika huvudtyper av ledningar: betongkylvert med mediarör av stål (BTG), eternitkylvert med mediarör av stål (ACE), polyvinylkloridmantlade stålrör (PVC), polyetenmantlade stålrör (PEH) och polyetenmantlade kopparrör (AQ). För att ge en uppfattning om ledningslängder under olika tidsperioder visualiseras den årliga utbyggnaden av varje ledningstyp i figur 3.

De olika huvudtyperna av ledningar reflekterar dels olika platsspecifika krav men valet av ledningar är också kopplat till den tillgängliga tekniken vid tiden för installationen. Eftersom det inte finns någon gemensam standard kring konstruktion av fjärrvärmeledningar innebär det att stora variationer finns beroende på vem som utfört arbetet (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015).

Den största andel ledningar i Helsingborgs fjärrvärmenät är inom ramen för tredje generationens distributionsteknik. Huvudtyperna av ledningar kan delas vidare in i en mängd olika subtyper till följd av olika fabrikat och att konstruktionerna och



Figur 3: Utbyggnad av varje ledningstyp per decennium i Helsingborg med omnejd.

installationsprocesserna har utvecklats genom åren. Erfarenhet inom Öresundskraft talar för att dessa subtyper i vissa fall också har en betydande påverkan på skadefrekvensen.

2.2.1.1 Betongkulvertar med mediarör av stål

Betongkulvertar (BTG) tillhör den äldsta typen av fjärrvärmeledningar som finns i svenska nät (Malm et al. 2016). I Helsingborg stad skedde utbygganden av BTG-ledningar främst under 60- och 70-talet. Stålrör med omkringliggande isolering av antingen mineralull eller cellbetong, ligger fastsvetsade mellan stålbalkar för att undvika termiska rörelser i en omkringliggande betongkonstruktion (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). Ledningarna finns i segment på 12 meter. De två dominerande subtyper av BTG-ledningar har olika typer av förläggningsmetoder varav den ena, lådkulvert, har en U-formad bottendel med ett platt lock och den andra, plattkulvert, har en platt bottendel som de mineralullsisolerade medierören vilar på med ett U-format lock (Malm et al. 2016). Den senare är enligt Öresundskraft ofta förenad med större risker.

I de flesta fall ligger BTG-ledningar centralt placerade i städer eller i direkt anslutning till produktionsanläggningarna och är således ofta av stora dimensioner (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). En vanlig skademekanism är att sprickor uppstår efter tid genom vilka vatten tar sig in och orsakar korrosion på stålröret (Malm et al. 2016). Precis som för övriga ledningstyper kan den omgivande miljön ha en påverkan på skadefrekvensen i BTG-ledningar. Vad som är specifikt för betong är att kloridjoner eller pH-sänkningar i betongen, exempelvis till följd av exponering av syror eller av karbonatisering, gör att det ingjutna stålröret börjar korrodera (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). När korrosionen initierats utvidgas stålet och inre sprängkrafter bildas. Dessa skapas i sin tur större sprickor i betongen som släpper in aggressiva ämnen som påskyndar korrosionsförlop-

pet (ibid.). Cementhalten i betong som utgör dess täthet har stor betydelse för beständigheten mot den omgivande miljön (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). Karbonatisering och inträngning av kloridjoner hindras om betongen är av tätare kvalité. Före 1980 användes kalciumklorid vid betongtillverkning vilket man sedan insåg orsakade karbonatisering av betongen. Generellt sätt hjälper det också om betongen hålls torr.

I kulvertformationer kan dessutom inträngande vatten lätt förflytta sig långa sträckor (Vattenfall 2010). Ofta ligger dock kamrarna lågt placerade så att eventuellt inläckage av vatten ska kunna rinna ut i kammaren (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). Reperationekostnaderna för denna ledningstyp är generellt sett också högre än andra (ibid.).

2.2.1.2 Eternitkulvertar med mediator av stål

Eternitkulvertar eller asbestcimentrörskulvertar (ACE) har precis som betongkulverterna ett stålrör med omkringliggande isolering, främst mineralull, i en lådformad konstruktion. För denna ledningstyp av konstruktionsmaterialet asbestcement. Ledningarna finns i segment på 6 meter och användes främst mellan 60- och 70-talet i Helsingborg. Därefter blev inköp av denna ledningstypen förbjuden på grund av hälsorävarna med asbestdamm.

Även ACE-ledningar har nackdelen att vatten som läckt in kan förflytta sig långa sträckor i kulverten. En del ledningar är byggda så att röret hålls på plats med hjälp av betongsformar inom mantelhöljet. Detta kan göra så att ventilationen i kulverterna är mycket dålig och mineralullet i isoleringen kan ha svårt att torka om vatten har läckt in vilket i sin tur leder till korrosion på stålröret. Dessutom är denna ledningstyp känslig för sättningar och vibrationer och spricker lätt (Vattenfall 2010).

2.2.1.3 Polyvinylkloridmantlade stålrörsledningar

Polyvinylkloridmantlade stålrörsledningar (PVC) är den första typen av plastmantlade ledningar som tillhör tredje generationens fjärrvärme (ibid.). Denna specifika ledningstyp har ett hölje av polyvinylklorid utanpå polyuretanskum som isolerar ett mediator av stål. Ledningen installeras i segment på 6 meter. Plastmantlade ledningarna kan förläggas direkt i marken och är friktionsfixerade vilket gör att de är mindre känsliga för dynamiska laster (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015). I Helsingborg skedde den största utbyggnationen under 70-talet. Enligt Öresundskrafts erfarenhet har denna ledningstyp varit förenad med hög skadefrekvens när de inte är anlagda i sand. Detta har gjort att man vid skador ofta passar på att byta ut mer än bara den skadade delen och ersätter med en annan ledningstyp.

2.2.1.4 Polyetenmantlade stålrörsledningar

Polyetenmantlade stålrörsledningar (PEH) är en annan ledningstyp inom plastmantlade ledningar. Precis som PVC-ledningar så har PEH-ledningar ett medierör av stål och en isolering av polyuretanskum eller mineralull, skillnaden är att plasthöljet är av en polyeten av hög densitet istället för polyvinylklorid. I Helsingborg började utbyggnationen av PEH-ledningar på 70-talet de är idag den ledningstypen som byggs mest.

PEH-ledningar kommer färdigmonterade i segment som vid installation kopplas samman. Öresundskraft använder nästan bara 12 meters-segment. Ledningarna har larmtrådar inbyggda i isoleringen som varnar om de kommer i kontakt med fukt, vilket tyder på att plastmanteln läcker och att medieröret riskerar att skadas. Det finns olika tekniker för att koppla ihop de färdigmonterade segmenten vilka utgör olika subtyper som kan påverka skadefrekvensen.

2.2.1.5 Polyetenmantlade kopparrörsledningar

Polyetenmantlade kopparrörsledningar (AQ) bygger på ett medierör av koppar, en isolering av antingen polyuretanskum eller mineralull och ett hölje av korrigerat polyeten. I Helsingborg började utbyggnationen på 70-talet. Ledningen tillverkas i segment på 12 meter. Denna ledningstyp är designad för att vara mer flexibel än PEH-ledningar och tillsammans med PEH-ledningar utgör de i princip all nybyggnation i Helsingborg idag. Flexibiliteten i ledningen underlättar anpassning till diverse barriärer i marken. För ledningar av denna typen använder sig Öresundskraft av Logstors serie "Aquawarm", därav benämningen "AQ". Korrosion på koppar inleds ofta genom en missfärgning som sedan utvecklas till korrosion, ofta i form av frätgropar (Sund 2002). Vid skador kan vatten tränga in i isoleringen och förflytta sig mellan medieröret och plastmanteln och i sådana fall behöver hela sträckan med blöt isolering bytas.

2.3 Risk- och sårbarhetsbedömning

Enligt Sernhed, Jönsson & Olsson (2015) kan leveransskvalité för ett fjärrvärmesystem definieras enligt tryck- och temperaturkvalitet, samt information om avbrott och konsekvenser. Leveranssäkerheten, dvs. att fjärrvärmeleveranserna möter kundens behov för rumsuppvärmning och tappvarmvatten, är mycket komplext att bedöma då leveranssäkerheten utgår från konsekvenser av ett eventuellt leveransavbrott. Dessa kan vara allt mellan en upplevde komfortsänkning till hälsomässiga och ekonomiska beroende på kund (ibid.).

Energipolitiken inom Sverige och EU bygger på grundpelarna ekologisk hållbarhet, konkurrenskraft och försörjningstrygghet (Energimyndigheten 2016). De höga målen för tillförlitligheten beror på de allvarliga konsekvenser för enskilda och samhällsviktiga funktioner. Leverantören har ett ansvar att förebygga och lindra eventuella avbrott i försörjningen men vad trygg energiförsörjning innebär kan dock variera mellan olika typer av kundkategorier (ibid.).

Riskhanteringsprocessen går från val av utgångspunkter via riskbedömning och sårbarhetsbedömning, till riskbehandling. Riskbedömningen innefattar identifiering av risker, riskanalys och slutligen riskvärdering (MSB 2011). Analyserna över risker och sårbarheter utförs i syfte dels att lyfta medvetenheten och dels att skapa ett underlag för planering (ibid.). Det finns flera olika typer av riskanalysmetoder som varierar mellan kvalitativa, semikvantitativa och kvantitativa beroende på om den innehåller numeriska mått på sannolikheter och konsekvenser för en oönskad händelse eller kvalitativ identifikation och rangordning av olika händelseförlopp (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015).

3 Teori och litteratursammanställning

I detta kapitel sammanfattas litteratur och teoretiska koncept kring en byggnads uppvärmning förklaras.

3.1 Leveransavbrott

Då värmesystemet har en viss tröghet finns inte en vedertagen definition av ett leveransavbrott vilket innebär att avbrottstatistik kan skilja sig mellan företag (Energimyndigheten 2016). I arbetet används definitionen av avbrott som ett oplanerat avbrott till följd av skada som kväver avstängning av ledning. Tiden för avbrott definieras som tiden då leningen är avstängd.

3.1.1 Kostnader

Ett avbrott i fjärrvärmenätet kan ha mycket varierande påföljder som inte bara rör vilken typ av kund leveransavbrottet drabbar, som kan ha varierande störningskänslighet, men också hur många det är som drabbas, vilken typ av ledning det är och om den är svåråtkomlig och därför förenad med högre reparations- och återställningskostnader.

Ett fjärrvärmeavbrott kan ge upphov till en rad olika negativa konsekvenser för olika kundgrupper och tid på dygnet samt säsong på året. För en bostad kan ett avbrott i värmeleverans innebära minskad termisk komfort medan det för en verksamheter och industri kan innebära hälsorisker eller stora ekonomiska förluster. När det gäller verksamhet och industri finns det dessutom ofta externa kostnader för en tredje part som även drabbas av avbrottets konsekvenser i form av merkostnader.

3.1.1.1 Reparations- och återställningskostnader

Dimensionen på fjärrvärmeledningen beror till stor del på värmebehovet som ska tillgodoses. Inom Öresundskraft delas dessa in i tre kategorier. Stamledningar är större och ofta direkt anslutna till produktionsanläggningen. Serviceledningar är små och direkt kopplade till enkla fastigheter. Mellan dessa finns så kallade distributionsledningar.

I Tabell 1 visas reparationskostnader räknat lågt och högt för olika storlekar av ledning från Öresundskraft. Den nominella diametern (DN) är ett standardmått för innerdiameter mätt i millimeter. Som tabellen visar finns det stora variationer i kostnader. Dessa variationer beror inte så mycket på själva fjärrvärmeledningen utan mer på omkringliggande faktorer såsom trafik, ytmaterial och hinder i marken. Om bara fjärrvärmeledning och material tas i beaktning är reparationskostnader ur ett nationellt perspektiv lägst för fasta plaströrsledningar och högst för flexibla plaströrsledningar (Lygnerud & J. Ottosson 2019).

Tabell 1: Intervall för reparationskostnader för ledningar av varierande storlek.

Ledning	Nominell diameter	Lågt [SEK]	Högt [SEK]
Servisledning	\leq DN54	100 000	250 000
Distributionsledning	$>$ DN54 \leq DN300	300 000	2 000 000
Stamledning	$>$ DN300	1 500 000	5 000 000

3.1.1.2 Förlorad energiförsäljning

Vid ett leveransavbrott går intäkter för fjärrvärmeföretaget förlorade för den värmeförsäljning som uteblir. Kostnaderna för den försäljning som går förlorad varierar med den normala energikostnad som den påverkade kunden har.

Det finns i nuläget inget regelverk kring varken pris eller prismodeller för fjärrvärme utan det bestämmer fjärrvärmeleverantören själv. Prismodellerna varierar för olika kundgrupper för att objektivt kunna spegla gruppernas beteende och förbrukning med fjärrvärmeföretagets kostnader (Gåverud, Sernhed & Sandgren 2016). Öresundskraft skiljer på konsument och näringsidkare i sina prismodeller. Priserna för konsumenter inkluderar en fast kostnad och en energiavgift (Öresundskraft 2020a). För näringsidkare finns en effektagift, en flödesavgift under vintermånaderna och en energiavgift (Öresundskraft 2020b). Effektagiften baseras på den högst uppmätta dyngsförbrukningen under de senaste 12 månaderna. Eftersom större kunder innebär lägre distributionskostnader per energienhet får dessa en lägre effektagift.

Vid ett leveransavbrott rubbas energibalansen i uppvärmda byggnader vilket beskrivs närmare i kapitlet 3.2 'Inomhustemperatur och energianvändning'. Efter avbrottet ökar den momentana effekten för att snabbt kunna återställa värmen som gått förlorad vid avbrottet. Enligt Öresundskraft har kunders prissättning inte påverkats av denna effekthöjning.

3.1.1.3 Vattenförluster

I Sverige har vattnet i fjärrvärmenätet en hög kvalitet för att motverka korrosion på fjärrvärmerörets insida vilket innebär en hög kostnad, runt ~ 50 kr/m³. Ledningarna är byggda för att hålla ett tryck på minst 16 bar och vid skada som leder till läckage kan stora mängder vatten läcka ut på kort tid. Att kvantifiera de totala kostnaderna för vattenförluster är dock mycket svårt då det varierar stort med läckans storlek och tiden mellan skadan till att ledningen stängs av. Vatteninnehållet kan också variera från ~ 0.1 till ~ 280 liter per meter beroende på storlek (Svensk Fjärrvärme 2007a).

3.1.1.4 Indirekta kostnader

När ett avbrott sker i fjärrvärmenätet genererar inte detta enbart kostnader för fjärrvärmeleverantören i form av vattenförluster, förlorad energiförsäljning, kost-

nader för reparationer och återställning av ledningarna eller övriga direkta kostnader. Ett avbrott i fjärrvärmenätet riskerar även att generera indirekta kostnader i form av skadat förtroende för leverantören och minskat anseende för fjärrvärme som energiform. Komfortminskning, vägarbete, vatten i källare och andra besvär som eventuellt kan uppkomma vid ett leveransavbrott riskerar att hindra framtida kunder för att ansluta sig till nätet.

3.1.2 Teknisk livslängd av ledning

Det finns flera faktorer orsakar skador på en ledning och påverkar hur sannolikt det är att en fjärrvärmeledning skadas. Skadefrekvensen kan dels bero på ledningen i sig och dels på den omgivande såväl inre som yttre miljön.

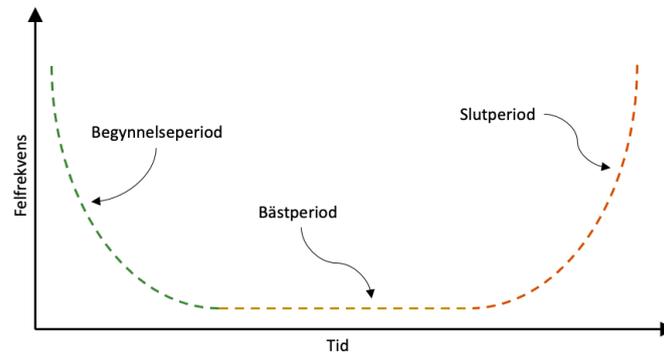
Fjärrvärmesystem utvecklas sällan från grunden och nätverken är ett resultat av kontinuerlig förlängning och sammanslagning. Sveriges fjärrvärmenät är relativt unga och stora delar av de första ledningarna i svenska fjärrvärmenätverk är fortfarande i drift idag. Därför finns det idag inte mycket underlag i litteraturen kring kritisk ålder och livslängd för olika fjärrvärmeledningar (Malm et al. 2016).

Krav på ledningars livslängd är enligt standarden SS-EN 253 minst 30 år vid en drifttemperatur på 120 °C (Svensk Fjärrvärme 2015). Den skattade tekniska livslängden för olika typer av ledningar presenteras i Tabell 2.

Tabell 2: Fjärrvärmeledningars typiskt tekniska livslängd (Svensk Fjärrvärme 2015)

ACE	BTG	PEH	Flexibla ledningar
40–60 år	50–70 år	80–100 år	30–60 år

Felintensitet, dvs. felfrekvens över tid, i olika system brukar beskrivas av en så kallad badkarskurva som består av tre perioder (se Figur 4); till en början en hög men minskande skadefrekvens följt en period av låg, relativt konstant skadefrekvens och slutligen en fas där den maximala livslängden uppnåtts och skadefrekvensen ökar. De initiala felen är ofta en följd av design-, installation- eller materialfel. Felen i den andra perioden med låg skadefrekvens beror ofta på slumpmässiga fel exempelvis till följd av yttre påverkan och höga påfrestningar. I den slutliga fasen är felen ofta ett svar på utslitna material. Den andra fasen, som brukar benämnas bästperioden, kan förlängas genom att ny teknik utnyttjas vid underhåll och förnyelse (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012).



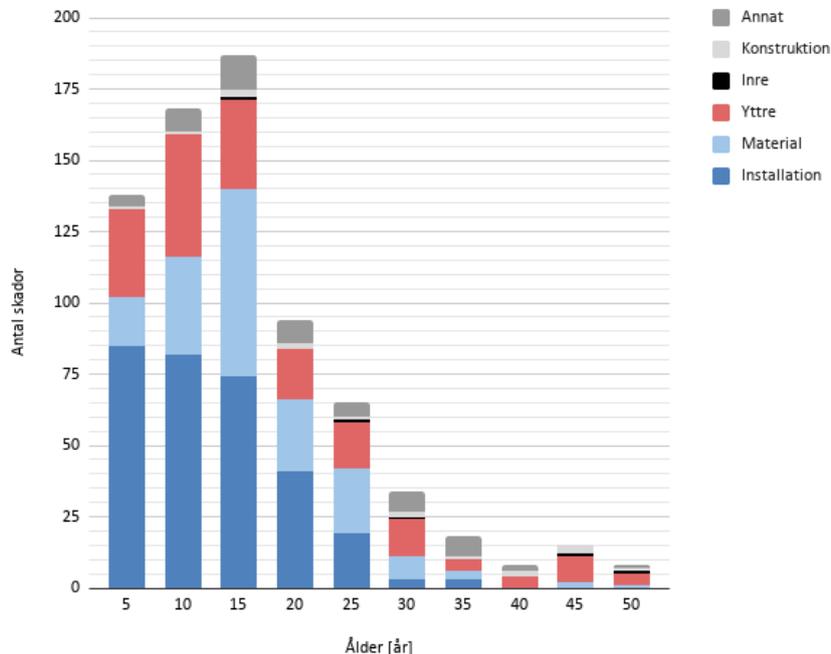
Figur 4: Badkarskurvan som beskriver felfrekvensen över tid.

Sernhed, Jönsson & Olsson (2015) genomförde en workshop med representanter för åtta fjärrvärmebolag som tillsammans listade parametrar som ansågs viktiga vid riskanalyser i fjärrvärmenät. Åldern ansågs vara en bra parameter att inkludera då den objektiv och lättillgänglig men vidhöll att den egentligen ger lite information om ledningens status.

3.1.3 Skademekanismer

Via skadestatistik från leveransavbrott ges möjligheter för att få en uppfattning om ledningsnätets status och vad som orsakade skadan. Enligt Svensk Fjärrvärmes kulvertskadestatistik är primärorsakerna bakom skador på fjärrvärmerör indelade i materialfel (dvs. fel på skyddshöljet, medieröret, kompensatorer, ventiler eller larm), installationsfel (fel som uppkommer vid hantering och arbete), konstruktionsfel (felaktig eller bristfällig konstruktion) samt inre åverkan och yttre åverkan av omkringliggande miljö och grävsador (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012).

Öresundskrafts skadestatistik följer Svensk Fjärrvärmes kategorisering av primärorsaker vilka presenteras i Figur 5.



Figur 5: Antal skador för olika femårsperioder fördelat i primärorsaker.

Enligt Figuren domineras primärorsaken de första åren av installationsfel. Kvaliteten på utförandet av de olika arbetsmomenten som ingår vid förläggning av fjärrvärmerör anses enligt Malm et al. (2016) studie ha en påverkan på skadefrekvensen. Även Svensk Fjärrvärme (2007b) framhåller konstruktörens erfarenhet, skicklighet och kännedom om markförhållanden som en huvudkomponent för att uppnå hög kvalitet vid nybyggnation av fjärrvärmeledningar, vilket också innebär att upphandling av entreprenör och uppföljning under byggtiden är väsentligt (ibid.). Utbyggnadstakten vid tiden för installationen menar Andersson, Molin & Pletikos (1999) kan ha en stor påverkan. Installationsåret för fjärrvärmeledningarna utmärker bland annat vilka förläggningstekniker som nyttjades vid tiden och vilka konstruktörer som används.

Ledningarna i Öresundskrafts nät består av en mängd olika material. Enligt nationell statistik ligger skadefrekvensen för BTG-ledningar på $0.08 \text{ km}^{-1} \cdot \text{år}^{-1}$, för ACE på $0.1 \text{ km}^{-1} \cdot \text{år}^{-1}$ och för plastmantlade rör på $0.09 - 0.18 \text{ km}^{-1} \cdot \text{år}^{-1}$ (Malm et al. 2016).

Skador som uppstår till följd av inre och yttre åverkan uppträder både för ledningar som precis sats i drift och för ledningar som varit i drift under en längre tid. En fjärrvärmelednings livslängd påverkas av korrosionsskador från dess omgivande förhållanden som beror dels på den inre miljön, dvs. vattenkvalité på det strömmande mediet och dels på yttre förhållanden som är ett resultat av mark-

förhållanden, fukt och ventilation. I dagens fjärrvärmesystem är det inre mediet avsaltat och filtrerat med en anpassad alkalisering (Sernhed, Ekdahl & Skoglund 2012). I Sverige har hög vattenkvalité länge varit en aktuell fråga och anses därför inte ha märkbar påverkan på fjärrvärmeledningars livslängd (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015). Yttre korrosion kan uppstå då antingen droppande vatten eller inträngande grundvatten når mediaröret. Då ledningarna är skyddade av antingen plasthöljen för nyare teknik eller kulvertormationer för äldre är det framförallt genom skarvarna som vattnet tränger sig in (Sund 2002). En lokal korrosionshastighet på fjärrvärmerör med mediarör av stål kan vara upp till 0.5 mm/år och för koppar 30 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Laster ovanför fjärrvärmeledningar så som jord- och trafiklaster kan ge upphov till högre skadefrekvens. I synnerhet påverkas äldre kulvertkonstruktioner av trafiklaster (Malm et al. 2016). Lasternas storlek är motsatt beroende av fyllningshöjden för jord- respektive trafiklaster. En fjärrvärmeledning ligger vanligtvis på 0.6 meters djup enligt Svensk Fjärrvärmes (Energiföretagens) läggingsanvisningar. Trafiklasten är dynamisk på ett sätt som jordlasten inte är och kan orsaka vibrationer i marken (Andersson, Molin & Pletikos 1999). Däremot orsakar djupare fyllnadsgrad större risk för sättningar. Enligt en studie gjord av Nilsson, Sällberg & Bergström (2006) över kostnader förknippade med förläggingsarbeten analyserades bland annat hur ledningar påverkas av en lägre fyllnadsgrad under en tungt trafikerad gata. I studien framkom det att deformationen på ledningarna var försumbar oavsett fyllnadsgrad vilket tyder på att variablerna trafik- och fjärrvärmelaster är i stort negligerbar. Även Andersson, Molin & Pletikos (1999) har analyserat trafikförhållandens inverkan på skadefrekvensen hos olika ledningstyper i tre olika fjärrvärmesystem. I studien framkom att det inte går att urskilja en trend för trafiklastens inverkan. I samma studie studerades även de geotekniska förhållandena. Där visades att skadefrekvensen är högst för ledningar känsliga för sättningar i områden med lera som har låg vattengenomsläpplighet än med fasta jordarter. Vattengenomsläppligheten av jordarten beskriver hur snabbt vatten tränger sig genom jorden. Den ökade skadefrekvensen i lera kan bero på att sättningsbenägenheten är större i lera än i andra fastare jordarter, men också på att risken för tillfällig dränkning av ledningarna vid bristfällig dränering är störst i lera (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015). Sättningsbenägenheten påverkar framförallt stela kulvertkonstruktioner där sprickor kan uppstå (Malm et al. 2016).

Trafikförhållanden innebär inte enbart högre laster och risk för sättning. Föröreningar i jord nära tung trafik är betydande. Markförhållanden, det vill säga jordtyp och jordegenskaper så som pH, redoxpotential och mängden sulfider har stor inverkan på fjärrvärmeledningar (Tereshchenko & Nord 2016). Jordarter med låg genomsläpplighet fylls med grundvatten vid kraftig nederbörd (Andersson, Molin & Pletikos 1999). En högre grundvattennivå medför dessutom ett temporärt ökat yttre vattentryck och risk för vatteninläckage (ibid.). Utöver högre risk för korrosion kan höga grundvattennivåer ge mekaniska påfrestningar på fixeringen av fjärrvärmerör (Energimyndigheten 2015). Omgivningsförhållanden är något som kan förändras med tiden, exempelvis vid trafikomläggningar och förändring-

är i grundvattenförhållanden, vilket gör det mycket komplex (Andersson, Molin & Pletikos 1999)

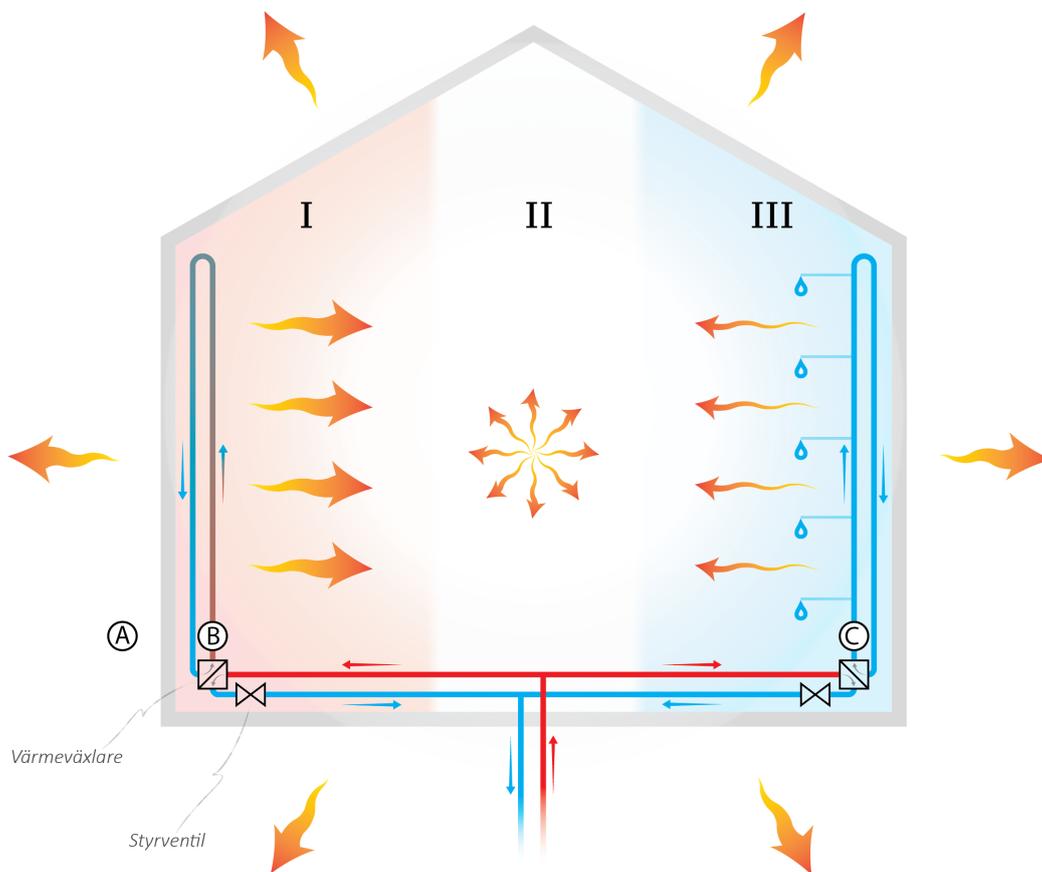
Den exakta placeringen av en ledning relativt ytliga bebyggelser kan påverka skadefrekvensen. Placeringen kan till exempel påverka risken för grävskador, när ett orelaterat grävarbete råkar träffa en ledning. Vid schaktningsarbete i närheten av en ledning rubbas jordlagren vilket kan ge upphov till sättningar, vilket är en större risk i jordarter som är löst lagrade. Beroende på bebyggelsen kan det dessutom förekomma temperaturförändringar i marken (Tereshchenko & Nord 2016). En modell utvecklad av Cooke & Jager (1998) på skadefrekvens i underjordiska gasledningar visar att sannolikheten för skador till följd av störningar från en tredjeparts verksamhet är större än sannolikheten för skador till följd av korrosion. Även i Öresundskrafts nät verkar en betydande del av skadorna orsakas av grävarbeten och i deras statistik kopplas omkring en tiondel av skadorna till detta.

En större nominella diameter på mediarören (DN) innebär oftast bredare väggar. Kwona & Leeb (2011) visade att tjockare rör hade lägre sannolikhet för skador. Däremot visade Tereshchenko & Nord (2016) också att rör med större diameter hade större sannolikhet för skador. Detta skulle kunna förklaras av en större yta-rea. Dessutom visade Frederiksen & Werner (2014) att kvoten mellan diameter och väggtjocklek tenderar att vara mindre för större rör vilket i sin tur kan göra ledningen mer utsatt för böjningsmoment vid större trafikklaster. I Öresundskrafts databas är ledningarnas diametrar framtagna men tjockleken på ledningarna är okända. Att få fram ett samband mellan skadefrekvens, diameter och väggtjocklek kan likväl göras då de olika dimensionerna på ledningstyperna i Öresundskrafts nät till största del är av samma fabrikat och bör därför ha samma tjocklek relaterat till diametern.

Enligt Tereshchenko & Nord (2016) finns det ett samband mellan höga tryck och skador i ledningarna. Detta visar sig exempelvis genom att olyckor främst inträffar under vintermånaderna med anledning av det förhöjda värmebehovet och kylan som försvagar rören.

3.2 Energibalans för en byggnad

Figur 6 visar en förenklad bild över en byggnads energibalans. Enligt bilden har byggnaden tre värmekällor: rumsuppvärmning (I), interna tillskott (II) som i detta arbetet exkluderar tillskott från varmvatten och tillskott från varmvatten (III). Bilden visar också värmeförluster ut från byggnaden. Allt detta kommer beskrivas i mer detalj. I figuren kan ledningarna delas in i fram- och returledning. I fjärrvärmenätet är framledningarna de ledningar som går till kundens värmeväxlare och returledningen går från kundens värmeväxlare. I byggnadens värmesystem är framledningarna de ledningar som går från värmeväxlarna och returledningar de som går tillbaka till värmeväxlarna.



Figur 6: En förenklad översiktsbild över energiflöden i en byggnad med fjärrvärme. Byggnaden är indelad i tre delar för att visa olika värmetillskott. De vågade orangea pilarna visar värmeöverföringar, dessa är inte ämnade att läsas kvantitativt. Färgkodningen av ledningarna är inte exakt, men blått indikerar temperaturer på omkring 53 °C och lägre medans rött indikerar temperaturer över 53 °C. Där den röda ledningen kommer in i byggnaden är det typiskt 70-120 °C.

3.2.1 Rumsuppvärmning (I)

Rumsuppvärmningen värmer byggnaden genom exempelvis element och golvvärme. Av de tre värmekällorna är detta den enda källan som styrs utifrån byggnadens värmebehov. Styrningen görs av en reglerenhet som mäter utomhustemperaturen (punkt A) och utifrån denna beräknas ett börvärde på den så kallade framledningstemperaturen vid punkt B med en funktion (Frederiksen & Werner 2014). Börvärdet är det önskade värdet på framledningstemperaturen. Beräkningen av börvärdet måste anpassas efter varje byggnads förutsättningar och kan exempelvis behöva ändras om byggnaden får mer isolering och därmed får ett lägre värmebehov vid en given utetemperatur. Reglerenheten styr framledningstemperaturen genom att justera styrventilen som stryper eller öppnar upp flödet genom värmeväxlaren på fjärrvärmesidan. Så till exempel om kontrollenheten mäter att framledningstemperaturen vid punkt B är lägre än börvärdet för den aktuella utomhustemperaturen kommer den öppna upp styrventilen och på så sätt öka flödet av varmvatten på fjärrvärmesidan vilket kommer öka värmeöverföringen till rumsuppvärmningssidan och på så sätt höja framledningstemperaturen. Kontrollenheten mäter alltså inte inomhustemperaturen och det finns ingen feedback däremellan; om kontrollenhetens beräkningar inte stämmer med verkligheten kommer inomhustemperaturen bli fel utan att kontrollenheten får reda på detta (ibid.).

3.2.2 Interna tillskott (II)

Till interna värmetillskott kommer från en mängd olika källor, såsom elektriska apparater och människor. Tillskotten genererar värme utöver det som kommer från fjärrvärmenätet och höjer på så sätt inomhustemperaturen. Detta sker dynamiskt och förändras med människors beteende. Ett typiskt schablonvärde för interna värmetillskott i bostäder är 5 W/m^2 genomsnittligt under ett år, varav personvärme utgör 1.5 W/m^2 och elapparater 3.5 W/m^2 (U. Ottosson et al. 2013). Under sen vår och tidig höst har särskilt solinstrålning en betydande inverkan vilket förkortar uppvärmningssäsongen.

3.2.3 Tillskott från varmvatten (III)

Det sista värmetillskottet som detta arbetet behandlar är värmen som avges från varmvattenledningar. Hur stort detta tillskottet är kan variera mycket mellan olika byggnader.

Värme avges alltid från varmvattenledningar. När vatten i en ledning blir stillastående kommer det svalna. Om vattnets temperatur sjunker för mycket finns det risk för tillväxt av legionella. Enligt Boverkets regler måste varmvattnet i ledningarna vara minst $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Avsvalnat vatten innebär också en fördröjning när en användare vill ha varmvatten ur en kran eftersom allt det avsvalnade vattnet mellan kranen och värmeväxlaren först måste spolas igenom. Avsvalnat vatten är inte ett så stort problem i villor där mängden vatten i ledningarna mellan kran och värmeväxlare är väldigt liten, men i stora flerbostadshus med mycket ledningar är det mer

aktuellt att undvika att varmvattenledningarna svalnar.

I Figur 6 har byggnaden en loop med ständigt cirkulerande vatten på tappvarmvattensidan som går genom värmeväxlaren. Precis som för rumsuppvärmningen finns det en kontrollenhet som här styr framledningstemperaturen vid punkt C till att alltid vara omkring 53-55 °C (Svensk Fjärrvärme 2014) för att säkerställa att vattnet i loopen inte sjunker under 50 °C. Detta innebär att vatten bara står stilla i ledningssträckor från loopen till kranar vilket, precis som för villor, begränsar mängden stillastående vatten till en acceptabel nivå. Detta systemet kallas för varmvattencirkulation (Frederiksen & Werner 2014). I byggnader med varmvattencirkulation finns det alltså alltid en loop med vatten över 50 °C som avger värme till byggnaden och dessa byggnader kan därmed väntas ha större värmertilskott från varmvatten än exempelvis villor.

Eftersom värmen som avges kommer från fjärrvärmenätet är denna värmen i många aspekter samma som värmen från rumsuppvärmningen. En skillnaden är att värmertilskottet från varmvatten inte styrs av husets uppvärmningsbehov utan är relativt konstant över tid.

3.2.3.1 Värmeförluster

All värme som byggnaden tar upp försvinner förr eller senare till omgivningen. Det är dessa värmeförluster som utgör byggnadens värmebehov. Värmeförlusterna uppkommer till följd av konduktion och strålning genom väggar samt uppvärmning av inkommande ventilation och antas vara linjära med skillnaden mellan inomhustemperaturen och utomhustemperaturen.

Storleken på värmeförlusterna skiljer sig åt, både mellan de olika vägarna och också över tid. Om någon till exempel öppnar ett fönster eller ventilationen ändras kommer byggnadens värmeförluster påverkas. Dessa variationerna anses dock inte relevanta i sammanhanget för detta arbetet.

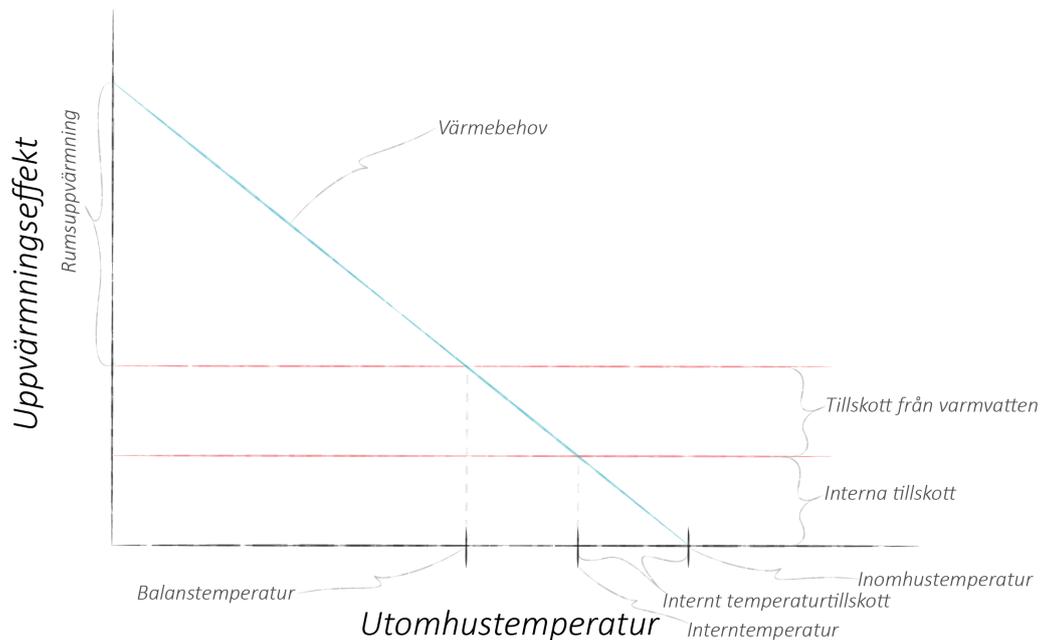
3.2.4 Principbild

I Figur 7 visas en förenklad bild av en byggnads värmebehov över utomhustemperaturen och hur de tre värmekällorna bidrar till att nå denne. I figuren syns att interna värmertilskott och tillskott från varmvatten antas vara konstanta över utomhustemperaturen, vilket vid höga utomhustemperaturer innebär att byggnaden har högre värmertilskott än behov. Vid låga temperaturer behövs rumsuppvärmningen för att kunna möta byggnadens värmebehov. Tappvarmvatten däremot behövt året runt och utgör omkring 1/5 av det totala uppvärmningsbehovet för lokaler och 1/3 för flerbostadshus (Andreasson, Borgström & Werner 2009:4). Det senare har ofta en högre varmvattencirkulationen gentemot den totala uppvärmningen av tappvarmvatten då den konstanta cirkulationen kan tillgodoräknas som ett tillskott i byggnadens rumsuppvärmning enligt (III). Den utomhustemperaturen då interna värmertilskott tillsammans med tillskott från varmvatten exakt matchar uppvärmningsbehovet kallas för "balanstemperaturen". Den utomhustemperaturen

ren då de interna värmertilskotten själva matchar uppvärmningsbehovet kommer fortsättningsvis benämnas "interntemperaturen". Som nämnt i avgränsningarna kommer arbetet endast behandla uppvärmningssäsongen, vilket innebär att utomhustemperaturen är någonstans under balanstemperaturen.

I bilden syns också antagandet om att värmebehovet är linjärt med utomhustemperaturen. Absolutbeloppet av denna linjens lutning beskriver värmebehovet per grad. Detta är byggnadens värmeöverföringskoefficient och kan beräknas genom att dela skillnaden i uppvärmningseffekt mellan två punkter på linjen med skillnaden i utomhustemperatur.

Effekt- värme- och temperaturtillskott har alla olika betydelser. I detta arbetet kommer endast värmeenergi att behandlas och därmed kommer effekt- och värmertilskott att användas synonymt beroende på sammanhang. Temperaturtillskottet refererar till den resulterande temperaturökningen från ett värmertilskott. Men eftersom värmebehovet antas vara linjärt med utomhustemperaturen är värme- och temperaturtillskott i någon mening ekvivalenta eftersom båda medför den andra.



Figur 7: En förenklad bild av en byggnads uppvärmningsbehov över utomhustemperaturen. Den blå linjen visar en byggnads värmebehov. De två röda linjerna visar interna värmertilskott och tillskott från varmvatten. Dessa tillskottet är ut ritade som lika stora av estetiska skäl och måste inte vara fallet. bilden är inte ämnade att läsas kvantitativt.

3.2.5 Tidskonstanten

Hur snabbt byggnadens temperatur påverkas vid avbrott beror dels på hur stora värmeförlusterna är och dels på byggnadens värmekapacitet. En byggnads tidskonstant är kvoten mellan dess värmekapacitet och dess värmeförluster per grad och beskriver alltså denna trögheten (Selinder & Zinko 2003). Värdet på tidskonstanten kan tolkas som tiden det tar för en byggnads inomhustemperatur att sjunka med ungefär 63 % relativt utomhustemperaturen. Vanliga schablonvärden för tidskonstanten är allt mellan 30h för äldre, lättare byggnader och 300h för tyngre, nyare byggnader (Frederiksen & Werner 2014).

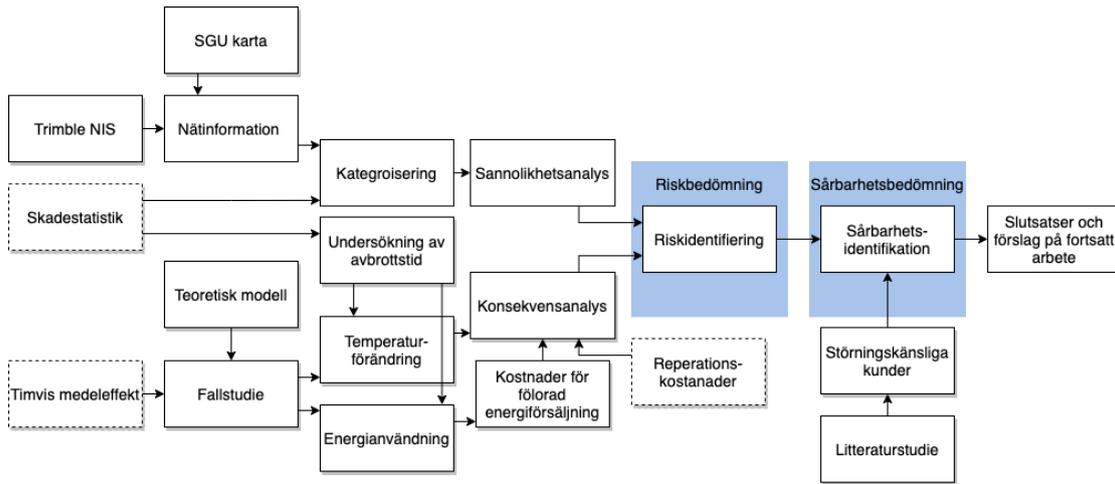
3.2.6 Dimensionerande vinterutetemperatur

En byggnads värmesystem har en viss maxeffekt. Vid någon utomhustemperatur kommer byggnads effektbehov överstiga denna maxeffekten och då kommer inte längre värmesystemet kunna upprätthålla den önskvärda inomhustemperaturen, vilken kommer börja sjunka. Boverket och SMHI har tagit fram "dimensionerande vinterutetemperaturer" (DVUT). Dessa är de utomhustemperaturerna som byggnader på olika platser i Sverige ska dimensioneras efter. DVUT beror inte bara på platsen utan också på tidskonstanten. Till exempel så är DVUT för en byggnad med en tidskonstant på 3 dygn den kallaste 3-dygnsmedeltemperaturen som väntas inträffa 30 gånger på 30 år på den specifika platsen där byggnaden är belägen (Boverket 2017).

4 Metod

Kapitlet ämnar att ge förståelse för studiens metod och beskriva arbetsprocessen med kategorisering, bearbetning av ingående data, antaganden och beräkningar.

För att bedöma riskerna och sårbarheterna i fjärrvärmenätet delades riskidentifieringen upp i två delar: sannolikhetsanalys och konsekvensanalys. Metodens övergripande process presenteras i Figur 8.



Figur 8: Processträdsbild över metoden för risk- och sårbarhetsbedömning. De streckade symbolerna markerar data från Öresundskraft.

I arbetet behandlades data som har erhållits från Öresundskraft i form av skadestatistik, timvis medeleffekt, samt kostnader för återställning och reparation.

Som underlag för sannolikhetsanalysen gjordes en litteraturstudie över vilka parametrar som kan tänkas påverka skadefrekvensen. Detta kombinerades med en inventering över vilken data som finns tillgänglig i datan över skadestatistik samt hur ledningsnätet kan delas in i nätinformationssystemet Trimble. Därefter beräknades frekvensen av skadorna och trender extrapolerades.

Konsekvensanalysen delades in i tre segment. Den första, varaktighet av avbrott, uppskattade avbrotts-tiden för varierande storlekar av ledningar från data över skadestatistiken. Det andra och tredje segment tog fram en modell över förändringen i inomhustemperatur och energianvändning som sedan verifierades med en fallstudie över ett verkligt avbrott. Därefter beräknades de kostnader som de förlorade intäkterna för energianvändning innebär för fjärrvärmeleverantören.

Slutligen analyserades sannolikheter och konsekvenser tillsammans med en litteraturstudie över vad som utmärker en störningskänslig kund identifierade sårbara ledningssträckor.

4.1 Sannolikhet för skador

För att få en uppfattning om ledningarnas status och förväntad livslängd gjordes en statistisk analys baserat på ett antal beskrivande parametrar. Därefter samlades relevant data in och bearbetades för att kunna undersöka de valda parametrarna. Efter datainsamlingen kunde trender analyseras och kurvor togs fram för att beskriva ledningars skadefrekvens med konfidensintervall.

4.1.1 Kategorisering

Parametrar som i denna analys allokerades till ledningen är ledningstypen i sig, dvs. material och konstruktion, dess nominella diameter, dvs. standarddimension av inre diameter, installationsåret samt ålder av ledning. För omgivande förhållanden studerades parametern genomsläpplighet hos den omkringliggande jordarten. Valet av ingående parametrar baserades i första hand på vad som i litteraturen utpekades som förklarande variabler men också på den information som fanns tillgänglig i databasen för skadestatistik från Öresundskraft.

4.1.1.1 Ledningsålder

För att analysera om någon av ledningssträckorna börjar uppnå sin tekniska livslängd studerades fördelningen av skadefrekvensen över åldern för alla parametrar. Delar av Öresundskrafts nät har varit i drift sedan år 1964 vilket innebär att ett antal ledningstyper har varit i drift i 55 år.

4.1.1.2 Ledningstyp

Arbetet studerade fem olika ledningstyper: BTG, ACE, PVC, PEH och AQ. En vidare indelning i subtyper till följd av olika fabrikat och konstruktion- och installationsprocesser gjordes inte med anledning av bristande information. Däremot utmärker installationsåret, som är en inkluderad variabel, i hög grad subtyperna.

4.1.1.3 Installationsår

Året för installationen reflekterar faktorer såsom val av konstruktörens erfarenhet, skicklighet och kännedom om markförhållanden, val av fabrikat, teknik och förläggningsslag samt den tillfälliga utbyggnadstakten. Installationsåren delas upp i intervall vid datainsamlingen. Uppdelningen gjordes då vid varje decenniumskifte från 1964 till 2019.

4.1.1.4 Nominell diameter

Av praktiska begränsningar behövde de nominella diametrarna delas upp i intervall. Eftersom olika dimensioner användes för olika ledningstyper bestämdes gränserna för uppdelningen separat för varje ledningstyp så att samtliga ledningstyper fick fyra intervall. Dessa intervall presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: Gruppering av nominell diameter för enskilda ledningstyper.

BTG	ACE	PVC	PEH	AQ
DN100-DN400	DN25-DN40	DN20-DN32	DN18-DN40	DN15-DN22
DN500	DN50-DN70	DN40-DN65	DN42-DN100	DN25-DN32
DN600	DN80-DN125	DN70-DN100	DN125-DN250	DN35-DN54
DN700	DN150-DN300	DN125-DN400	DN300-DN600	DN54-DN128

Att indelningen för de olika ledningarna inte är likadana för alla ledningstyper är likgiltigt då ledningarna vidare kommer att delas upp i ledningstyper.

4.1.1.5 Genomsläpplighet av jordart

Öresundskraft hade ej inkluderat geotekniska förhållanden varken i sitt informationssystem eller i sin skadestatistik. Inom ramen för examensarbetet observerades inte alla geotekniska förhållanden för olika ledningstyper utan istället valdes parametern genomsläpplighet för omkringliggande jordart då den ansågs som förhållandevis simpel att undersöka samtidigt som endast ett fåtal ledningar i databasen över skadestatistik visades ha dränering.

Informationen om jordens genomsläpplighet togs fram i kombination med en karta över markens genomsläpplighet från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). I kartan finns tre klasser av genomsläpplighet: låg, medelhög och hög som baseras på jordartens kornstorlek. Kartan tar inte hänsyn till läge i terrängen, mätnadsgrad, lager eller grundvattennivå som alla påverkar en jordarts förmåga till genomsläpplighet (SGU n.d.).

4.1.1.6 Uteslutna variabler

Påverkan av inre variabler så som tryck, temperatur och vattenkvalité exkluderades helt. Anledningen till detta är att vattenkvalitén i svenska fjärrvärmenät generellt håller hög standard och att det i denna analys inte spelar någon roll nät på året en olycka antas ske. Dessutom kan effekten för de olika ledningarna antas vara starkt beroende av dess diameter som redan är en inräknad variabel. Ett antal variabler som påverkar den yttre miljön har valts att uteslutas. Den främsta av dessa är andra jordegenskaper utöver genomsläpplighet, så som sättningsbenägenhet. Även grundvattennivå och jord- och trafikklaster exkluderades. Placeringen är en svår faktor att konkretisera då det finns många mekanismer genom vilka den kan påverka skadefrekvensen. På grund av detta ansågs det inte praktiskt genomförbart att inkludera en parameter för placeringen inom omfånget av denna studie. Placeringen är emellertid en faktor som hade kunnat visa sig intressant att undersöka närmare.

4.1.2 Datainsamling och bearbetning

Benämningen “ledningskategorier” som kommer att användas härnäst syftar till kategoriseringen av ledningssträckorna efter alla valda parametrar med undantag av åldern. Varje kategori är således en kombination av ledningstyp, installationsår, nominell diameter och genomsläpplighet. Ett exempel på en ledningskategori är ledningstyp PEH, installerat på 90-talet, nominell diameter mellan DN42 och DN100 och i mark med hög genomsläpplighet. Sammantal finns 360 möjliga ledningskategorier. All data som samlades in måste således höra till en specifik ledningskategori.

För att kunna beräkna sannolikhet för att en skada ska inträffa måste data samlas in dels på antal skador och dels på ledningslängder och hur länge de har legat i marken. Denna storhet kommer i detta arbete benämnas som ledningarnas “kilometerår” för att reflektera enheten $\text{km} \cdot \text{år}$. Om till exempel två olika ledningar har lika många noterade skador men den ena är dubbelt så lång eller legat i marken dubbelt så länge så kommer dennes kilometerår vara dubbelt så stort och den beräknade sannolikheten för denne därmed hälften så stor.

4.1.2.1 Skadestatistik

Sedan år 1977 har Öresundskraft kontinuerligt manuellt registrerat alla skador som inträffat i deras nät i en intern databas. Skador sedan 1964 har lagts in i efterhand. I databasen finns drygt 1300 skador registrerade där följande information är noterat till de flesta fallen:

- Ledningstyp
- Installationsår
- Ålder
- Nominell diameter
- Sätt för upptäckt
- Primärorsak
- Avbrottets varaktighet
- Adress

Från skadelistan uteslöts skador med ofullständig tillhörande information i fall där någon av de valda parametrarna saknades.

Skadelistan kompletterades med information om den omkringliggande markens genomsläpplighet. Detta gjordes med hjälp av SGU:s karta över genomsläpplighet (SGU n.d.) där genomsläppligheten vid varje skadas angivna adress kontrollerades.

4.1.2.2 Ledningslängd

Öresundskraft har sitt fjärrvärmenät inlagt i nätinformationssystemet Trimble. I systemet går det bland annat att få fram ledningslängder filtrerat på olika parametrar. Samtliga parametrar som arbetet undersöker finns att filtrera på förutom markens genomsläpplighet. Genom att filtrera på de parametrar som finns fås således summan av ledningslängder för liknande ledningskategorier där endast genomsläppligheten skiljer sig.

På grund av svårigheter vid filtreringen i Trimble gjordes ett antagande om att ingen ledning byts ut och därmed att alla ledningar som har installerats finns kvar i marken idag. Detta antagandet kommer att undersökas i en känslighetsanalys.

Trimble genererar också en karta över Helsingborg där de filtrerade ledningarna är inritade. Denna kartan användes för att dela upp den angivna ledningslängden för de tre nivåerna av genomsläpplighet mellan varandra. Detta gjordes genom att lägga den givna kartan över SGU:s karta över genomsläpplighet (SGU n.d.) för att se hur stor andel av sträckan som fanns för respektive genomsläpplighet. Ledningslängden för respektive ledningskategori beräknades i ett Java-program. Programmet beräknade andelarna av längden för respektive genomsläpplighet genom räkna hur stor andel av de utritade ledningarnas pixlar som låg på respektive genomsläpplighet.

4.1.2.3 Justerad ledningslängd för känslighetsanalys

Antagandet om att inga ledningssträckor försvinner gjordes eftersom det visade sig svårt att få ut information om ersatta ledningsträckor från Trimble. För att undersöka antagandet gjordes en känslighetsanalys.

Först uppskattades den ersatta ledningslängden över tid. Ledningslängder byts ut vid reparation av skada. Hur lång sträcka som byts ut vid en reparation beror på ledningstypen och skadan, men ofta byts så lite som möjligt. De olika ledningstyperna installeras i segment om 6 till 12 meter och beroende på ledningstyp och skada kan det räcka att byta ett segment. För AQ-ledningar kan en längre sträcka behöva bytas om till vatten runnit in i isoleringen. För PVC-ledningar byts gärna mer än nödvändigt. I Tabell 4 visas de segmentlängderna som Öresundskraft huvudsakligen använder sig av för de olika ledningstyperna. I tabellen finns också de uppskattade ledningslängden som antogs ersättas vid ett avbrott i beräkningarna för den korrigerade ledningslängden.

Tabell 4: Segmentlängder för de olika ledningstyperna och de antagna utbytta ledningslängderna vid avbrott för de korrigerade ledningslängderna till känsligheten.

	BTG	ACE	PVC	PEH	AQ
Segmentlängd	12 m	6 m	6 m	12 m	12 m
Korrektionslängd	15 m	10 m	50 m	20 m	50 m

4.1.3 Beräkning av skadefrekvens och fördelningsfunktion

I nästa steg beräknades antal skador per kilometerår som i detta arbete kommer att benämnas "skadefrekvens" men som egentligen inte är en diskret frekvens.

Den insamlade datan analyserades med tre olika metoder. Först grupperades ledningskategorierna efter parametrarna ledningstyp och installationsår. Skadefrekvensen inom dessa grupperna plottades sen över ledningsåldern vart femte år, och en weibullfördelning passades till grupper med installationsår 80-tal och tidigare. Ingen kurva passades till grupper med kort ledningslängd eller få skador. Runt de passade weibullfördelningarna beräknades 90-procentiga konfidensintervall med en poissonfördelning.

För att analysera parametern nominell diameter grupperades ledningskategorierna efter parametrarna ledningstyp och nominell diameter. För varje grupp beräknades sen skadefrekvensen och ett 90-procentigt konfidensintervall med en poissonfördelning.

Till sist analyserades parametern genomsläpplighet. Detta gjordes på ett liknande sätt som för den nominella diametern, men där ledningskategorierna istället grupperades efter parametrarna ledningstyp och genomsläpplighet.

4.1.3.1 Passning av weibullfördelningar

För att passa weibullfördelningarna användes minstakvadratmetoden på en modifierad tvåparameterweibull täthetsfunktion. I denna har en stretchfaktor introducerats som skalar kurvan vertikalt och gör att den kan passa till data med godtyckliga y -värden. Det antogs också att spridningen i datan var multiplikativ och inte additiv och därför logaritmerades hela kurvan. Den logaritmerade kurvan med stretchfaktorn passades sen till logaritmerad data från respektive grupp med minsta kvadraten metoden. I Ekvation 1 visas en vanlig tvåparameterweibull. I Ekvation 2 visas en tvåparameterweibull med den introducerade stretchfaktorn. I Ekvation 3 visas den loggade tvåparameterweibullen med en stretchfaktor som passades till den loggade datan.

$$y = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (1)$$

$$y = c \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (2)$$

$$\ln(y) = \ln\left(c \frac{b}{a}\right) + (b-1) \ln\left(\frac{x}{a}\right) - \left(\frac{x}{a}\right)^b \quad (3)$$

Där y antas vara väntevärdet av skadefrekvensen, x är ledningsåldern, a är skal-parametern, b är form-parametern och c är den introducerade stretch-termen

4.1.3.2 Beräkning av konfidensintervall

Årliga ledningsskador antogs att vara oberoende av varandra och därmed följa en poissonfördelning. I Ekvation 4 visas poissonfördelningens fördelningsfunktion. Poissonfördelningen beskriver sannolikheten att observera n antal skador givet något λ . λ kan bland annat tolkas som "väntevärdet" som i detta sammanhang är detta det förväntade antalet skador eller det teoretiska medelvärdet av skadorna. För att beräkna ett 90-procentigt konfidensintervall runt en skadefrekvens behöver denna först konverteras till motsvarande antal skador genom att multiplicera med antalet kilometerår. Antalet skador sattes sen in som λ i poissonfördelningen och n beräknades för 5- respektive 95-percentilen vilket användes som gränserna för konfidensintervallet och dividerades med antalet kilometerår för att konvertera tillbaka till skadefrekvens.

$$P(n) = e^{-\lambda} \sum_{i=0}^n \frac{\lambda^i}{i!} \quad (4)$$

Där λ är väntevärdet tillika variansen, n är antalet observerade skador (en konstant) och $P(n)$ är den ackumulativa sannolikheten för väntevärden $\leq n$ (Giles 2015).

Eftersom poissonfördelningen är en diskret fördelning blir n vid de beräknade percentilerna heltal. Vid beräkningarna av konfidensintervallen runt de framtagna weibullfördelningar blir resultatet därmed okontinuerliga funktioner med diskreta trappsteg. Dessa funktioner jämnades ut genom att passa tredjegrads polynom.

4.2 Utvärdering av avbrottets varaktighet

I datan över skadestatistik finns avbrottets varaktighet angiven för 183 av avbrotten, omkring 15 %. Avbrotten sorteras enligt ledningarnas nominella diametrar och grupperas sedan. För grupperingen användes uppdelningen för servis-, distribution-, och stamledning i Tabell 1 och medelvärdet beräknades för respektive grupp.

Då spridningen i avbrottets varaktighet var stor undersöktes medelvärdets signifikans för grupperna genom envägs variotionsanalys. Variansanalys (Analysis of Variance, ANOVA) används för att undersöka om det finns skillnad i medelvärde mellan olika grupper av oberoende variabler eller om stickprovsmedelvärdena beror på slumpen. För att studera vilka grupper som signifikant skiljer sig från andra utfördes även Multiple Comparisons Tests (MCTs).

För var och en av de tre grupperna passades en weibullfördelning till spridningen av avbrottens varaktighet. Från weibullfördelningarna beräknas också ett 90 % konfidensintervall.

4.3 Modell över förändring i inomhustemperatur och energianvändning

Vid avbrott påverkas både tillgången på varmvatten och rumsuppvärmning. Tillgången till varmvatten försvinner snabbt och är förhållandevis enkelt att beskriva, men en byggnads inomhustemperatur är ett betydligt trögare och mer komplext system. Av denna anledningen kommer detta avsnittet helt att fokusera på rumsuppvärmningen.

För att undersöka konsekvenserna av ett avbrott med avseende på inomhustemperatur och energianvändning togs en modell fram från en teoretisk grund som beskriver hur byggnadens inomhustemperatur påverkas under och efter ett avbrott. Från detta uppskattades också hur byggnadens energianvändning påverkas.

4.3.1 Modellens grund

Modellen utgår från en energibalans för en byggnad enligt Ekvation 5 som skrivs om till Ekvation 6 & 7

$$P_{in} = P_{ut} + P_{ack} \quad (5)$$

$$P_{in} = \Delta T K + \dot{T}_{inne} C \quad (6)$$

$$\Delta T = T_{inne} - T_{intern} - T_{ute} \quad (7)$$

Där P_{in} är värmeeffekten till byggnaden exklusive interna värmekällor, P_{ut} är värmeeffekten från byggnaden exklusive den från interna värmekällor, P_{ack} är den ackumulerade värmeenergin i byggnaden, ΔT är skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen, K är byggnadens värmeöverföringskoefficient, T_{inne} är temperaturen inuti byggnaden, C är byggnadens värmekapacitet, T_{intern} är det interna temperaturtillskottet och T_{ute} är utomhustemperaturen.

Ekvation 5 beskriver ett generellt system, men i detta fall ska P_{in} och P_{ut} inte inkludera flöden från andra värmekällor än fjärrvärmenätet, interna värmetillskott och liknande ska alltså räknas bort. Detta görs i Ekvation 6 genom att definiera ΔT som skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen. Ekvation 7 beskriver ΔT matematiskt.

4.3.2 Inomhustemperatur

Vid applicering av modellen antogs att värmeeffekten till en byggnad blir noll när avbrottet inträffar och att den stannar på noll tills dess att fjärrvärmen är återställd. Denna tidsperiod kommer benämnas "avbrottsperiod". Så fort fjärrvärmen är återställd antas byggnaden få en förhöjd tillförd effekt gentemot det normala och att denna är konstant tills dess att byggnadens inomhustemperatur är återställd. Denna tidsperioden kommer benämnas som "återställningsperiod".

Avbrottsperioden och återställningsperiod tillsammans kommer benämnas “avbrottsförloppet” och allting före och efter avbrottsförloppet antas vara vanlig drift då både inomhustemperatur och tillförd värmeeffekt är normala.

För att uppskatta hur inomhustemperaturen beter sig under avbrottsperioden antas P_{in} vara noll i Ekvation 6 och ekvationen löses sedan för ΔT . Den resulterande funktionen visas i Ekvation 8.

För att uppskatta hur inomhustemperaturen beter sig under återhämtningsperioden antas P_{in} vara förhöjd i Ekvation 6 och ekvationen löses sedan för ΔT . Den resulterande funktionen för detta visas i Ekvation 9.

$$\Delta T_{avb} = \Delta T_0 e^{-\frac{1}{\tau}t} \quad (8)$$

$$\Delta T_{\text{äter}} = \frac{P_{\text{äter}}}{K} + \left(\Delta T_{t_{avb}} - \frac{P_{\text{äter}}}{K} \right) e^{-\frac{1}{\tau}(t-t_{avb})} \quad (9)$$

Där ΔT_{avb} är skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen under avbrottsfasen, ΔT_0 är skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen vid tiden precis före avbrottet inträffade, τ är tidskonstanten, t är en tidsvariabel, $\Delta T_{\text{äter}}$ är skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen under återhämtningsperioden, $P_{\text{äter}}$ är tillfälligt höjda värdet på P , $\Delta T_{t_{avb}}$ är skillnaden mellan utetemperaturen och interntemperaturen vid tidpunkten då värmeleveransen återupptas och t_{avb} är avbrottets varaktighet.

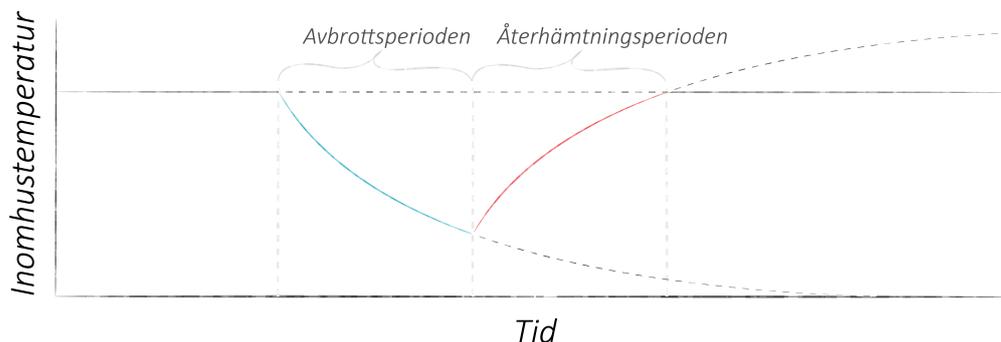
Följande Ekvationer 10 & 11 användas för att beräkna konstanta termer i Ekvation 9.

$$K = \frac{P_0}{\Delta T_0} \quad (10)$$

$$\Delta T_{t_{avb}} = \Delta T_0 e^{-\frac{1}{\tau}t_{avb}} \quad (11)$$

Där P_0 är den normala uppvärmningseffekten före avbrottet.

En principsketch av hur modellen beter sig vid ett avbrott visas i Figur 9. Denna baseras inte på någon data utan är endast till för att ge läsaren en bild av modellen. Den framtagna modellen ser byggnaden som helt homogen utan interna temperaturvariationer.



Figur 9: Inomhustemperaturen över tid för ett avbrottsförlopp enligt Ekvation 8 (blå linjen) och Ekvation 9 (röda linjen). Bilden är endast ämnad att underlätta för läsaren i de kommande delarna och ska inte läsas kvantitativt.

Den lägsta inomhustemperaturen under avbrottsförloppet kan beräknas från Ekvation 8 & 7 enligt Ekvation 12.

$$T_{inne,min} = \Delta T_0 e^{-\frac{1}{\tau} t_{avb}} + T_{intern} + T_{ute} \quad (12)$$

Där $T_{inne,min}$ är den lägsta inomhustemperaturen under avbrottsförloppet.

Ekvation 12 kommer användas för att beräkna minskningen i energi för olika avbrottsvaraktigheter och värden på tidskonstanten och för detta behöver resterande parametrar hålls konstanta.

För att se vad som händer med en byggnad i väldigt kalla väder sätts utomhustemperaturen till $-10\text{ }^\circ\text{C}$ vilket är DVUT för byggnader med en tidskonstant på 1 dygn i Helsingborg (Boverket 2017). Inomhustemperaturen sätts till $21\text{ }^\circ\text{C}$ enligt Boverkets rekommendationer för energiberäkningar (Boverket n.d.). Interntemperaturen sätts till $15\text{ }^\circ\text{C}$ baserat på en typisk balanstemperatur på $12\text{--}18\text{ }^\circ\text{C}$ (Frederiksen & Werner 2014). Här antas att temperaturtillskottet från varmvatten är försumbart. Resultatet frändetta presenteras i avsnitt 5.3.1 'Inomhustemperatur' i Figur 20.

Eftersom skillnaden mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen bara är en linjär skalfaktor går det också att beräkna minskningen i temperatur per grad som skillnad mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen genom att sätta denna till 1. Resultatet frändetta presenteras i avsnitt 5.3.1 'Inomhustemperatur' i Figur 21.

4.3.3 Energianvändning

Från Ekvation 8 & 9 går det också att göra en uppskattning på hur byggnadens energianvändning påverkas under ett avbrott.

En byggnads energianvändning under ett avbrott kan beräknas genom att summera timmedeleffekter. Denna metoden kan bara användas i efterhand och ger inte så

stor insikt i vad som ligger bakom resultatet. En annan metod som här kan ge lite mer insikt är att integrera P_{ut} . Genom modellens definition av ΔT så försvinner all energi från fjärrvärme genom P_{ut} samtidigt som P_{ut} inte har någon annan källa. P_{ut} fås genom att multiplicera temperaturskillnaden med värmeöverföringskoefficienten K . Temperaturskillnaden fås från Ekvation 8 & 9. Dessa integreras sen över lämpliga intervall i Ekvation 13 & 14 för att få byggnadens energianvändning under avbrotts- respektive återhämtningsperioden. Återhämtningsperioden är här definierad att sluta då ΔT är återställd.

$$\Delta E_{avb} = P_0 \left(t_{avb} + \tau e^{-\frac{1}{\tau} t_{avb}} - \tau \right) \quad (13)$$

$$\Delta E_{åter} = K \left(\left(\Delta T_0 - \frac{P_{åter}}{K} \right) (t_{\Delta T_0} - t_{avb}) + \tau \left(\Delta T_{t_{avb}} - \frac{P_{åter}}{K} \right) \left(e^{-\frac{1}{\tau} (t_{\Delta T_0} - t_{avb})} - 1 \right) \right) \quad (14)$$

$$t_{\Delta T_0} = t_{avb} - \tau \ln \left(\frac{\Delta T_0 - \frac{P_{åter}}{K}}{\Delta T_{t_{avb}} - \frac{P_{åter}}{K}} \right) \quad (15)$$

Där ΔE_{avb} är den totala energianvändningen som uppstår till följd av avbrottsperioden, $\Delta E_{åter}$ är den totala energianvändningen som uppstår till följd av återhämtningsperioden, $t_{\Delta T_0}$ är den tidpunkten efter avbrottet där byggnaden är helt återställd och beräknas med Ekvation 15.

I Ekvation 13 & 14 är P_0 en linjär skalfaktor för energianvändningen. Det visar sig också att ΔT_0 tar ut sig själv och därmed inte påverkar energianvändningen alls. För att beskriva minskningen i energianvändningen på ett generellt sätt sätts $P_0 = 1$ vilket i resultatet ger minskningen i energianvändning i timmar av normalanvändning, till exempel MWh per normalanvänd MWh/h. På detta vis togs grafer fram för den minskade energianvändningen för olika värden av tidskonstanten. Dessa presenteras i avsnitt 5.3.2 'Energianvändning' i Figur 22.

För att omvandla den minskade energianvändningen till den resulterande kostnaden för fjärrvärmeleverantören användes en kostnad på 71.28 öre per kWh. Detta är Öresundskrafts energipris exklusive moms för lägenheter år 2020. Resultatet från detta presenteras i avsnitt 5.3.2 'Energianvändning'.

4.4 Verifiering av modell

För att testa modellen som togs fram i det föregående avsnittet användes data från värmecentraler vid ett större avbrott i Helsingborg år 2020. Datan bestod av timmedeleffekter under en tidsperiod på fem dygn runt avbrottet, måndagen den 3:e februari till och med fredagen den 7:e februari. Avbrottet inträffade omkring klockan 09:00 den 5:e februari. De direkta reparationskostnaderna för avbrottet blev till följd av lättillgängligt läge relativt små på 500 000 SEK. Totalt hämtades

data nio stora flerbostadshus. Dessa var fördelade mellan två angränsande gator, fyra på Minörgatan och fem på Fyrverkaregatan. Utöver detta hämtades också samma data för de två föregående åren, under vilka det inte förekom något avbrott.

4.4.1 Bearbetning av data

För att från datan uppskatta hur avbrottet påverkade den levererade energin till en fjärrvärmecentral så kommer uppvärmningseffekten som skulle ha uppstått under avbrottsförloppet om det inte vore för avbrottet uppskattas. Detta görs genom att beräkna normaliserade timmeffektvärden från de två föregående årens data och sen anpassa dessa till avbrottsårets utomhustemperatur. Timmedelvärden på utomhustemperaturen hämtades från SMHI under tidsperioden för samtliga tre åren (SMHI n.d.) och beräkningen av timmedeleffektvärdena för avbrottsåret visas i Ekvation 16, 17 & 18 tillsammans med Ekvation 19 och 20. I beräkningarna antogs andelen av den tillförda effekten som går till varmvattenanvändning vara 15 %. Detta är lägre än årsmedelvärden (Frederiksen & Werner 2014) för att ta hänsyn till att rumsuppvärmningen utgör en större del av den tillförda effekten i början av februari.

$$qn_{mån}^* = \frac{\frac{Q_{2018,mån-vv}}{\Delta T_{2018,mån}} + \frac{Q_{2019,mån-vv}}{\Delta T_{2019,mån}}}{2} \quad (16)$$

$$qn_{var}^* = \frac{\frac{Q_{2018,tis-vv}}{\Delta T_{2018,tis}} + \frac{Q_{2019,tis-vv}}{\Delta T_{2019,tis}} + \frac{Q_{2018,ons-vv}}{\Delta T_{2018,ons}} + \frac{Q_{2019,ons-vv}}{\Delta T_{2019,ons}}}{4} \quad (17)$$

$$Qn_{2020}^* = [qn_{mån}^*, qn_{var}^*, qn_{var}^*, qn_{var}^*, qn_{var}^*] \times \Delta T_{2020} \quad (18)$$

Där qn är en vektor med normaliserade timmedeleffekter per grad skillnad mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen, Q är en vektor med uppmätta timmedeleffekter, vv är den uppskattade medeltimeffekten som utgörs av varmvattenanvändning, ΔT är en vektor med differensen mellan interntemperaturen och utomhustemperaturen, * anger att varmvattenanvändningen är exkluderad, indexen anger vilken tidsperiod varje vektor täcker; exempelvis innebär "2020, mån" att vektorn innehåller 24 element och täcker varje timme under måndagen år 2020 och Qn är en vektor med normaliserade timmedeleffekter. Indexet "var" innebär att vektorn innehåller 24 element som täcker varje timme under godtycklig vardag exklusive måndag. Enbart ett årtal i indexet, exempelvis "2020" innebär en vektor med 120 element som täcker varje timme under hela femdagarsperioden för det året.

$$vv = \frac{\bar{Q}_{2018} + \bar{Q}_{2019}}{2} \times 0.15 \quad (19)$$

$$\Delta T = T_{inne} - T_{intern} - T_{ute} \quad (20)$$

Där \bar{Q} är medeltimmeffekten för samtliga fem dygn, T_{inne} är inomhustemperaturen, T_{intern} är temperaturtillskottet från interna värmekällor och \mathbf{T}_{ute} är en vektor med timmedelvärden av utomhustemperaturen.

Den beräknade vektorn \mathbf{Qn}_{2020}^* jämfördes med de uppmätta värdena från år 2020 för timmar innan och efter avbrottsförloppet för att undersöka hur väl de beräknade värdena verkade stämma. För att göra denna jämförelsen behövde först den uppskattade medeltimmeffekten från varmvattenanvändningen subtraheras från de uppmätta värdena. Jämförelsen visas i Ekvation 21.

$$\frac{\mathbf{Qn}_{2020,norm}^*}{\mathbf{Q}_{2020,norm} - vv} = \frac{1}{\delta_{sys}} \quad (21)$$

Där δ_{sys} är förhållandet mellan de uppmätta och uppskattade värdena på uppvärmningseffekten som här ses som ett systematiskt fel. Indexet "norm" innebär att vektorerna endast innehåller timmar med tillsynes normal drift utanför avbrottets händelseförlopp.

De uppskattade och uppmätta värdena är såklart inte identiska på grund av diverse slumpmässiga störningar som inte tas hänsyn till i beräkningarna. Jämförelsen visade ett systematiskt fel för de flesta byggnader där \mathbf{Qn}_{2020}^* resulterar i värden inom $\pm 20\%$ av de uppmätta värdena. Detta visar sig ha stor påverkan på energiberäkningarna och för att eliminera denna skillnaden, vilken inte anses höra hemma i beräkningarna, multipliceras de uppskattade värdena med δ_{sys} enligt Ekvation 22. Resultatet är en uppskattning som inte visar någon systematisk avvikelse från de uppmätta värdena under tidsintervallet.

För att få en enklare överblick över hur ett avbrott påverkar byggnadens uppvärmningsbehov divideras den uppmätta datan, \mathbf{Q}_{2020}^* , med resultatet i Ekvation 22. Detta visar alltså avbrottsårets uppmätta effekt i förhållande till vad den effekten som väntas ha uppstått om det inte vore för avbrottet och detta förhållandet kommer fortsättningsvis att benämnas "effektkvot". Beräkningen visas i Ekvation 23.

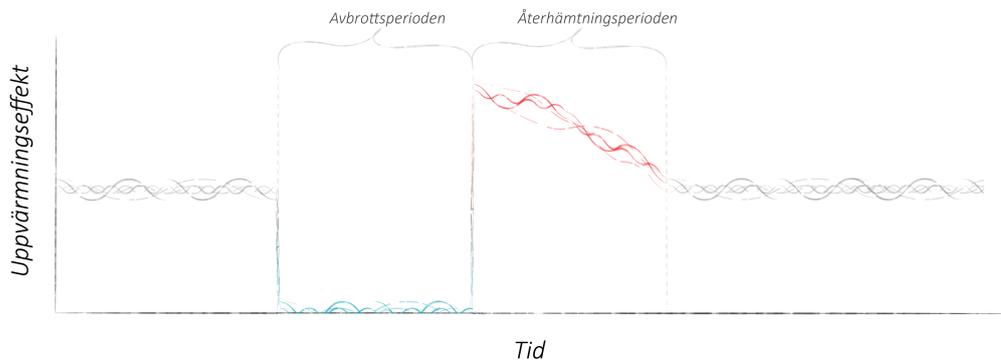
$$\mathbf{Qn}_{2020,korr}^* = \mathbf{Qn}_{2020}^* \times \delta_{sys} \quad (22)$$

$$\mathbf{y} = \frac{\mathbf{Q}_{2020}^*}{\mathbf{Qn}_{2020,korr}^*} \quad (23)$$

Där $\mathbf{Qn}_{2020,korr}^*$ är den vektorn med uppskattade timmedeleffekter som kommer användas som referens för att beräkna hur avbrottet påverkade skillnaden i energikunsumption, \mathbf{y} är ett skalat förhållande mellan de uppmätta och uppskattade timmedeleffekterna: "effektkvoten"; \mathbf{Q}_{2020}^* är de uppmätta timmedeleffekter år 2020 exklusive varmvattenanvändning och $\bar{\mathbf{Qn}}_{2020}^*$ är den uppskattade medeltimmeffekten under 2020.

$\mathbf{Qn}_{2020,korr}^*$ är specifik för varje byggnad och måste beräknas separat för varje enskilt fall. Den processerade datan presenteras i avsnitt 5.3.3 'Processering av

data - resultat' i Figur 23. I Figur 10 visas en principsketch av y för att underlätta för läsaren i den kommande delen.



Figur 10: En exempelbild över hur effektdatan från flerbostadshusen ser ut. Bilden är endast ämnad att underlätta för läsaren i kommande delar och ska inte läsas kvantitativt.

För att beräkna skillnaden i energianvändning används Ekvation 24, resultatet kommer jämföras med Ekvation 13 & 14 från modellen.

$$\Delta E = \sum (Qn_{2020, \text{kor}}^* - Q_{2020}^*) \quad (24)$$

Där ΔE är skillnaden i energianvändning mellan avbrottsåret och det beräknade normalåret. Med summasymbolen menas att vektorerna summeras elementvis. Ekvationen användes på samtliga timmar från och med att avbrottet inträffade.

4.4.2 Inparametrar till modellen

Den framtagna modellen testades först genom att undersöka hur inomhustemperaturen beskriven av Ekvation 8 & 9 beter sig med den verkliga datan som input och om den verkar överensstämma med förväntat beteende. För detta testet användes modellen med två metoder av olika upplösning. I den ena metoden användes medelvärden som är konstanta under hela avbrottsförloppet som input till Ekvation 8 & 9. Den andra metoden är mer detaljerad och använder de uppmätta timmedelvärdena för uppvärmningseffekt och utomhustemperatur.

Ekvation 9 kan ses som en mer generell variant av Ekvation 8, och i den mer detaljerade metoden kommer Ekvation 9 att användas genomgående.

För båda metoderna behöver den normala inomhustemperaturen och det interna temperaturtillskottet uppskattas. Dessa antas vara konstanta under hela avbrottsförloppet. Inomhustemperaturen sätts till 19 °C och det interna temperaturtillskottet till 5 °C. Dessa värden påverkar inte energianvändningen alls i modellen och skalar bara temperaturskillnaden linjärt.

För den detaljerade metoden behövs timmedelvärdena för utomhustemperaturen

vilket redan hämtats från SMHI. För den mindre detaljerade metoden används medeltemperaturen under avbrottsförloppet vilken var 3 °C.

Värmeöverföringskoefficienten, K , i Ekvation 6 uppskattas för båda metoderna genom att dividera den uppmätta medeltimeffekten från före avbrottet med medelvärdet på skillnaden mellan utomhustemperaturen och den uppskattade effektiva inomhustemperaturen.

För den normala effekten, P_0 , i den mindre detaljerade metoden beräknas medeltimeffekten från timmar med tillsynes normal drift. För den mer detaljerade metoden används de uppmätta timmedelvärdena för alla effekter.

För den återkommande effekten, $P_{åter}$, i den mindre detaljerade metoden beräknas medeltimeffekten under den röda återhämtningsperioden i Figur 23. För den mer detaljerade metoden används de uppmätta timmedelvärdena för alla effekter.

Avbrottets varaktighet, t_{avb} , för den mindre detaljerade metoden sätts till 20 timmar och vilket är den blå tidsperioden i Figur 23. För den mer detaljerade metoden behöver inte avbrottets varaktighet i sig anges, utan parametern sätts till 1 eftersom beräkningen görs timme för timme.

Tidskonstanten, τ , är okänd och kommer till en början sättas till 100 timmar för båda metoderna, baserat på ett uppskattat intervall på 80-120 timmar i Wik (2018). En känslighetsanalys kommer genomföras där tidskonstanten också sätts till 50 och 200 timmar för att undersöka hur detta påverkar resultatet. Resultatet presenteras i avsnitt 5.3.4 'Test av framtagen modell' i Figur 24 & 25

4.5 Identifiering av störningskänslighet hos kunder

För att identifiera känsliga kunder gjordes en litteraturstudie. Här var syftet att få svar på vilka lagmässiga krav energiföretagen har på sig för att upprätthålla en hög leveranssäkerhet, vilka nuvarande rekommendationer som finns för olika kundtyper men framförallt hur leveransavbrott påverkar kunden och om förhöjd leveranssäkerhet kan kvantifieras.

För att få en förståelse för de lagmässiga krav och rekommendationer som är förknippade med leveranssäkerhet studerades Fjärrvärmelagen (SFS 2018:729) samt branschens riktlinjer och allmänna avtalsvilkor.

Databaser som LUBsearch användes för information kring kundgrupperingar, rekommenderad varaktighet av avbrott och värdering av betalningsvilja. Energiföretagen kontaktades för att få tillgång till en rapport över kundkostnader.

5 Resultat

Detta kapitel presenterar analysen av skadefrekvens, den förväntade avbrottstiden från olika storlekar av ledning, förändringen i inomhustemperatur och energianvändning vid olika avbrottstider samt vad som i litteraturen särskiljer störningskänliga kunder.

5.1 Sannolikhet för skador

I detta avsnitt följer en presentation av sannolikheten att en skada ska inträffa i en ledning. Skadefrekvensen presenteras med ett årsmedelvärde för parametrarna ledningstyp, nominell diameter och genomsläpplighet för omkringliggande jordart. För parametern installationsår extrapoleras kurvor för tidiga installationsår för att beskriva hur skadefrekvensen kan tänkas förändras med åldern.

5.1.1 Installationsår

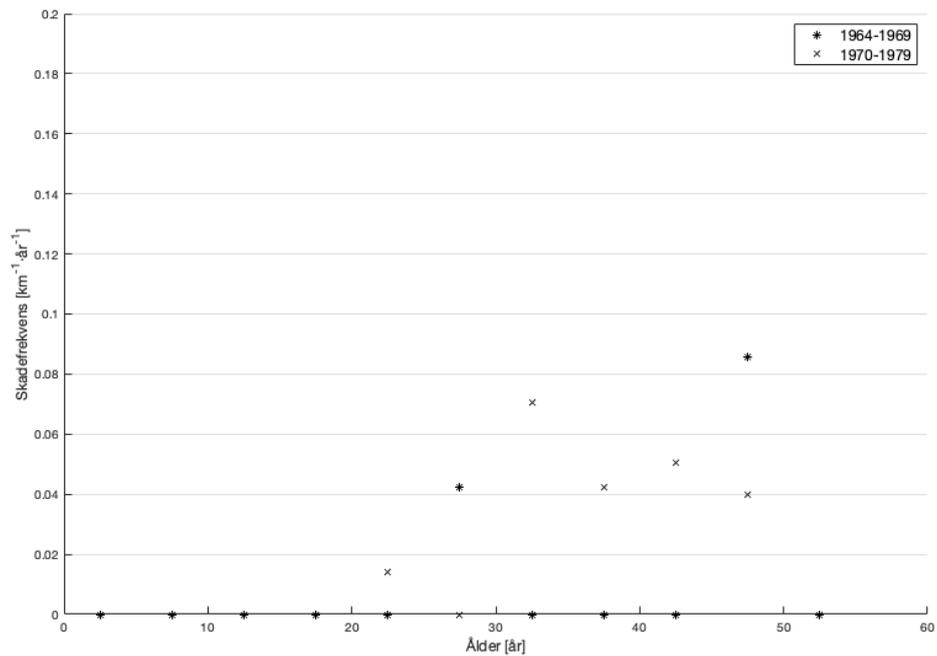
I Tabell 5 presenteras antalet utbyggnaden inom varje ledningstyp och decennium. De rödmarkerade värdena indikerar grupper som uteslutits från resterande resultat på grund av kort installerad ledningslängd.

Tabell 5: Utbyggnad [km] för varierande installationsår fördelat på samtliga ledningstyper.

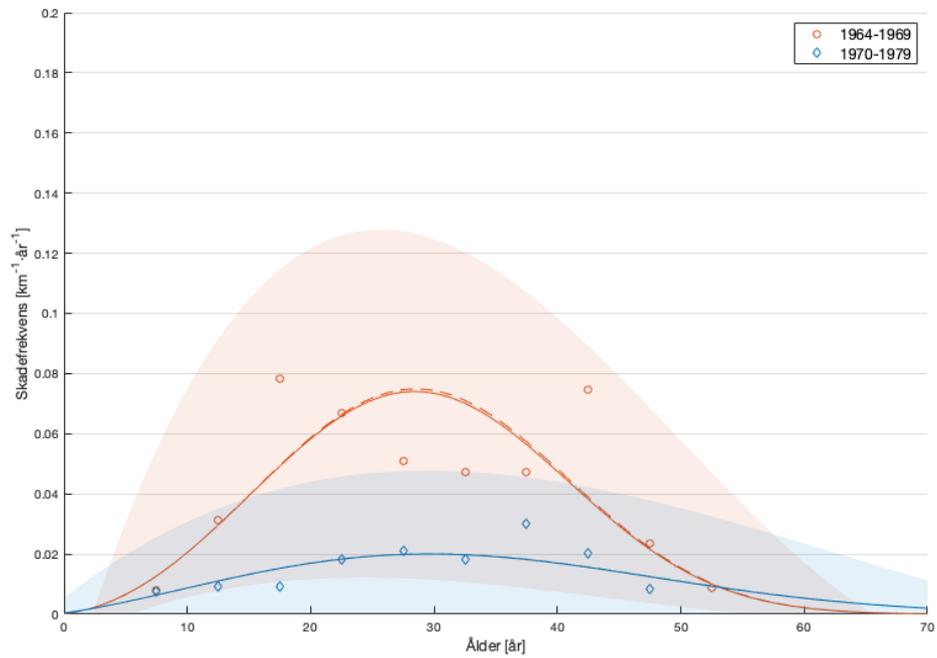
<i>Installationsår</i>	BTG	ACE	PVC	PEH	AQ
1964-1969	4.722	50.951	0.166	0	0
1970-1979	14.268	66.530	21.880	22.623	48.907
1980-1989	0.764	1.475	0.207	104.329	183.620
1990-1999	0.006	0.136	0.005	67.780	115.608
2000-2009	0	0	0	63.435	141.718
2010-2019	0	0.006	0.008	122.994	50.220

Det går att se att ledningstyperna BTG, ACE mest installerades på 60- och 70-talet, medan PVC nästan enbart installerades på 70-talet. Ledningstyperna PEH och AQ började användas på 70-talet och har sedan 80-talet utgjort nästan alla installationer av Öresundskraft. Även de decennier som BTG- och PVC-ledningar byggdes ut som mest var det förhållandevis lite som installerades. Detta innebär att det inte fanns mycket data att utgå ifrån för att beräkna påverkan av olika nominell diameter eller genomsläpplighet.

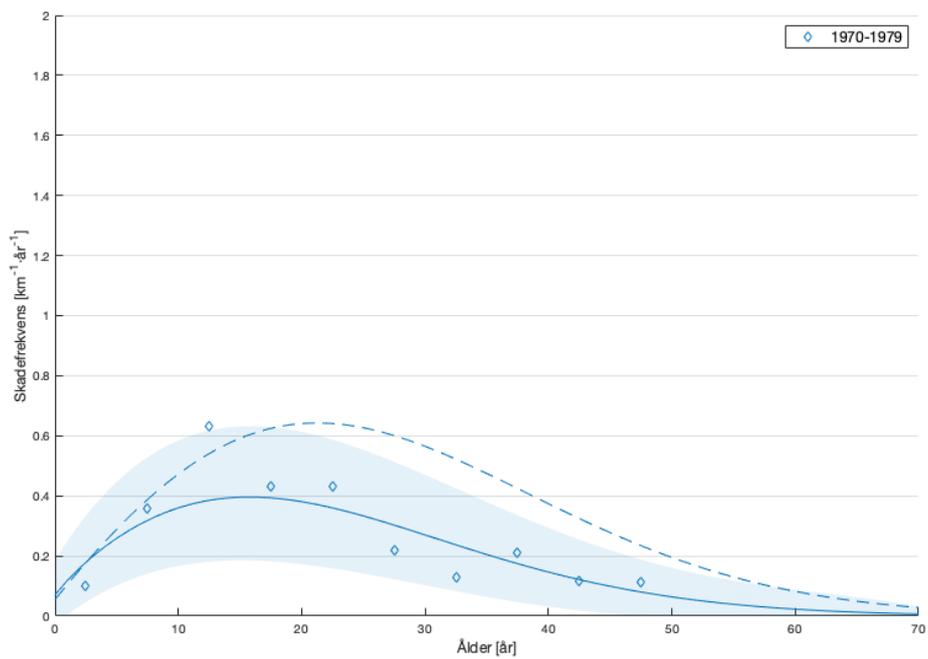
I Figur 11 - 15 plottas femårsmedelvärden av skadefrekvenser över ledningsålder för olika installationsår. Installationsår med rödmarkerad utbyggnad i Tabell 5 har uteslutits. De heldragna färgade linjerna är passade weibullfördelningar och de omkringliggande områdena i samma färg visar centrerade 90-procentiga konfidensintervall. De streckade linjerna visar samma weibullfördelningar fast där skadefrekvensen har beräknats från justerade ledningslängder. För installationsår efter 80-talet och installationsår med liten installerad ledningslängd finns inga passade kurvor eller intervall och för ledningstyp BTG kunde inga kurvor passas.



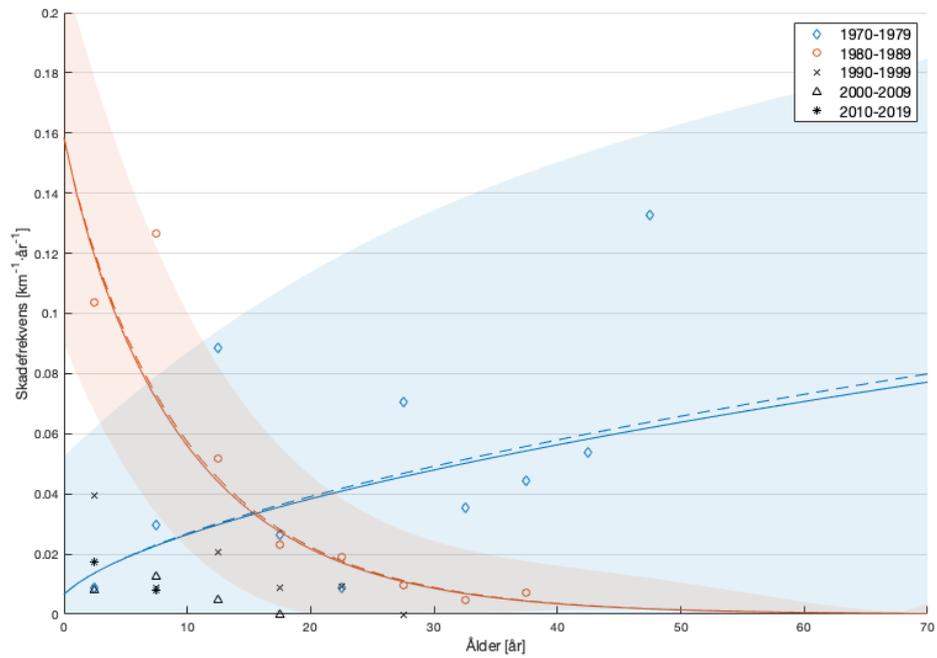
Figur 11: Skadefrekvensen för ledningstyp BTG över ledningsålder.



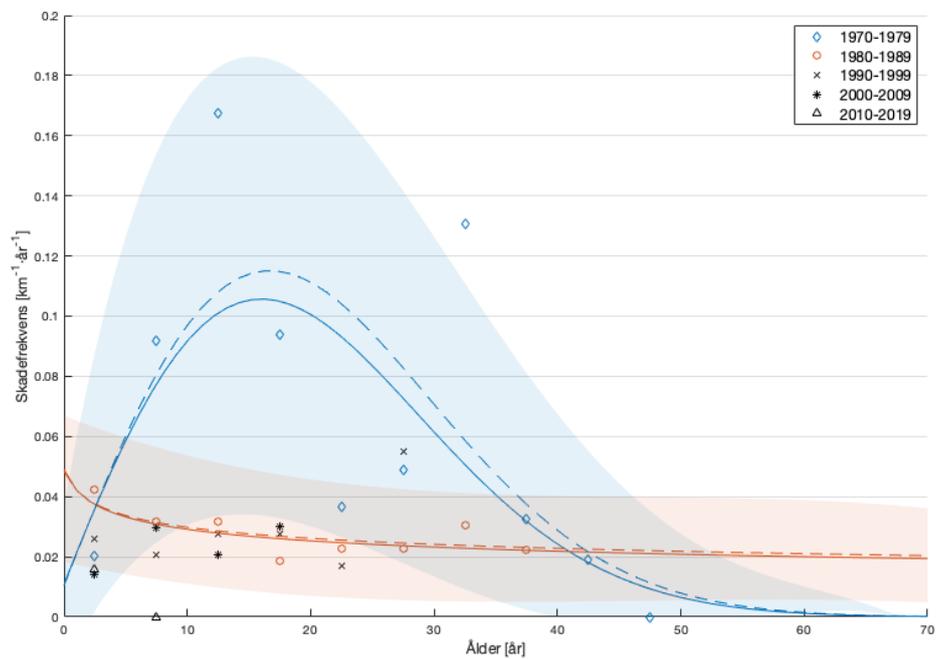
Figur 12: Skadefrekvensen för ledningstyp ACE över ledningsålder.



Figur 13: Skadefrekvensen för ledningstyp PVC över ledningsålder.



Figur 14: Skadefrekvensen för ledningstyp PEH över ledningsålder.



Figur 15: Skadefrekvensen för ledningstyp AQ över ledningsålder.

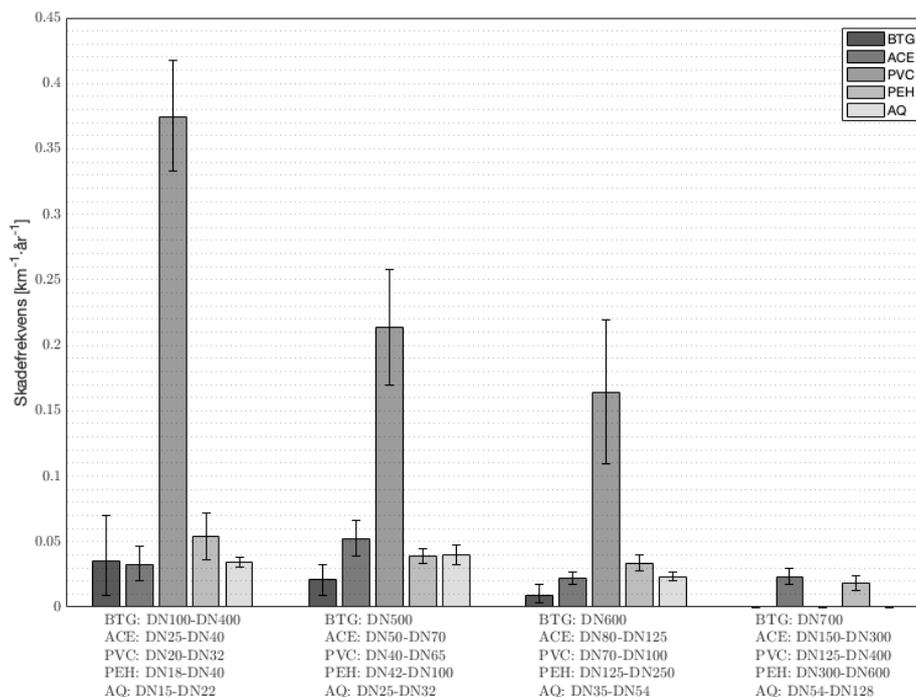
I Figur 11 - 15 förekommer ett antal olika former på de passade weibullfördelningarna. För ledningstyperna ACE, PVC och AQ installerade på 70-talet och ACE

installerat på 60-talet ökar skadefrekvensen de första åren för att nå en topp efter ett par decennium och därefter börja minska. För ledningstypen PEH installerat på 70-talet verkar skadefrekvensen öka genom hela mätserien. För ledningstyperna PEH och AQ med installationsår på 80-talet visas en högre initial skadefrekvens som senare ser en stadig minskning genom hela mätserien. Det är svårt att säga något definitivt om de yngre ledningarna vars serier inte har någon passad weibullfördelning, men för ledningstypen PEH verkar det åtminstone finnas en minskande trend. Ingen trend kunde avläsas för ledningstypen BTG på grund av få skador, för ledningar installerade på 70-talet finns det eventuellt en ökande trend de senaste 20 åren.

Generellt sett verkar ledningar med tidiga installationsår visa högre skadefrekvenser. Ledningstyperna ACE, PEH och AQ ligger för det mesta i samma storleksordning i skadefrekvens. Ledningstypen PVC däremot har en skadefrekvens i en storleksordning upp från de andra. Återigen är det svårt att avläsa något från ledningstypen BTG, men det finns inget som tyder på att skadefrekvensen skulle vara mycket högre än för ledningstyperna ACE, PEH och AQ.

5.1.2 Nominell diameter

I Figur 16 presenteras skadefrekvensen för olika nominella diametrar uppdelat för de olika ledningstyperna. Centrerade 90-procentiga konfidensintervall visas också. I figuren har den största diameter för ledningstypen AQ exkluderats och satts till noll. Denna grupp har en skadefrekvens på $7.3 \text{ skador} \cdot \text{kilometer}^{-1} \cdot \text{år}^{-1}$, men bygger på väldigt lite data.



Figur 16: Skadefrekvensen för varierande nominell diameter med 90%-konfidensintervall.

Enligt Figur 16 verkar en mindre diameter vara förenat med högre skadefrekvens för ledningstyperna BTG, PVC och PEH.

Men med undantag av den minsta nominella diametern av PVC så överlappar konfidensintervallen för dessa. Ledningstypen BTG visar stora konfidensintervall.

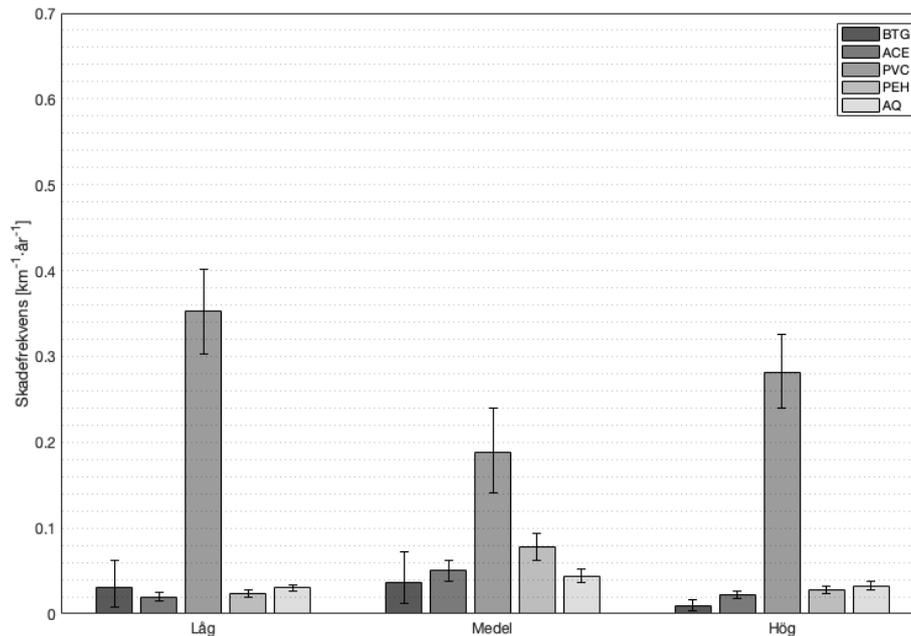
För ledningstyperna ACE visar de två största nominella diametrarna en mindre skadefrekvens än de två minsta. Konfidensintervallen för de två större överlappar inte med den näst minsta, men lite för den minsta.

För ledningstypen AQ visar den näst största nominella diametern en mindre skadefrekvens än de två minsta utan att konfidensintervallen överlappar. Som nämnt ovan har den största diametern uteslutits.

Endast ledningstyperna ACE och PEH har tydlig data för deras största nominella diametrar.

5.1.3 Genomsläpplighet av jordart

I Figur 17 presenteras skadefrekvensen med ett centrerat 90%-konfidensintervall för olika genomsläppligheter uppdelat för de olika ledningstyperna.



Figur 17: Skadefrekvensen för varierande nivå av genomsläpplighet med 90%-konfidensintervall.

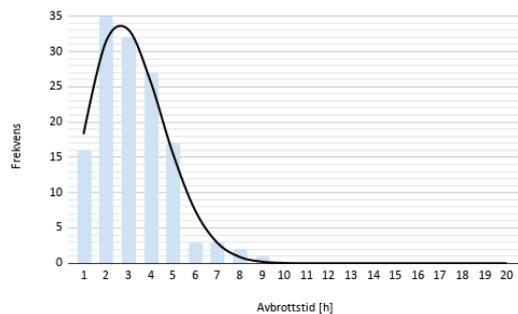
I Figur 17 visar samtliga ledningstyper utom PVC högst skadefrekvens i jordarter med medel genomsläpplighet. För ledningstyperna ACE, PEH och AQ överlappar inte konfidensintervallen för medel genomsläpplighet. Däremot överlappar intervallen för de andra två genomsläppligheterna. Ledningstypen BTG visar stora konfidensintervall.

För ledningstypen PVC är skadefrekvensen lägst vid medelgenomsläpplighet där konfidensintervallen inte överlappar de andra två genomsläppligheterna.

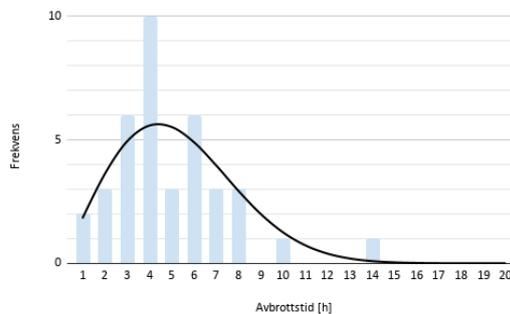
För genomsläppligheterna låg och hög överlappar konfidensintervallen för samtliga ledningstyper.

5.2 Avbrotts varaktighet

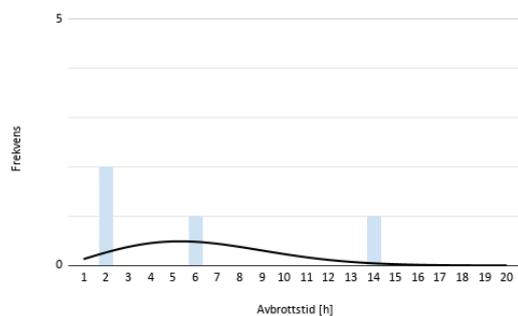
I Figur 18 visas frekvensen för varaktigheter av avbrott för servis-, distribution- och stamledningar och respektive passade weibullfördelning. Frekvensen visar endast antalet skador vid varje varaktighet.



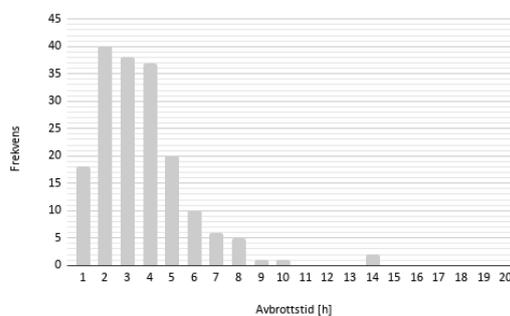
(a) Servisledning



(b) Distributionsledning



(c) Stamledning



(d) Samtliga

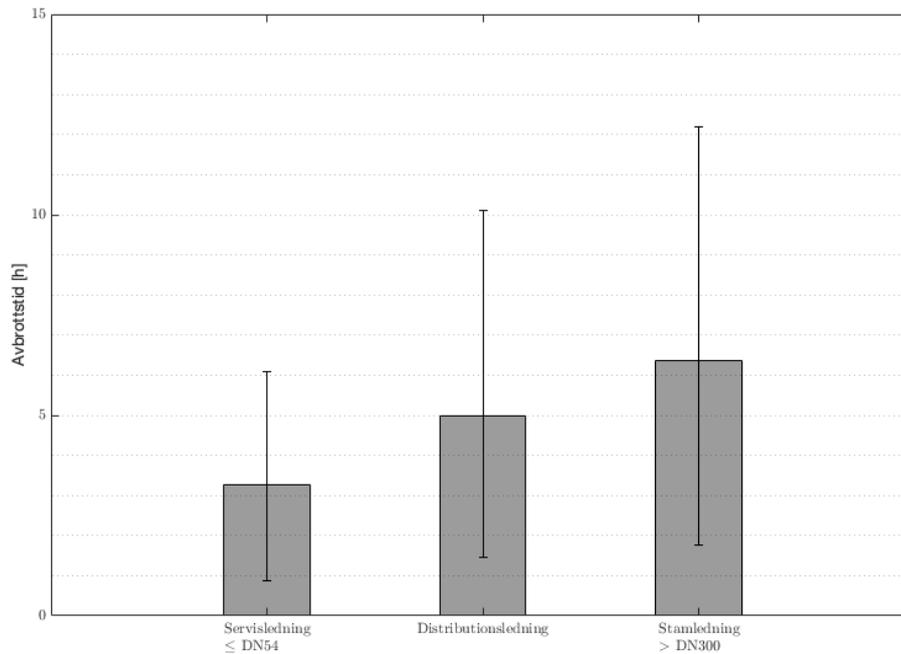
Figur 18: Frekvensen för olika avbrottsvaraktigheter för servis- distribution- och stamledningar. Den svarta linjen är en passad weibullfördelning. Sist visas avbrottsvaraktigheterna för samtliga ledningar.

Av de över 180 olika avbrotten som studerats i arbetet varade 90 % i 6 timmar eller mindre och endast tre av dem varade i 12 timmar eller mer.

Enligt weibullfördelningen för distributionsledningarna är sannolikheten att en av de 38 observerade datapunkterna ska ligga vid 14 timmar eller mer omkring 10 %.

Sannolikheten att från stamledningarnas weibullfördelningen få minst en datapunkt av fyra vid den högsta observerade eller högre är omkring 5 %. Detta är också sannolikheten för att få minst två datapunkter vid dom två lägsta observerade eller lägre. Sannolikheten för att båda dessa ska inträffa samtidigt är ännu lägre.

I Figur 19 visas medelvärdena av avbrottsvaraktigheten för servis-, distribution- och stamledningar. Konfidensintervallen utgör centrerade 90 % intervall enligt de passade weibullfördelningarna.



Figur 19: Avbrottets varaktighet med hänsyn till storlek av ledning.

Figur 19 föreslår att avbrottets varaktighet i de tre grupperna ökar med större nominell diameter. Dock är konfidensintervallen stora och samtliga tre överlappar varandra.

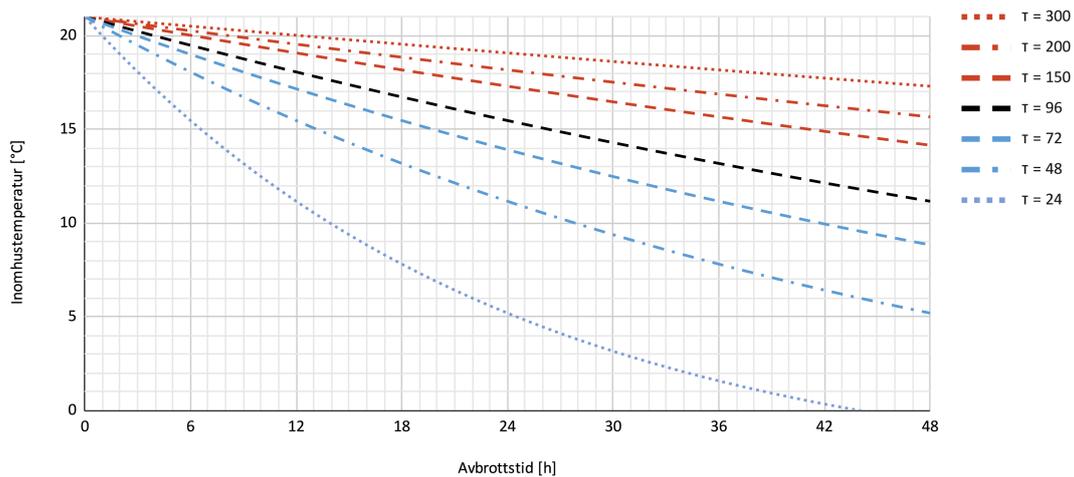
Envägs variansanalysen, ANOVA, gav ett p-värde på $1.5940 \cdot 10^{-7}$ vilket innebär att nollhypotesen kan förkastas med mer än 99 % sannolikhet. Detta innebär att medelvärdena skiljer sig på ett sätt som med stor sannolikhet inte beror på slumpen. MCT-testet visade att medelvärde från gruppen servisledningar skiljer sig signifikant från de två andra grupperna men att det inte går att med säkerhet säga att medelvärden för distribution- och stamledning inte beror på slumpen.

5.3 Förändring i inomhustemperatur och energianvändning

I följande avsnitt presenteras resultat av den framtagna modellen, fallstudien och verifiering av modellen med beräknad inomhustemperatur.

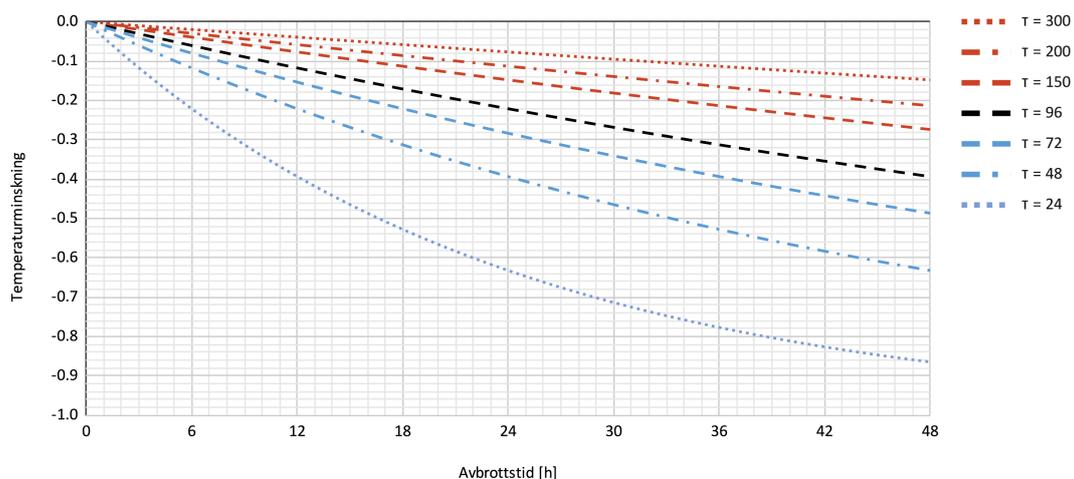
5.3.1 Inomhustemperatur

I Figur 20 visas minskningen i en byggnads inomhustemperaturen över avbrottets varaktighet för olika tidskonstanter vid en utomhustemperatur på $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, en interntemperatur på $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och en inomhustemperatur på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 20: Inomhustemperaturen över avbrottets varaktighet i timmar för olika tidskonstanter vid en utomhustemperatur på $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, en interntemperatur på $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ och en inomhustemperatur på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I Figur 21 visas minskningen i en byggnads inomhustemperatur per grad skillnad mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen. Detta är en mer generell bild än den i Figur 20 och här kan godtyckliga temperaturer användas.



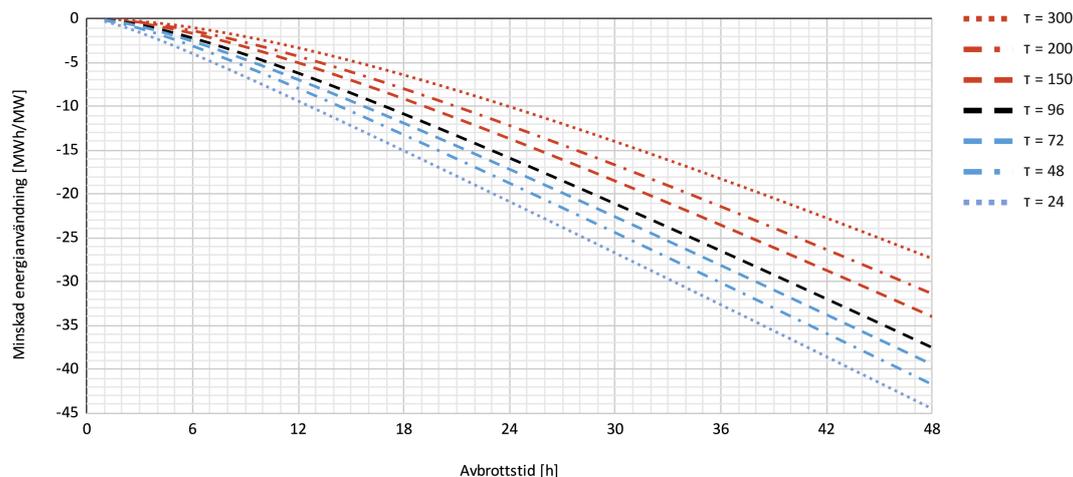
Figur 21: Minskning av inomhustemperatur över ett avbrotts varaktighet för olika tidskonstanter. Minskningen i inomhustemperatur är per grad skillnad mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen.

I Figur 20 och 21 går det att se att inomhustemperaturen sjunker dramatiskt för byggnader med väldigt låga värden på tidskonstanten medan byggnader med högre värde på tidskonstanten som exempelvis fyra dygn endast förlorar omkring tre grader på tolv timmar.

5.3.2 Energianvändning

I Figur 22 visas hur en byggnads energianvändning påverkas av ett avbrott. Figuren visar minskningen i energianvändning över avbrottets varaktighet för olika tidskonstanter. Minskningen i energianvändningen är angiven i timmar av normalanvändning och har därmed ingen riktig enhet, men skulle kunna uttryckas som exempelvis MWh/MWh.

Figur 22 använder en återkommande effekt på 105 %. Denna har tagits fram genom att jämföra modellens beräknade minskning i energianvändning med minskningen i energianvändning från datan för de nio flerbostadshusen och sen justerat den återkommande effekten till modellen matchar datan. Men en återkommande effekt på 105 % är modellens beräknade minskning i energianvändning inom 20 % för samtliga av de nio olika flerbostadshusen.



Figur 22: På den vertikala axeln visas en byggnads energianvändning i förhållande till den normala med enheten timmar. Den horisontella axeln visar tiden i timmar från avbrottet.

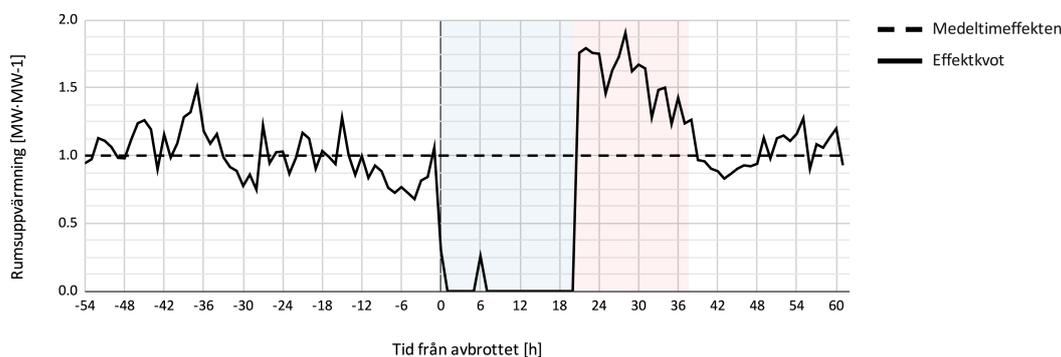
Grafen visar att energianvändningen för en byggnad med en tidskonstant på fyra dygn minskas med ungefär 12.5 timmar normal energianvändning för ett avbrott på omkring 20 timmar. En tidskonstant på 50 respektive 200 timmar ger istället minskningar på omkring 15 respektive lite mer än 9 timmes normalanvändning.

Den totala minskningen i energianvändning beräknades för samtliga nio byggnader till 10.5 MWh. Med det uppskattat energipris på 71.28 öre per kWh, blir den totala kostnaden omkring 7 500 SEK. Detta är 1.5 % av avbrottets reparationskostnader på 300 000 SEK.

5.3.3 Bearbetning av data

För att kunna undersöka den framtagna modellens validitet bearbetades först data från det verkliga avbrottet. För att göra följande avsnitt mer lättöverskådliga kommer endast grafen från ett av de nio flerbostadshusen presenteras, eftersom samtliga byggnader hade snarlika beteenden och resultat. Graferna för resterande byggnader går att hitta i Bilagan.

I Figur 23 visas effektkvoten från Ekvation 23. I figuren är också tidsintervallen för avbrotts- och återhämtningsperioden markerade med blå respektive röd bakgrund.



Figur 23: Rumsuppvärmningseffekten över tid baserat på mätdata från avbrottsåret i förhållande till den uppskattade rumsuppvärmningseffekten beräknat från tidigare års data och multiplicerat med den uppskattade medeltimeffekten. Det blåa och röda området indikerar avbrottsperioden respektive återhämtningsperioden.

I Figur 23 går det att se att rumsuppvärmningseffekten snabbt går ner till noll inom ett par timmar efter avbrottet. När värmen återvänder i fjärrvärmenätet stiger effekten upp till nära dubbla det observerade normala för att sen avta och återgår till det normala inom ett dygn. När effekten gått till noll syns en liten topp efter några timmar.

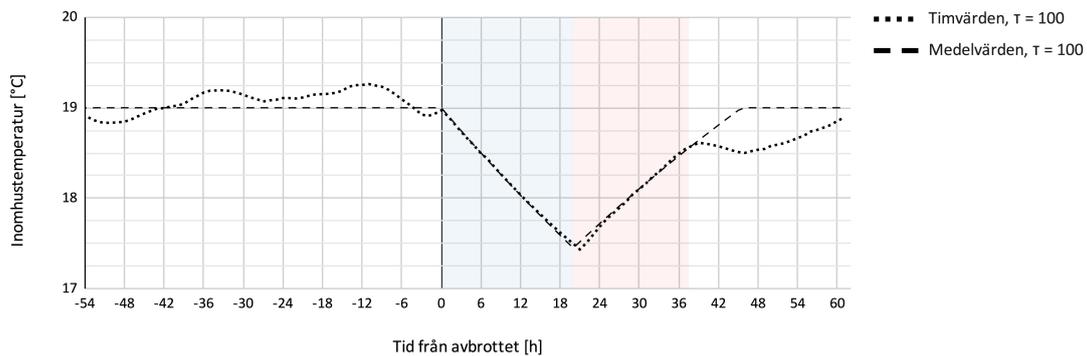
I den bakomliggande datan syns det ingen skillnad i när den återvändande effekt-toppen inträffar för byggnader på samma gata, men det finns tecken på en liten fördröjning mellan de två gatorna. På Minörgatan går effekten från noll vid 05:00 till max vid 06:00. På Fyrverkaregatan syns också en ökning från noll vid 05:00, men en topp nås inte förrän 07:00.

I den bakomliggande datan syns att framledningstemperaturen i nätet återkommer snabbt till alla byggnader och är inom ett par grader av det normala värdet före avbrottet ett par timmar efter avbrottet.

5.3.4 Validering av modell

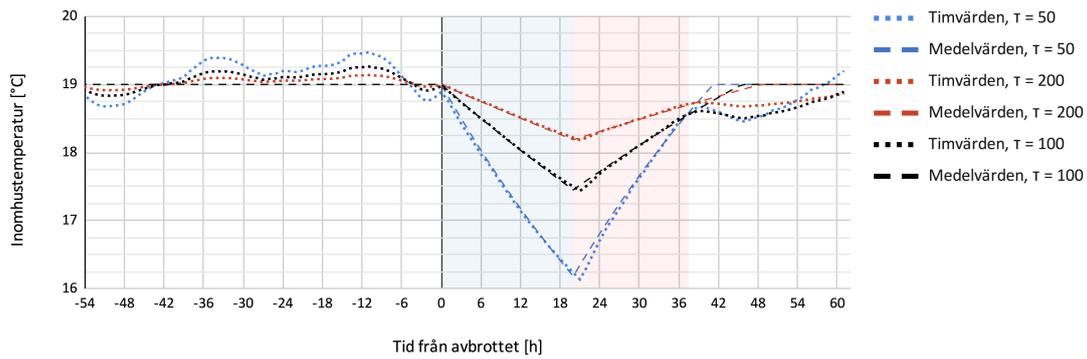
För att undersöka den framtagna modellen validitet användes den för att beräkna hur inomhustemperaturen påverkas under ett avbrott med den hjälp av den bearbetade datan från det verkliga avbrottet. För att göra följande avsnitt mer lättöverskådliga kommer endast grafer från ett av de nio flerbostadshusen presenteras. Graferna för resterande byggnader går att hitta i Bilagan.

I Figur 24 visas den beräknade inomhustemperaturen under hela tidsperioden enligt de två appliceringarna av modellen.



Figur 24: Inomhustemperaturen för en byggnad uppskattad med de två olika appliceringarna av den framtagna modellen. Den prickade serien baseras på uppmätta timvärden och antar genomgående Ekvation 9. Den streckade serien använder konstanta medelvärden och antar en konstant funktion före avbrottet, Ekvation 8 under avbrottet, Ekvation 9 efter avbrottet och återgår till en konstant ekvation när inomhustemperaturen är återställd.

I Figur 25 visas den beräknade inomhustemperaturen under hela tidsperioden enligt de två appliceringarna av modellen med olika värden på tidskonstanten.



Figur 25: Inomhustemperaturen för en byggnad uppskattad med olika appliceringar av den framtagna modellen och tre olika värden på tidskonstanten (τ). De tre olika färgerna anger olika tidskonstanter. De prickade serierna baseras på uppmätta timvärden och antar genomgående Ekvation 9. De streckade serierna använder konstanta medelvärden och antar en konstant funktion före avbrottet, Ekvation 8 under avbrottet, Ekvation 9 efter avbrottet och återgår till en konstant ekvation när inomhustemperaturen är återställd. Den de svarta serierna är samma som visas i Figur 24.

I Figur 24 följer de två appliceringarna av modellen varandra väl genom hela tidsperioden fram tills slutet på den röda återhämtningsperioden. Inga av de två modellerna visar att inomhustemperaturen är återställd i slutet av den utritade återhämtningsperioden.

I Figur 25 syns att tidskonstanten inte verkar påverka överensstämmelsen mellan de två appliceringarna. Tidskonstanten verkar inte heller ha någon större påverkan på inomhustemperaturen vid slutet av den utritade återhämtningsperioden.

Både i Figur 24 och 25 föreslår den mer detaljerade appliceringen av modellen att inomhustemperaturen sjunker lite direkt efter återhämtningsperioden innan den sakta börjar närma sig den ursprungliga temperaturen.

5.4 Störningskänslighet hos kunder

En viktig aspekt att väga in i en riskanalys är vilka kunder som drabbas av ett avbrott. Trots detta finns det förhållandevis lite litteratur över hur kunder påverkas av avbrott i värmeleveransen och inga nyare studier hittades. Ett antal bedömningsgrunder för att studera de lagmässiga krav som binder fjärrvärmeleverantören samt de rekommendationer och värderade kostnader som finns presenteras i följande avsnitt.

5.4.1 Regler och krav

Utöver att det kan förekomma i särskilda avtal mellan leverantör och användare finns det idag inga lagmässiga krav på fjärrvärmeföretag gällande leveranssäkerhet (Energiföretagen 2020a), vilket skulle kunnat ha använts för att jämföra olika kunders känslighet. Det som står i fjärrvärmelagen (SFS 2018:729) gällande avbrott är ett visst skadestånd gentemot konsumenter som syftar till att ersätta en skada som en konsument orsakas i de fall då avbrottet inte sker för att genomföra en åtgärd som undviker personskada eller omfattande sakskada, för att bygga ut fjärrvärmeverksamheten eller som bidrar till god distributionssäkerhet. I dessa fall får avbrottet inte heller pågå längre än vad som är nödvändigt, men det finns inga bestämmelser gällande maximal varaktighet av avbrott eller definierade ersättningar (Energimyndigheten 2016).

Branschens allmänna avtalsvilkor (Energiföretagen 2018) och Reko fjärrvärme (Energiföretagen 2020b), dvs. branschens riktlinjer för kundrelationer, säger att kunden ska underrättas snarast möjligt då längre oförutsedda avbrott inträffar samt att det ska finnas objektivitet i fördelning vid begränsad leveransomfattning.

De krav som finns på fjärrvärmeföretag är att för respektive fjärrvärmenät eller prisområde rapportera antalet aviserade respektive oaviserade avbrott till Energi marknadsinspektionen (Sernhed, Jönsson & Olsson 2015).

5.4.2 Rekommenderad varaktighet av avbrott

Sernhed, Jönsson & Olsson (ibid.) refererar i sin rapport till Värmeverksföreningen (1992) där kunder har delats upp i olika grupper med ett föreslagit maxantal oaviserade avbrott som får inträffa med en viss varaktighet under en uppvärmningssäsong enligt Tabell 6.

Tabell 6: Värmeverksföreningen (1981) rekommendationer över antal avbrottstimmar som ej bör förekomma mer än en gång per eldningssäsong. Källa: Sernhed, Jönsson & Olsson (2015).

<i>Kategorier</i>	Dag [h]	Natt [h]
Sjukvårdsanläggningar, mm	2-6	4-12
Industri, hotell, kontor, mm	4-12	8-12
Bostäder, mm	6-12	12

5.4.3 Indelning i kundgrupper

En finsk studie av Loustarinen (2005) föreslår en indelning i kundgrupper baserat på lämpliga förebyggande åtgärder för att förmildra konsekvenserna av oaviserade avbrott. Följande indelning är baserad på detta:

- A Kunder där avbrott i fjärrvärmenätet direkt kan leda till hälsorisker. (T.ex. sjukhus)
- B Kunder där avbrott i fjärrvärmenätet kan leda till stora ekonomiska förluster eller indirekt till hälsorisker. (T.ex. större Industrier)
- C Kunder som kan behöva anpassa eller tillfälligt stänga sin verksamhet vid avbrott i fjärrvärmennätet. (T.ex. mindre företag, vårdcentraler och ålderdomshem)
- D Övriga kunder där avbrott i fjärrvärmenätet främst påverkar bekvämligheten. (T.ex. bostäder)

5.4.4 Kostnader för olika kundgrupper

Loustarinen (ibid.) gjorde också en enkätundersökning med frågan *Hur stora kostnader orsakas av olika långa oförutsedda avbrott vintertid?* med alternativen 1h, 4h, 8h och 24h. Svar erhöles från fastighetservicebolag, den offentliga sektorn, handel- och servicebranschen samt industriföretag vilka presenteras nedan. All kostnader är omvandlade från Finska Mark till Svenska Kronor enligt 2005 års penningvärde. Generellt var svarsfrekvensen i studien mycket låg vilket förklarades med att flera av frågorna i enkäten var svåra att besvara.

I de flesta svaren från fastighetservicebolag anmäldes antingen att det inte funnits några problem med fjärrvärme eller så hade inga kostnader kunnat uppskattas. Svar erhöles från två bolag som främst hanterar flerbostadshus (se Tabell 7). Inom området för bolag A finns 4 000 bostäder och inom bolag B finns 853 bostäder.

Tabell 7: Kostnader [SEK] för fastighetservicebolag under olika långa oförutsedda fjärrvärmeleveransavbrott vintertid.

<i>Avbrottets varaktighet</i>	1h	4h	8h	12h
Fastighetservicebolag A	0	1 700	3 400	3 400
Fastighetservicebolag B	1 000			3 400

För den offentliga sektorn skickades enkäten främst ut till sjukhus eller samfund med hälsovårdstjänster. I de flesta svaren hade inga kostnader kunnat uppskat-

tas. I Tabell 8 är svaren från ett stort centralsjukhus presenterade. Om något reservsystem fanns till förfogande angavs ej.

Tabell 8: Kostnader [SEK] för offentlig sektor under olika långa oförutsedda fjärrvärmeleveransavbrott vintertid.

<i>Avbrottets varaktighet</i>	1h	4h	8h	12h
Under arbetstid	25 400	59 200	118 400	143 700
Utanför arbetstid	8 500	16 900	50 700	84 500

För handel- och servicebranschen kunde det i svaren som kom från minuthandel inte uppskattas något värde. Affärer angav att de kunde fortsätta sin verksamhet även under längre avbrott då lägre inomhustemperatur inte nämnvärt påverkar komforten eller leder till större skador. Endast eventuella tillfrysningar vid längre avbrott kunde orsaka större kostnader. För frisörer var den största olägenheten att tillgången till varmvatten uteblev vilket i många fall kunde ersättas med vatten uppvärmt med hjälp av elspis. Större kostnader blir det bara vid längre avbrott då rumtemperaturen sjunkit till en nivå där verksamheten måste avbrytas helt. För fyra hotell angavs kostnader som presenteras i Tabell 9.

Tabell 9: Kostnader [SEK] för handel- och servicebranschen under olika långa oförutsedda fjärrvärmeleveransavbrott vintertid.

<i>Avbrottets varaktighet</i>	1h	4h	8h	12h
	5 500	14 400	60 000	221 900

I flera av svaren från industrikunder kunde kostnaderna inte uppskattas eller så resulterade inte avbrottet till någon avsevärd störning i produktionen, förutom eventuella tillfrysningar. Av de kunder som meddelade kostnader i samband med leveransavbrott var det mest kritiska att den maskinella ventilationen för luftkonditionering stannar. De kostnader som kunde jämföras kom från fyra företag: en maskinverkstad, ett fryseri för industri, ett livsmedelsindustriföretag och en maskinreparationsverkstad, där den genomsnittliga kostnaden presenteras i Tabell 10. När det gäller verksamhet och industri finns det dessutom ofta externa kostnader för en tredje part som även drabbas av avbrottets konsekvenser i form av merkostnader.

Tabell 10: Medelkostnad [SEK] av fyra industriföretag under olika långa oförutsedda fjärrvärmeleveransavbrott vintertid.

<i>Avbrottets varaktighet</i>	1h	4h	8h	12h
Under arbetstid	59 300	253 800	414 500	727 500
Utanför arbetstid	24 000	54 300	142 000	440 400

5.4.5 Kunders betalningsvilja

Betalningsviljan är den kostnad som en kund är villig att betala för förhöjd leveranssäkerhet. En generell metod för att mäta betalningsviljan för en vara eller tjänst är att studera marknadsefterfrågan men när det rör leveransavbrott finns det ingen direkt marknad för att betala för färre avbrott. I Carlsson & Martinsson (2006) undersöktes betalningsvilja för att minska leveransavbrott för varierande varaktighet av avbrott för olika kundtyper i elnätet genom en så kallad Contingent Valuation metod. Detta ansågs kunna klassificera såväl aviserade som ej aviserade avbrott i elnät. För att kunna omvandla resultaten till värmekunder undersöktes för hushåll bland annat en skattad betalningsvilja för bostäder utan alternativ uppvärmning. Det visade sig dock inte möjligt att isolera endast påverkan från avbrott i uppvärmning. Någon liknande undersökning för värmekunder har ej genomförts.

6 Analys

I följande kapitel summeras de risker som har påvisats i kombination med en summerad bedömning av risken för att på så sätt fastställa sårbara ledningssträckor i fjärrvärmenät.

6.1 Skadefrekvens

De flesta ledningstyper och installationsår visade antingen en strängt minskande skadefrekvens eller en skadefrekvens som efter en initial ökning når en topp efter ett par decennium och därefter minskar. Dessa skulle kunna indikera slutet på begynnelseperioden i badkarskurvan, dvs. att antal primärskador i systemet har avtagit. Skadefrekvensen för nyare installationsår går inte att extrapolera. Dock kan liknade trender med minskad skadefrekvens antas även för dessa trots att den initiala skadefrekvensen är betydligt mindre. För att på ett statistiskt säkert sätt kunna utvärdera alla ledningstyper behövs tillräckligt med data att utgå från. Datainsamlingen visade att antal mätdata skiljde sig mycket för olika ledningstyper. Ledningstyp BTG finns endast representerad i få registrerade skador varför det inte går att utläsa mycket om hur skadefrekvensen av denna ledningstyp utvecklas. Konfidensintervallen för påverkan av parametrarna nominell diameter och genomsläpplighet överlappade varandra i flera fall. För ledningstyp BTG var de även stora i förhållande till det observerade värdet då antalet registrerade skador var så pass få.

Av de skador som studerades pekade majoriteten av ledningstyperna på att den tekniska livslängden ännu inte börjat uppnås. Enligt teorin bör typen ACE byggd fram till 80-tal samt BTG byggda fram till 70-tal uppnå denna tekniska livslängd. Trots att mängden data för BTG-ledningar var mycket liten kan det konstateras att det finns en svag ökning i antal skador under de senaste 20 åren. Flexibla ledningar som AQ byggd fram till 90-tal bör också börja uppnå sin tekniska livslängd. PEH-ledningar har en förväntad livslängd på 80 till 100 år och bör därmed inte börja uppnå sin tekniska livslängd förrän år 2040. Hur PVC ledningar svarar på antal år i drift finns ingen information om. De enda ledningar som ser ut att ha en ökande skadefrekvens är BTG-ledningar samt PEH-ledningar byggda under 70-tal. Eftersom det endast är dessa installationsår av PEH som ser en strängt ökande skadefrekvens kan det argumenteras att faktorer såsom val av konstruktör, fabrikat, teknik och förläggningssmetod under denna tidsperiod har påverkat dess hållbarhet.

Konfidensintervall runt weibullfördelningarna ser ut att passa mycket väl. En tolkning av konfidensintervallen runt weibullfördelningarna är att 90 % av åren bör visa en skadefrekvens inom intervallet. I Figur 11 - 15 syns att mer än 90 % av datapunkterna, alla utom tre, ligger inom intervallen. Dessa datapunkterna är dock medelvärden från femårsperioder och bör därmed visa en mindre spridning från väntevärdet. Det finns inte något som tyder på att medelvärdena och konfi-

densintervallen skulle vara väldigt fel för perioder med datapunkter. Spridningen av datapunkterna runt passade weibullfördelningar tyder dock på att det finns fler parametrar än ålder och installationsår som påverkar skadefrekvensen.

6.2 Beroende parametrar

Det kan för flera av de parametrar som studerades finnas ett visst beroende mellan dem. Exempelvis innebär detta att ledningar som installerades under en viss tidsperiod kan vara ledningar av en viss dimension eller att dimensionen och ledningstypen kan vara kopplat till vilken jordtyp den ligger i. Resultaten visade att medelgenomsläpplighet var förenad med högst skadefrekvens för alla ledningstyper utom PVC. Detta resultat är inte i linje med teorin och i litteraturen som undersökts finns ingen förklaring till varför medel genomsläpplighet skulle visa högre skadefrekvens. Att låg genomsläpplighet inte var förenad med högst skadefrekvens skulle kunna tyda på att skador från omkringliggande vatten inte är betydande. Däremot finns många andra faktorer som kan ha resulterat i att medel genomsläpplighet visade sig vara minst gynnsam. Troligen är det ett svar på andra faktorer som påverkas av placeringen så som sättningsbenägenhet eller närliggande trafik. Omgivandeförhållanden är mycket komplexa att beskriva och är något som kan förändras med tiden. Kartan över genomsläppligheten från SGU utgick endast från kornstorleken i jordarten och tar inte hänsyn till andra faktorer som kan påverka genomsläppligheten såsom läge, mätnadsgrad, lager eller grundvattennivå.

Påverkan av nominell diameter visade att mindre diametrar generellt är förenade med högre skadefrekvens, även om konfidensintervallen i många fall överlappade med varandra. Om detta är ett resultat av en större andel material och installationsfel eller att mindre ledningar påverkas mer av omgivande förhållanden visar inte resultatet.

Varaktigheten av avbrottet visade sig ha en viss koppling mellan en längre avbrottstid för större ledningar, men med stora variationer. Det kan tänkas att andra faktorer än bara ledningens nominella diameter spelar roll för hur lång tid avbrottet varar. Exempelvis placeringen av olika storlekar av ledning.

6.3 Avbrotts varaktighet med avseende på kunder

Relationen mellan varaktighet av avbrott och den faktiska temperaturförändringen för bostadskunder kan ses som en potentiell faktor för känslighet. Byggnader med låga värden på tidskonstanten är betydligt känsligare för avbrott. I enkätundersökningen där fjärrvärmekunder fick värdera ekonomiska kostnader av leveransavbrott med olika varaktighet framkom att bostadskunder inte påverkas mycket ur ett ekonomiskt perspektiv även vid längre avbrott. Dock angavs rekommendationer på 6 till 12 timmar avbrott vilket skulle kunna innebära temperaturminskningar på 1 till 6 grader om avbrottet sker under en väldigt kall vinterdag enligt Figur 20 beroende på värdet av tidskonstanten. Dessutom stängs tappvarmvattnet

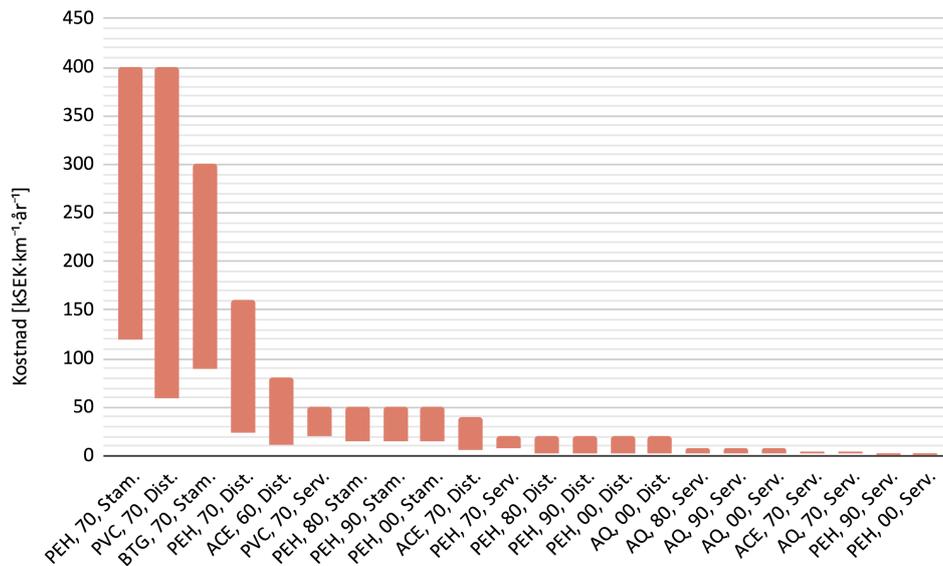
av direkt vid skadan. I grafen används en utomhustemperatur på $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detta väntas inte inträffa mer än något dygn per år i Helsingborg och av de över 180 avbrottsvaraktigheterna som undersöktes i detta arbetet var endast tre stycken över tolv timmar. Baserat på detta verkar sannolikheten att inomhustemperaturer i byggnader skulle minska med mer än $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Helsingborg osannolik.

Det beräknade värdet på inomhustemperaturen i fallstudien användes dels timvärden och dels medelvärden. Metoden med medelvärden är inte lika detaljerad, men kan användas prediktivt eftersom medelvärden kan beräknas på förhand. Metoden med uppmätta timvärden är mer detaljerad, inom gränserna för modellen, men eftersom den bygger på timdata kan den inte användas prediktivt. Resultatet visade däremot att båda metoderna följer varandra fram till slutet av återhämtningsperioden. Att dessa grafer följer varandra så bra visar att det i detta fallet är möjligt att anta konstanta värden för inparametrarna utan att det uppstår fel inom modellen. Det i sig säger inget om hur väl modellen beskriver verkligheten.

Varaktigheten av avbrott medför dock inte bara minskad inomhustemperatur hos bostadskunder. Cirka $2/3$ av fjärrvärmeleveranserna i Helsingborg går till uppvärmning av bostäder. De kvarstående leveranserna går till verksamheter, industrier, övriga lokalar och ett sjukhus. Det visades att ett avbrott i värmeleveransen för en sjukvårdsanläggning kan innebära hälsorisker och stora ekonomiska kostnader även vid ett avbrott på 1 timme. För en större industri skiljer sig en accepterad varaktighet av avbrott markant och bör studeras individuellt. Vad som kan konstateras är att denna kundtyp är mest ekonomiskt beroende av att distributionen ska fungera normalt och påverkas avsevärt även vid kortare varaktigheter av avbrott. För handels- och servicebranchen var kostnader låga för kortare avbrott men ökade snabbt vid avbrott på 8 timmar eller längre om verksamheten tillfälligt måste avbrytas. I litteraturen som studerades över kunders känslighet vid avbrott i värmeförseln visade sig dock att förhållandevis lite studier ha gjorts på området och inga nyare studier fanns att tillgå.

6.4 Identifiering av sårbara ledningar

För att identifiera sårbara ledningar och ledningssträckor sammanvägs tidigare resultat. I analysen inkluderas skadefrekvensen och ekonomiska kostnader vid reparation och återställning. Skadefrekvenser för olika ledningstyper och installationsår tas från Figur 11 till 15. Dessa delas sen vidare in i servis-, distributions- och stamledningar och baserat på detta används reparations- och återställningskostnaderna i Figur 1. Genom att multiplicera sannolikheten med kostnaderna räknat lågt och högt fås en risk uttryckt i kostnad per kilometerår som visas i Figur 26.



Figur 26: Riskbedömning av fjärrvärmeledningar i kostnad per kilometerår. För ledningarna anges typ, installationsdecennium och storlek. Storleken är grupperad efter servise- (Serv.), distributions- (Dist.) och stamledning (Stam.). Kostnaden är i tusen kronor och indelad i intervall efter Figur 1.

Figur 26 antyder att ledningsgrupperna “PEH,70,Stam.”, “PVC,70,Dist.” och “BTG,70,Stam.” utgör de största sårbarheterna. Även “PEH,70,Dist.” och till någon grad också “ACE,60,Dist.” framstår som mer sårbara än resterande grupper.

Figuren visar risken per längdenhet och därmed är det inte säkert att gruppen med högst risk utgör de största kostnaderna i absoluta tal om gruppen endast förekommer med en väldigt kort ledningssträcka.

Figuren tar enbart hänsyn till fjärrvärmeleverantörens kostnader vid reparation och återställning. Kostnaden för minskad energianvändning skulle kunna uppskattas med Figur 22 vid undersökning av en specifik ledningssträcka då påverkade kunder är känt. Dock föreslår resultatet i detta arbetet att kostnaderna från minskad energianvändning är små i förhållande till kostnaderna för reparation och återställning.

Risken som beräknat i figuren gäller för hela grupper om ledningar och kan inte direkt appliceras på specifika ledningssträckor. Den kan tolkas som att den visar inom vilka grupper sårbara ledningar förekommer. Det går att få en mer exakt bild av reparations- och återställningskostnaderna vid undersökning av en specifik ledningssträcka då ledningens läge är känt. Dock är sannolikheterna i detta arbetet medelvärden för olika ledningsgrupper och de behöver därmed inte heller gälla för specifika ledningslängder.

De ledningar som definierats generera störst konsekvenser vid skada är distribution- och stamledningar då de förknippat med såväl högst reparationskostnader, längre varaktighet av avbrott och drabbar vanligtvis en större kvantitet av kunder. Om

ledningen är av typen distributionsledning väntas varaktigheten av avbrott med få undantag vara mellan 1.5 till 10 timmar. Varaktigheten av avbrott på stamledning- ar kunde inte preciseras då endast 4 mätvärden fanns registrerade men de antas vara liknande distributionsledningarna eller längre. En skada på dessa ledningar skulle således kunna överstiga det rekommenderade antal avbrottstimmar som ej bör förekomma mer än en gång per eldningssäsong för både sjukvårdsanläggning- ar, industrier, hotell och kontorslokaler. Vid närmare undersökning av ledningar med högre risk i matrisen bör säkerställa att kundtyper sjukhus, industrier och i möjligaste mån verksamheter inte påverkas, förutsatt att ingen möjlighet till ringmatning finns. Mängden fastigheter som drabbas av avbrott i dessa lednings- sträckor bör också utvärderas.

En annan parameter som kan inkluderas för en given ledningssträcka är hur den ligger geografisk i förhållande till säkerhet, dvs. vad mer som finns i ledningens närmiljö än det som riskerar att frambringa än skada, såsom en en riskfylld plats för säkerhetsaspekter eller närhet till vattendrag som kan innebära översvämning. Om placeringen av ledningen dessutom är väldigt central i staden eller resulterar i att en trafikerad väg som måste omdirigeras är detta ytterligare en faktor som bör tas hänsyn till.

7 Diskussion och metodutvärdering

I följande kapitel diskuteras resultat, analysen och metodens felkällor och tillförlitlighet. Utvärderingen diskuterar varje kategori för sig.

Det finns åtskilliga metoder för att utvärdera risker i ett system. Ofta utgår en riskanalys av vad som kan hända, dvs. identifiering av antingen riskkällor eller riskscenarier som sedan analyseras individuellt. Detta arbete utgick endast från händelsen att en ledning skadas och sattes i ett systemperspektiv. För att utvärdera hela systemet på detta vis analyserades först de ledningar som har störst sannolikhet för skada och därefter vad konsekvenserna blir i diverse ledningar. Vid analys ur ett systemperspektiv behövdes ett antal avgränsningar göras, både med hänsyn till de parametrar som beskriver sannolikheten för skada och med hänsyn till de konsekvenser som en skada innebär. Dessutom krävdes diverse antaganden vid datainsamling och bearbetning. Metoden strävade efter att vara så exakt och applicerbar som möjligt och är menad att användas som utgångspunkt i riskhantering. De sårbarheter som identifierades är därför något som på ett senare stadie får analyseras vidare med hänsyn till placeringen av dessa ledningar.

7.1 Beräkning av sannolikhet

7.1.1 Ledningslängd

Vid insamlande av data för ledningslängden antogs utbyggnadstakten inom varje decennium vara konstant. Detta introducerar en osäkerhet i ledningslängder och skadefrekvenser. I figurerna som beskriver skadefrekvensen med varierande installationsår (Figur 11 - 15) påverkar denna osäkerhet bara de två sista datapunkterna i varje serie. Om den första utbyggnaden av en ledningstyp inte började precis vid ett decenniumskifte utan någon tid in på det skulle samma antagande om konstant utbyggnadstakt resultera i att båda de två sista datapunkterna höjs något. För parametrarna nominell diameter och genomsläpplighet i Figur 16 och Figur 17 introducerar antagandet ett ganska litet fel. Detta eftersom det är det totala antalet kilometerår som är viktiga för skadefrekvensen. För en ledningskategori gör antagandet endast att kilometeråren för de sista tio åren blir osäkra. Detta innebär att den absoluta maxgränsen för felet i skadefrekvens för PVC ledningar, som nästa bara byggdes på 70-talet, är 10 % och med all säkerhet mindre.

7.1.1.1 Känslighetsanalys av ledningslängd

I metoden antas att inga ledningssträckor försvinner från nätet när de väl har installerats. Detta antagandet undersöks genom att också passa en weibullfördelning efter skadefrekvenser beräknade från justerade ledningslängder där en viss strecka tas bort vid varje skada. Ledningslängden som tas bort bestäms till lite mer än ett ledningssegment för de olika ledningarna, förutom för AQ och PVC där längre sträckor antas bytas.

I Figur 11 - 15 syns att PVC är den enda ledningstypen där skadefrekvensen visar en markant skillnad mellan de justerade och ickejusterade ledningslängderna där skadefrekvensen blir dubbelt så hög mot slutet. För de andra ledningstyperna är skillnaden liten eller försumbar. Anledning till att PVC påverkas mest beror dels på att den har en väsentligt högre skadefrekvens än de andra ledningstyperna, vilket i sammanhanget innebär fler skador per ledningslängd. Och dels på att mer antas bytas ut vid varje skada jämfört med de andra ledningstyperna, med undantag för AQ.

Det är svårt att säga hur exakta de justerade ledningslängderna är, men förutsatt att ledningslängden som ersätts vid skador i verkligheten inte är i en annan storleksordning än vad som antagits så verkar antagandet om att inga ledningssträckor försvinner rimligt för ledningstyperna BTG, ACE, PEH och AQ. Figur 13 föreslår dock att antagandet leder till ett märkbart fel för ledningstypen PVC där dennes skadefrekvens underskattas.

7.1.1.2 Ledningslängder för genomsläpplighet

Vid beräkning av ledningslängderna för genomsläpplighet användes ett javaprogram som fördelade ledningslängder mellan olika genomsläppligheter baserat på andelen ledningspixlar på en karta.

För att säkerställa att programmet fungerade som avsett så summerades antalet pixlar inom varje ledningskategori som inte blivit tilldelade en genomsläpplighet. Detta visade att andelen pixlar utan tilldelning i sällsynta fall uppgick till 5 % inom en ledningskategori, men oftast höll sig under 2 %. Genom att också låta programmet färga om de räknade pixlarna och spara ner den resulterande bilden kunde resultatet analyseras visuellt. Från detta framgick det att programmet verkade hitta alla ledningspixlar och att de pixlarna som inte tilldelats en genomsläpplighet låg på gränser mellan olika genomsläpplighetsområden. I dessa fallen är troligtvis osäkerheter från genomsläpplighetskartan och matchningen när ledningskartan lades över genomsläpplighetskartan mer begränsande.

En osäkerhet i programmet är antagandet om att ledningslängden är linjär med antalet pixlar. I verkligheten varierar detta något mellan ortogonala och diagonala linjer, men eftersom de olika ledningskategorierna har en blandning av ortogonala och diagonala linjer antas inte detta leda till något större systematiskt fel.

För ledningskategorier med kort ledningslängd är det möjligt att osäkerheterna i uppdelningen mellan genomsläppligheter orsakar ett märkbart fel, men överlag antas denna indelningen inte orsaka något märkbart fel.

7.1.2 Passning av weibullfördelningar till installationsår

Metoden som har använts bygger på att passa en weibullfördelning till den framtagna datan och den antar sedan att denna fördelningen är väntevärdet för skadefrekvensen över ledningsåldern.

En svårighet med att passa en weibullfördelning till den framtagna datan är att det finns en stort och okänt antal så kallade "censurerade" datapunkter. En censurerad datapunkt är en datapunkt där endast delar av informationen finns. I detta fallet antas att alla avbrott som någonsin kommer inträffa i Öresundskrafts fjärrvärmenät inte har inträffat ännu. Därmed finns det ett antal datapunkter där det är känt att ingen skada har inträffat ännu, men där den exakta tiden för skadan i någon mening är censurerad och okänd. Dessa censurerade datapunkter ska också beskrivas av weibullfördelningen och därför måste en viss andel av weibullfördelningen reserveras. Hur stor denna andelen är beror på hur många framtida skador som kommer ske och detta är så klart väldigt svårt att svara på. Det går eventuellt att göra en grov uppskattning på det totala antalet skador som kommer inträffa genom att dela den installerade ledningslängden i nätet med längden ledning som byts ut vid reparation av avbrott. Om samma antagande görs som vid beräkningarna av den justerade ledningslängden föreslår detta att endast en bråkdel av alla avbrott har inträffat.

Det finns också ett andra problem med de censurerade datapunkterna. Över ledningarnas totala livslängd antas skadefrekvensen följa en badkarskurva och detta arbetes tvåparameterweibull antas endast beskriva badkarets vänsterkant. Högerkanten antas beskrivas med en treparameterweibull som inte kommer undersökas i detta arbetet. Detta innebär att även om det totala antalet avbrott hade varit känt skulle dessa också behöva fördelas mellan de två fördelningarna. Detta anses inte rimligt att uppnå med någon nämnvärd säkerhet.

På grund av ovanstående hinder användes minstakvadratmetoden för att passa weibullkurvorna. Detta fungerar, men utan information om censurerade datapunkter är det omöjligt att säga när kurvan vänder nedåt som antaget. Detta är ett stort problem som gör att kurvorna i detta arbetet inte har några bra prediktiva egenskaper. För att förutspå framtida förändringar i trender skulle mer information behövas om teorin bakom ledningarnas åldrande eller en mer djupgående analys på den bakomliggande datan.

I metoden antas att den passade weibullfördelningen är väntevärdet. Som nämnt ovan finns det lite anledning att anta att den passade kurvan är väntevärdet bortom datapunkterna. Vissa serier har också en relativt stor spridning vilket gör passningen av weibullkurvan även över områden med existerande datapunkter blir svårare. Antagandet att weibullfördelningen är väntevärdet används för att beräkna konfidensintervallen och därmed kommer fel från avvikelser från väntevärdet att resultera i följdfel i konfidensintervallen. Från resultatet är det svårt att säga om weibullkurvorna är rimliga uppskattningar av väntevärdet.

7.1.3 Beräkning av konfidensintervall

Vid beräkningarna av konfidensintervall för weibullfördelningarna används en poissonfördelning och genom detta antas indirekt att skadorna är oberoende av varandra. I verkligheten kan skador tänkas vara kopplade; till exempel så skulle ett fel kunna utlösa flera skador, eller att en skada upptäcks till följd av en annan skada.

Detta skulle leda till en bredare spridning än vad en Poissonfördelning beskriver. Hur väl antagandet om att skadorna är oberoende stämmer är svårt att avgöra. I Öresundskrafts lista med skador finns 850 skador med datum noterat. Av dessa delar omkring 6 % på både gata och upptäcksdatum med minst en tidigare skada. Andelen ökar till 9 % om man kollar efter samma gata och inom samma 14-dagarsperiod. Dessa skadorna skulle kunna vara kopplade, men de behöver inte vara det om det till exempel upptäcktes vid samma rutinkontroll eller liknande. Eftersom andelen beroende skador inte verkar överstiga 10 % antas en poissonfördelning fortfarande beskriva datan relativt väl.

De tre datapunkterna som ligger utanför intervallen ligger alla över. Detta skulle kunna vara slump, men det skulle också kunna uppstå om väntevärdet är för lågt eller om det skulle ske många beroende skador. Från resultatet är det svårt att avgöra vilket det är. Det finns inget tydligt tecken på att det skulle vara något större fel på väntevärdena och konfidensintervallen i Figur 11 - 15.

7.1.4 Uteslutna parametrar

Vid bedömning av sannolikheter för skador valdes parametrarna ledningstyp, ledningsålder, installationsår, nominell diameter och jordens genomsläpplighet. En högre skadefrekvens beräknades kopplat till ett antal av dessa parametrar men antalet parametrar som kunde studeras var begränsat inom arbetet. En faktor som återkom som potentiellt viktig i många sammanhang var ledningens läge i förhållande till vägar, annan bebyggelse och andra markförhållanden.

7.1.5 Omfattande statistisk modell

För att välja en metod för att bedöma sannolikheten för skada behövde en avvägning göras i hur datan skulle delas upp i parametrar. Den valda metoden efter datainsamlingen var att studera majoriteten av parametrarna var för sig eftersom beroende mellan dem inte kunde uteslutas. Det hade varit intressant att ta fram en omfattande statistisk modell, exempelvis regressionsmodell. Detta skulle öka modellens applicerbarhet på specifika ledningskategorier och därmed kunna peka ut sårbara ledningar mer specifikt.

7.2 Avbrotts varaktighet

Tvåparameterweibullfördelningsfunktion används för att beskriva spridningen i avbrottsvaraktighet. Dessa är flexibla kurvor där både formen och spridningen kan justeras och de verkar kunna beskriva spridningen väl för servis- och distributionsledningarna.

I gruppen med stamledningarna finns endast fyra avbrott och de har en stor spridning i varaktighet från 2.5 till 14.5 timmar och här är det svårt att passa en weibullfördelning med någon säkerhet. Vid passningen antogs samma formparameter som för servis- och distributionsledningarna som båda beskriver sin respektive data väl. Skalparametern till stamledningarna valdes så att den enligt fördelningen minst

sannolika observerade händelsen blir så sannolik som möjligt. Detta beräknas genom att med en binomialfördelning beräkna sannolikheten att datapunkterna ligger som dom gör runt varje datapunkt. Där sannolikheten till binomialfördelningen ficks från den kumulativa weibullkurvan vid datapunkten.

Det är svårt att definitivt säga att stamledningarnas fördelning inte stämmer, men eftersom det är en väldigt låg sannolikhet att få samma värden som de observerade finns det stor anledning att misstänka att fördelningen inte beskriver verkligheten väl.

Enligt de tre framtagna fördelningarna är sannolikheten för ett avbrott med en varaktighet på 20 timmar, som i det verkliga fallet undersökt i detta arbetet, försumbar. Detta föreslår att fördelningarna inte kan användas för att beskriva extremfall. Det skulle vara intressant att undersöka möjligheten att beskriva extremfall med en separat fördelning såsom en gumbelfördelning eller liknande.

7.3 Temperaturförändring

7.3.1 Normalisering mot utomhustemperatur

Vid normaliseringen av datan behandlades olika veckodagar separat. Den tillgängliga timmedeleffektdatan från värmecentralerna sträcker sig för samtliga tre åren från den 3:e februari till och med den 7:e februari. För år 2020 är detta måndag till fredag, men år 2018 och 2019 var den 3:e en lördag respektive en söndag. I beräkningarna normaliserades måndagen med timmedeleffektvärden från måndagen för år 2018 och 2019. Resterande vardagar år 2020 antogs ha identiska dygnsvariationer och normaliseras med timmedeleffektvärdena från både tisdagen och onsdagen år 2018 och 2019. Denna separering gjordes eftersom måndagen som den första vardagen efter en helg, kunde tänkas ha en något annorlunda dygnsvariation än resterande vardagar, även i flerbostadshus.

I verkligheten beror inte en byggnads momentana värmebehovet enbart på den momentana utomhustemperaturen utan också på byggnadens lagrade energi, vilken beror på hur utomhustemperaturen har varit tidigare. Ifall utomhustemperaturen exempelvis skulle minska drastiskt från 15 °C till 5 °C skulle det momentana värmebehovet troligtvis vara lägre än om utomhustemperaturen för samma byggnad plötsligt skulle öka till 5 °C från -5 °C. Förutom detta finns det såklart en massa andra faktorer som också påverkar det momentana värmebehovet såsom de interna tillskott, däribland varmvatten som diskuteras längre ner.

Vid en ideal normalisering skulle effektkvoten i Figur 23 varit exakt 1 före avbrottet inträffade och de variationer som syns där antas bland annat bero på felet beskrivna ovan. Dessa variationer kan ha stor påverkan på beräkningar av minskad energianvändning från den verkliga datan och som kommer diskuteras i mer detalj längre fram används detta för att justera modellens beräkning av minskad energianvändning.

7.3.2 Varmvattenanvändning

För att resultatet från metoden ska gå att relatera till den framtagna modellen behövde andelen av den tillförda effekten som utgörs av varmvattenanvändning räknas bort. Med "varmvattenanvändning" menas i detta fallet det varmvatten som brukas och inte det vatten som värms upp. I stora flerbostadshus cirkulerar varmvatten ständigt för att kunna säkerställa att det inte sjunker under 50 °C. Den mesta av energin i detta vattnet kan dock komma att gå till uppvärmning (Frederiksen & Werner 2014) och denna delen ska alltså räknas till uppvärmning i detta sammanhanget. I beräkningarna uppskattades andelen av den tillförda effekten som går till varmvattenanvändning till 15 %. Detta är lägre än årsmedelvärden (ibid.) för att ta hänsyn till att uppvärmningen utgör en större del av den tillförda effekten i början av februari.

Effekten som går till varmvatten antas också vara konstant dygnet runt. Detta är uppenbarligen inte fallet; i verkligheten har varmvattenanvändningen i flerbostadshus stora toppar på morgon och kvällar, och är väldigt låg på natten. Antagandet görs för att förenkla beräkningarna.

Antagandet om andelen varmvattenanvändning påverkar effektkvoten i Figur 23. Vid större andelar varmvattenanvändning blir alla avvikelser från det normala mer dramatiska, vilket bland annat gör att den återkommande effekttoppen ökar. Denna ökningen är dock låg fram till en andel på omkring 50 %, varefter ökningen blir mer dramatisk. Beräkningarna av inomhustemperaturen i Figur 24 påverkas inte under avbrottsperioden men som en konsekvens av en relativt högre återkommande effekt blir gradienten under återhämtningsperioden brantare. Beräkningarna av minskad energianvändning påverkas inte av andelen varmvattenanvändning.

Med tanke på ovanstående väntas antagandet om konstant varmvattenanvändning över tid också ha en begränsad påverkan på resultaten. Dock skulle perioder med toppar i varmvattenanvändning kunna påverka vid specifika tider.

7.3.3 Framtagen modell över inomhustemperatur

I Figur 24 föreslår båda appliceringarna av modellen att inomhustemperaturen inte är återställd då uppvärmningseffekten skenbart återgår till den normala effekten. Detta kan inte förklaras av Figur 25 där olika värden av tidskonstanten inte verkar påverka detta. En möjlig förklaring till denna temperaturdiskrepans är att termostaten som ger feedback till kontrollenheten som styr uppvärmningseffekten mäter byggnadens framledningstemperatur och att byggnadens värmesystem inte är i direkt termisk kontakt med byggnadens väggar som lagrar en stor andel av byggnadens termiska energi.

En byggnads momentana effektefterfrågan utgörs av den effekten som tas upp av dom delarna av byggnaden som är i direkt termisk kontakt med värmesystemet. Detta är exempelvis luften runt element eller golv runt golvvärmeledningar. Det är dessa delarna av en byggnad som värms upp först när uppvärmningen återupptas. Värmen sprider sig sedan vidare igenom hela byggnaden, men om överföringskoe-

ficienter i dessa stegen är lägre än den mellan byggnadens värmesystem och delarna i direkt termisk kontakt med detta kommer temperaturgradienterna bli olinjära. Detta skulle göra så att delarna i direkt termisk kontakt med värmesystemet värms upp snabbare och därmed att effektefterfrågan återgår till det normala innan hela byggnaden är återställd.

Att Figur 24 antyder att den normala inomhustemperaturen inte är uppnådd då rumsuppvärmningseffekten skenbart återgår till det normala skulle alltså kunna förklaras genom att exempelvis inomhusluften värms upp snabbare än ytterväggarna. Så småningom kommer inomhusluftens temperatur nära dess normala temperatur och därmed också byggnadens effektupptag. Vid denna tiden är väggarna fortfarande kallare än normalt och alltså saknar byggnaden fortfarande den energin som normalt lagras där. Den framtagna modellen tar inte hänsyn till interna temperaturskillnader och kan därmed inte visa detta.

7.3.4 Konstant återkommande effekt

Appliceringsmetoden som använder medelvärden antar att den återkommande effekten är konstant tills den normala inomhustemperaturen har återställts. Detta antagande verkar inte stämma, redan i Figur 23 syns att den återkommande uppvärmningseffekten inte är konstant utan gradvis återgår till det normala från en initial topp direkt efter avbrottet. Byggnadens framledningstemperatur styrs av en kontrollenhet efter utomhustemperaturen. Det finns inga tecken på att värmesystemet skulle vara begränsat av sig själv eller nätet direkt efter avbrottet; framledningstemperaturen återkommer snabbt och utomhustemperaturen är inte nära en realistisk dimensionerad utomhustemperatur. Om utomhustemperaturen antas vara konstant under återhämtningsperioden borde alltså byggnadens framledningstemperatur också vara det och då byggnadens effektbehov är nära proportionellt med temperaturskillnaden mellan dess framledningstemperatur och temperaturen av delarna i direkt termisk kontakt med värmesystemet skulle detta i sig medföra en gradvis sänkning av uppvärmningseffekten.

7.3.5 Justering av den återkommande effekten

Vid en första jämförelse mellan modellens beräknade minskning i energianvändning och minskningen i den verkliga datan visade modellen en mindre minskning än datan. Av de ingående parametrarna till modellen identifierades tidskonstanten och den återkommande effekten som möjliga källor till avvikelsen. Av dessa uteslöts tidskonstanten eftersom den behövde anta ett värde av 20 timmar för att få skillnaderna i energianvändning att stämma överens, något som ansågs orimligt för stora flerbostadshus. Därmed antogs det framtagna värdet på den återkommande effekten vara fel. Genom att justera värdet på den återkommande effekten tills minskningen i energianvändning matchade den verkliga datan sattes den återkommande effekten till sist till 105 % av normaleffekten. Med detta värdet passade modellen överlag bra med den verkliga datan, men för enstaka byggnader skiljde sig det uppmätta värdet från modellen med upp till 20 %.

Det kan verka omotiverat gå ifrån modellens teori och sätta den återkommande effekten till 105% av det normala, men som tidigare har diskuterats så verkar modellen avvika från verkligheten i slutet av återhämtningsperioden och dessutom stämmer inte antagandet om konstant återkommande effekt. Därmed antas ett empiriska värdet på 105 % vara bättre än det teoretiska.

Eftersom modellen inte beskriver verkligheten helt är det svårt att veta hur väl den beräknade minskningen i energianvändning skulle stämma på andra byggnader än de nio flerbostadshusen som modellen testades mot. Det är inte känt om felmarginalen på 20 % skulle gälla för andra flerbostads hus eller andra sorters byggnader. Modellresultatet är väldigt känsligt även för små ändringar i den återkommande effekten och därmed finns det anledning att misstänka att felmarginalen skulle kunna vara större för andra byggnader.

7.3.6 Förbättrad modell

En möjlig förbättring av modellen är att dela in en byggnad i flera energibalanser och därmed kunna beskriva interna skillnader i temperaturen. En sådan modell skulle eventuellt kunna beskriva återhämtningsperioden bättre och även ge fler insikter i den minskade energianvändningen. Detta skulle dock också innebära fler parametrar som behöver bestämmas vilket skulle göra det betydligt svårare att applicera modellen på verkliga fall. För modeller med fler energibalanser blir systemet snabbt för komplicerat för att lösas analytiskt och det skulle troligtvis krävas ett modeleringsprogram.

7.4 Riskbedömning

De ledningsgrupperna som identifieras med högst risk bör i ett vidare stadie studeras närmare. Enligt teorin är BTG-ledningar med isolering av cellbetong förenat med högre skadefrekvens än annan isolering. Även de ACE-ledningar som är byggda så att röret hålls på plats med hjälp av betongsformar inom mantelhöljet. Ledningstyperna med en mantel av plast hade ett betydligt högre antal tidiga skador än kulvertkonstruktionerna BTG och ACE. Majoriteten av tidiga skador var av primärorsaken installationsfel och efter ungefär 15 år i drift materialfel. Därefter dominerar yttre åverkan som primärorsak. Yttre åverkan är ett resultat av omkringliggande förhållande. I teorin förklarades att framförallt äldre kulvertkonstruktioner påverkas av trafikklaster. Laster från jord kan däremot innebära större sättningsbenägenhet vilket främst påverkar stela ledningskonstruktioner som BTG och ACE då plastmantlade ledningar är friktionsfixerade. Om den specifika högriskledningen som studeras tenderar att vara en av dessa kulverttyper och dessutom ligga i en miljö med stora jord- och trafikklaster bör ytterligare hänsyn tas då det inte bara innebär större sannolikhet för skada utan även betydligt högre reparationskostnader.

Vårt att nämna är också att de ekonomiska kostnader som togs upp endast behandlade kostnader för reparation och delvis för den minskade energianvändning

som avbrottet innebär. Som nämnt i teorin medför avbrottet kostnader för vattenförluster vilka kan argumenteras stå i förhållande till storleken av ledningen och därmed vara starkt kopplat till den givna bedömningen även om de omgivande förhållandena och tiden det tar mellan att skadan uppstår till att den upptäcks givetvis spelar in. Dessutom exkluderades indirekta kostnader som avbrottet innebär för fjärrvärmeföretaget. Däremot kan det genom att utgå från de ledningar som i denna analys identifierats med högst risk i kombination med placeringen av ledningen och erfarenhet inom företaget approximeras om denna kostnad är signifikant.

8 Slutsats

Vid bedömning av sannolikheter för skador valdes parametrarna ledningstyp, ledningsålder, installationsår, nominell diameter och markens genomsläpplighet. Av dessa visade ledningstypen, ledningsåldern och installationsåret tydligast koppling till ledningars skadefrekvens. Resultatet visar att de flesta ledningar har en skadefrekvens på under 0.05 skador per kilometerår, men att vissa ledningar med tidiga installationsår och speciellt ledningar av typen PVC visar en högre skadefrekvens. För de flesta ledningstyper verkade skadefrekvensen befinna sig i en minskande trend över åldern. Det sågs inga tydliga tecken på att ledningarna skulle vara i slutet av sin tekniska livslängd, men gamla BTG- och PEH-ledningar visade eventuellt en ökande skadefrekvens.

Den framtagna modellen tros beskriva inomhustemperaturen under avbrottsperioden väl. Enligt modellen sjunker inomhustemperaturen exponentiellt i förhållande till skillnaden mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen när värmetillskott från fjärrvärmenätet upphör. I modellen beror storleken på temperatur-sänkningen på tidskonstanten, den ursprungliga skillnaden mellan utomhustemperaturen och interntemperaturen samt avbrottets varaktighet. Den framtagna modellen verkar inte beskriva den verkliga återhämningsperioden väl. Den återkommande effekten var inte konstant enligt mätdata från verkliga flerbostadshus. Den återkommande effekten spelar en stor roll för påverkan på energianvändningen. Genom ett antagande om att den återkommande effekten är konstant 105 % av den normala effekten kunde modellen beskriva minskningen i energianvändning från de verkliga byggnaderna inom ett intervall på ± 20 %. Det är inte känt hur väl detta antagandet gäller för andra byggnader.

Väldigt få studier har gjorts som undersöker kunders känslighet vid avbrott och få lagmässiga krav gentemot kunder finns. Likaså finns ingen vedertagen definition eller metod för att bestämma hur känslighet ska mätas. Det som utmärker en störningskänslig kund beror på vad som riskeras vid avbrottet och delas in i hälsorisker, ekonomiska förluster och bekvämlighet. En studie över olika kunders ekonomiska kostnader i samband med leveransavbrott undersöktes. Litteraturen verkar överens om att bostadskunder är minst känsliga även vid längre avbrott. Stora variationer finns inom andra kundgrupper som dessutom påverkas mer av avbrottets varaktighet.

Med information om skadefrekvenser för olika ledningar och vissa av kostnaderna vid avbrott har ledningsgrupper innehållande sårbara ledningar kunnat identifieras. De ekonomiska konsekvenserna baserades på reparations- och återställningskostnader. Kostnader för förlorad energiförsäljning verkade vara mycket liten i jämförelse. Genom identifieringen av de sårbara grupperna är det möjligt att undersöka specifika ledningssträckor och då kunna få mer information om eventuella konsekvenser och kostnader vid ett avbrott baserat på bland annat läge relativt omgivningen och hur många kunder som drabbas.

9 Rekommendationer för framtida studier

Utöver de incitament som finns för att hålla hög standard på leveranssäkerheten i form av direkta kostnader finns även de kostnader som uppstår de förtroendet för fjärrvärmeleverantören sänks. Vid val av uppvärmningssystem väger förtroendet tungt och blir de olägenheter som uppstår vid ett avbrott så som minskad komfort, omfattande vägarbeten eller inläckage av vatten i fastigheter för omfattande riskerar det att utgöra ett hinder för framtida kunder att ansluta sig till nätet. En metod för att kvantifiera vad dessa kostnader innebär hade varit intressant att studera närmare för att på sikt sedan kunna kombinera med denna analys över sannolikheter och direkta kostnader. Detta hade dock krävt mer gedigen beskrivning av varje skada i statistiken.

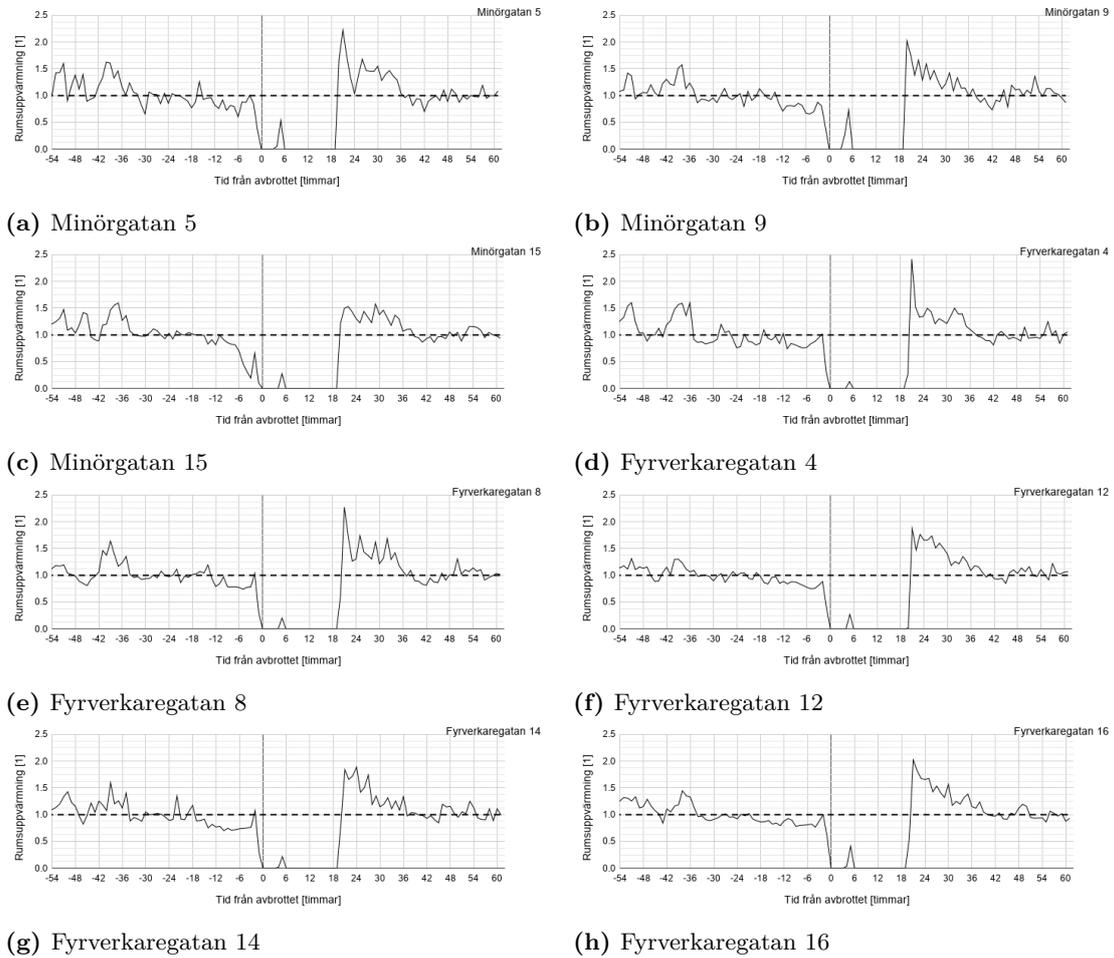
Referenser

- Andersson, S., Molin, J. & Pletikos, C. (1999). *Underlag för riskbedömning och val av strategi för underhåll och förnyelse av fjärrvärmeledningar*. Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB. ISSN:1402-5191.
- Andreasson, M., Borgström, M. & Werner, S. (2009:4). *Värmeanvändning i flerbostadshus och lokaler*. Svensk Fjärrvärme. ISBN:978-91-7381-019-7. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/1194/vaermeanvaendning-i-flerbostadshus-och-lokaler-fjaerrensrapport-2009-4.pdf> [2020-12-16].
- Boverket (2017). *Öppna data - Dimensionerande vinterutetemperatur (DVUT 1981-2010) för 310 orter i Sverige*. <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/oppna-data/dimensionerande-vinterutetemperatur-dvut-1981-2010/> [2021-02-24].
- Boverket (n.d.). *Vilken innetemperatur ska användas vid energiberäkning?*: <https://www.boverket.se/sv/om-boverket/publicerat-av-boverket/fragor--svar/bbr-boverkets-byggregler/avsnitt-9-energihushallning/berakning/vilken-inomhustemperatur-ska-anvandas-vid-energiberakning/#:~:text=I%5C%20bost%5C%20C3%5C%A4der%5C%20anv%5C%20C3%5C%A4nds%5C%2021%5C%20grader,BBR%5C%2C%5C%20avsnitt%5C%206%5C%3A42.> [2021-02-23].
- Carlsson, F. & Martinsson, P. (2006). *Kostnader av elavbrott*. Elforsk rapport 06:15. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21119/kostnader-av-elavbrott-en-studie-av-svenska-elkunder-elforskrappport-2006-15.pdf?fbclid=IwAR3E3YUpNMq2FTYpxbUwembX%20%5C%5C%20WgYP9UBBaOA7eiBjEpfX%20%5C%5C%20TCzWmcziZwk5ZwQ> [2021-02-09].
- Cooke, R. & Jager, E. (1998). A Probabilistic Model for the Failure Frequency of Underground Gas Pipelines. *Risk Analysis*, vol. 18 (4), ss. 511–527.
- Energiföretagen (2016). *Fjärrvärme på djupet*. Energiföretagen Sverige. ISBN:978-91-85775-33-0. https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforeta%20%5C%5C%20gen/det-erbjuder-vi/kompetensforsorjning-dokument/fjarrvarme-pa-djupet_broschyr-for-utskrift.pdf [2020-10-20].
- Energiföretagen (2018). *Allmänna avtalsvillkor*. https://www.energiforetagen.se/globalassets/medlemsportalen-oppet/fjarrvarme/allmanna-avtalsvillkor_naringsikdare_fjarrvarme_180424.pdf [2020-01-19].
- Energiföretagen (2020a). *Energiåret 2019*. Energiföretagen Sverige. https://www.energifo%20%5C%5C%20retagen.se/globalassets/energiforetagen/statistik/energiaret/energiaret_2019_final-4-6.pdf [2020-10-19].
- Energiföretagen (2020b). *Reko fjärrvärme*. <https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/sa-fungerar-det/fjarrvarme/reko-fjarrvarme-riktlinjer-kundrelationer.pdf> [2020-01-19].
- Energimyndigheten (2015). *Risk- och sårbarhetsanalys över energiförsörjningen i Sverige år 2015*. ER2015:22. <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/trygg-energiforsorjning/dnr-2015-3321-rsa-energisektorn-2015.pdf> [2021-02-09].

- Energimyndigheten (2016). *Risken för avbrott i fjärrvärme*. Statens energimyndighet ER2016:03.
- Frederiksen, S. & Werner, S. (2014). *District Heating and Cooling*. Första Upplagan. ISBN:978-91-4408-529-6. Lund: Studentlitteratur.
- Giles, M. B. (2015). Algorithm 955: approximation of the inverse Poisson cumulative distribution function. *ACM Transactions on Mathematical Software*. University of Oxford. <https://people.maths.ox.ac.uk/gilesm/codes/poissinv/paper.pdf> [2021-02-15].
- Gåverud, H., Sernhed, K. & Sandgren, A. (2016). *Kundernas uppfattning om förändrade prismodeller*. Energiforsk AB. ISBN:978-91-7673-301-1. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21111/kundernas-uppfattning-om-forandrade-prismodeller-energiforskrapport-2016-301.pdf> [2020-10-01].
- Kwona, H. J. & Leeb, C.-E. (2011). Probability of pipe breakage regarding transient flow in a small pipe network. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 38. DOI:10.1016/j.anucene.2010.09.026, ss. 558–563.
- Loustarinen, T. (2005). *Värdet av icke levererad fjärrvärme till kunder – fjärrvärme-centralens felfrekvenser i fjärrvärmesystem*. Rapport FoU 2005:11. Stockholm: Svensk Fjärrvärme AB.
- Lygnerud, K. & Ottosson, J. (2019). *Skador och deras förebyggande i svenska fjärrvärmenät*. IVL Svenska Miljöinstitutet AB. ISBN:978-91-7883-061-9.
- Malm, A., Mokhlesi, S., Sernhed, K. & Yarahmadi, N. (2016). *Kartläggning av materialfördelning och skadestatistik av vatten- och fjärrvärmeledning i Sverige som underlag till rekommendationer för datainsamling*. Rapport framtagen inom ramen för projektet Pipestatus. <https://www.swedenwaterresearch.se/wp-content/uploads/2019/05/Litteraturstudierapport-slutversion.pdf> [2020-10-20].
- MSB (2011). *Vägledning för Risk- och sårbarhetsanalyser*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. MSB245. <https://www.msb.se/RibData/Filer/pdf/25893.pdf> [2021-02-10].
- Nilsson, S., Sällberg, S.-E. & Bergström, G. (2006). *Grund förläggning av fjärrvärmeledningar*. Värmegles rapport 2006:25. Svensk Fjärrvärme. ISSN:1401-9264.
- Ottosson, U., Ollerstrand, J. W., Lauenburg, P., Zinko, H. & Brand, M. (2013). *Nästa generations fjärrvärme*. Svensk Fjärrvärme. ISBN:978-91-7381-099-9. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/1274/naesta-generations-fjaerrvaerme-fjaerrsynsrapport-2013-1.pdf> [2020-12-07].
- Selinder, P. & Zinko, H. (2003). *Marginaler i fjärrvärmesystem*. Svenska Fjärrvärmeförningens Service AB. ISSN:1402-5191. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20387392> [2020-10-01].
- Sernhed, K., Ekdahl, E. & Skoglund, P. (2012). *Statusbedömning av betongkulvert*. Svensk Fjärrvärme. ISBN:978-91-7381-090-6.
- Sernhed, K., Jönsson, M. & Olsson, M. (2015). *Riskhantering för underhåll av fjärrvärmenät*. Energiforsk AB. ISBN:978-91-7673-185-7. <https://energiforskmedia.blob>

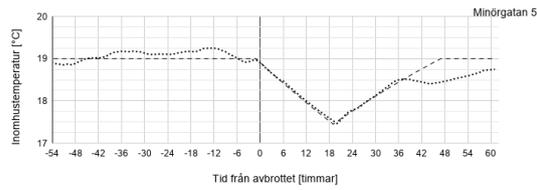
- core.windows.net/media/19566/riskhantering-for-underhall-av-fjarrvarmenat-energiforskrapport-2015-185.pdf [2020-10-12].
- SFS 2018:729. *Fjärrvärmelag*. Infrastrukturdepartementet RSED E.
- SGU (n.d.). *Genomsläpplighet*. <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-genomslapplighet.html?zoom=-751562.775624,6120299.579575,1931310.775624,7649590.420425> [2020-12-16].
- SMHI (n.d.). *Meteorologiska Observationer*. <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=airtemperatureInstant,stations=all,stationid=62040> [2021-01-06].
- Sund, G. (2002). *Utvändig korrosion på fjärrvärmerör*. Svenska Fjärrvärmeföreningen. FOU 2002:80.
- Svensk Fjärrvärme (2007a). *kulvertkostnads katalog*. Januari 2007:1. ISSN: 1401-9264. https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/det-erbjuder-vi/publikationer/kulvertkostnads katalog_2007-1.pdf [2021-01-20].
- Svensk Fjärrvärme (2007b). *PM till Klimat- och sårbarhetsutredningen*. Svensk Fjärrvärme. ISSN 1401-9264. https://www.energiforetagen.se/globalassets/medlemsportalen/oppet/fjarrvarme/pm_till_klimat_och_sarbarhetsutredningen_2007-3.pdf%20%5C%5C [2020-11-06].
- Svensk Fjärrvärme (2014). *Fjärrvärmecentralen - Utförande och Installation. F:101*. Svensk Fjärrvärme. ISBN:978-91-85775-22-4.
- Svensk Fjärrvärme (2015). *Underhållshandboken för fjärrvärmedistribution*. Svensk Fjärrvärme AB. ISBN:978-91-85775-29-3. https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/det-erbjuder-vi/rapporter-och-dokument-fjarrvarme/underhallshand%5C%5Cboken_2015-webb-ratt.pdf [2020-10-08].
- Tereshchenko, T. & Nord, N. (2016). Importance of Increased Knowledge on Reliability of District Heating Pipes. *Procedia Engineering*, vol. 146. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.423, ss. 415–423.
- Vattenfall (2010). *Framtida reinvesteringsbehov för Uppsalas fjärrvärmenät*. Opublicerad rapport.
- Wik, P. B. (2018). *Värmereglering utifrån byggnadens tidskonstant i en värmetrög fastighet*. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1256694/FULLTEXT01.pdf> [2020-12-15].
- Värmeverksföreningen (1992). *Leveranssäkerhet*.
- Öresundskraft (2020a). *Fjärrvärmepriiser Helsingborg och Ängelholm*. <https://www.oresundskraft.se/villa/fjarrvarme/fjarrvarme-priser/> [2020-11-20].
- Öresundskraft (2020b). *Fjärrvärmepriiser näringsidkare*. <https://www.oresundskraft.se/foretag/fjarrvarme/priser-fjarrvarme/> [2020-11-20].

Bilaga - Utökad modelltestresultat

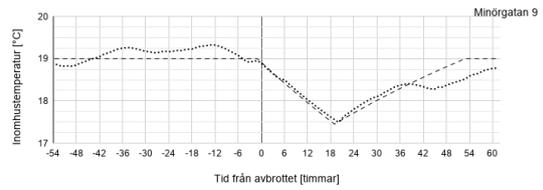


Figur 27: Effektkvoten för resterande flerbostadshus som ingick i testet av den framtagna modellen.

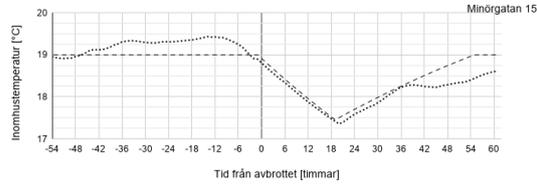
Examensarbete, Ekosystemteknik, LTH
Framtida risker och sårbarheter för fjärrvärmenät



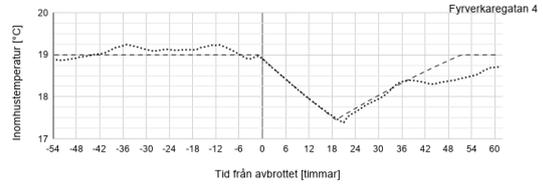
(a) Minörgatan 5



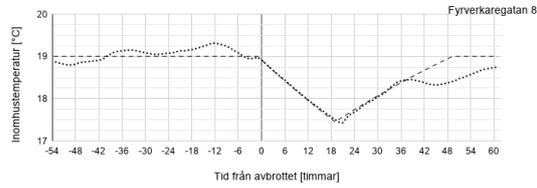
(b) Minörgatan 9



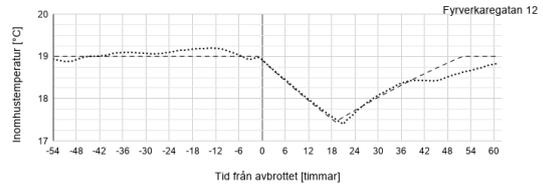
(c) Minörgatan 15



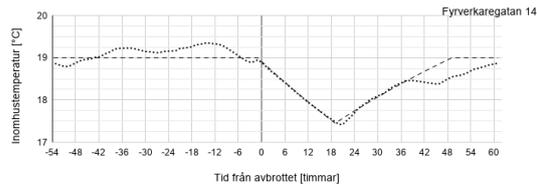
(d) Fyrverkaregatan 4



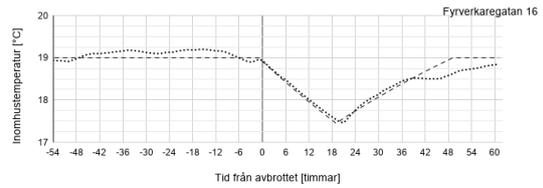
(e) Fyrverkaregatan 8



(f) Fyrverkaregatan 12



(g) Fyrverkaregatan 14



(h) Fyrverkaregatan 16

Figur 28: Beräknade inomhustemperaturer för resterande flerbostadshus som ingick i testet av den framtagna modellen.