

Reduksjon av energibruk i bygninger ved
aktiv bruk av bygningens termiske
masser og av et intelligent IKT-verktøy
for tilbakemelding til bruker

Iver Torstein Skari

Master i energi og miljø
Innlevert: juli 2016
Hovedveileder: Vojislav Novakovic, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2016-118

MASTER THESIS

for

Student
Iver-Torstein Skari

Spring 2016

Reduction of energy consumption in buildings by active use of buildings thermal masses and an intelligent ICT-tool for feedback to the user

Reduksjon av energibruk i bygninger ved aktiv bruk av bygningens termiske masser og av et intelligente IKT-verktøy for tilbakemelding til bruker

Background and objective

The Norwegian company Effektiv Energi AS is developing an intelligent low cost ICT-tool with the goal to bring down heat distribution losses in district heating systems and reduce the heat consumption in buildings without reducing thermal comfort for building occupants, amongst others. The tool will comprise several important elements, i.e. acquisition of a wide range of data from the district heating system and the connected buildings, as well as data analysis and calculation of real-time performance indicators. These figures will be further on used both to send information on the system performances to occupants and to interact with them, as well as to calculate optimal parameters for self-learning algorithms in intelligent controllers.

The student assignment will be focused on an investigation of the available potential for decreasing of the heat consumption by use of the thermal capacities of connected buildings and the district heating grid to reduce the piping water temperatures in the grid. The assignment will also comprise analysis of the influential parameters and real time data measurements that are necessary to obtain the desired functionality of the ICT-tool under development.

The following tasks are to be considered:

1. Perform a literature survey and present results of a literature study of the interaction between the district heating grid and the thermal capacities of connected buildings with focus on potential for decreasing of the heat consumption of this system.
2. Prepare a workable and reliable simulation model using software IDA-ICE. Perform simulation of the interaction between the district heating grid and the thermal capacity of connected building with the aim to discover energy saving potential. Discuss the applicability of the model as well as the analysis of the results.
3. Get an overview over available systems for energy efficiency feedback to occupants as well as the automatic control, based on acquisition of a wide range of data from energy supply

systems, energy consumption in connected buildings and calculation of real-time building performance indicators.

4. Make a draft proposal (6-8 pages) for a scientific paper based on the main results of the work performed in the master thesis.

-- ” --

Within 14 days of receiving the written text on the master thesis, the candidate shall submit a research plan for his project to the department.

When the thesis is evaluated, emphasis is put on processing of the results, and that they are presented in tabular and/or graphic form in a clear manner, and that they are analyzed carefully.

The thesis should be formulated as a research report with summary in both English and Norwegian, conclusion, literature references, table of contents etc. During the preparation of the text, the candidate should make an effort to produce a well-structured and easily readable report. In order to ease the evaluation of the thesis, it is important that the cross-references are correct. In the making of the report, strong emphasis should be placed on both a thorough discussion of the results and an orderly presentation.

The candidate is requested to initiate and keep close contact with his/her academic supervisor(s) throughout the working period. The candidate must follow the rules and regulations of NTNU as well as passive directions given by the Department of Energy and Process Engineering.

Risk assessment of the candidate's work shall be carried out according to the department's procedures. The risk assessment must be documented and included as part of the final report. Events related to the candidate's work adversely affecting the health, safety or security, must be documented and included as part of the final report. If the documentation on risk assessment represents a large number of pages, the full version is to be submitted electronically to the supervisor and an excerpt is included in the report.

Pursuant to “Regulations concerning the supplementary provisions to the technology study program/Master of Science” at NTNU §20, the Department reserves the permission to utilize all the results and data for teaching and research purposes as well as in future publications.

The final report is to be submitted digitally in DAIM. An executive summary of the thesis including title, student's name, supervisor's name, year, department name, and NTNU's logo and name, shall be submitted to the department as a separate pdf file. Based on an agreement with the supervisor, the final report and other material and documents may be given to the supervisor in digital format.

- Work to be done in lab (Water power lab, Fluids engineering lab, Thermal engineering lab)
- Field work

Department of Energy and Process Engineering, 13. January 2016



Olav Bolland
Department Head



Vojislav Novakovic
Academic Supervisor

Research Advisors: Bjørn Naustviuk, Alexander Foss, Effektiv Energi AS

Forord

Denne oppgaven konkluderer mitt femårige masterstudium i energi og miljø ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet ved institutt for energi- og prosessteknikk i perioden januar-juli 2016 og krediteres med 30 studiepoeng.

Jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke veileder Vojislav Novakovic for tilrettelegging og hjelp med oppgaven når jeg har hatt spurt om råd og hatt behov for veiledning. I tillegg vil jeg også rette en takk til Alexander Foss og Bjørn Naustvik hos Effektiv Energi AS for at jeg har fått muligheten til å arbeide med Storhamar skole. Det har vært interessant å utføre simuleringer på en eksisterende bygning.

Til sist vil jeg også takke familie og nære venner som har oppmuntret og motivert meg til å få denne oppgaven ferdig.



Iver-Torstein Skari

Trondheim, 22. juli 2016

Sammendrag

Denne oppgaven består av to hovedelementer; et litteraturstudium som fokuserer på hvordan fjernvarmesystemer og termisk masse i bygninger kan virke sammen for å redusere energibruken til dette systemet og simulering av en skolebygning på Hamar for å undersøke hvordan et slikt samspill påvirker inneklimate i bygningene.

Resultatene fra litteraturstudiet viser at det er mulig å benytte bygningsmassen i et fjernvarmesystem som et midlertidig varmelager. Varmelagringskapasiteten og den termiske tregheten til bygningsmaterialer gjør at den såkalte termiske massen kan absorbere varmeenergi i perioder hvor det er et overskudd av varme og lagre den over tid slik at den kan frigis på et tidspunkt hvor det er et underskudd av varme. Ved å benytte varmesystemet i bygninger til å regulere tidspunktet for når varmeoverføringsprosessen mellom romluft og bygningsmasse finner sted, kan varmelageret benyttes til å forskyve effekttopper i systemlasten til et fjernvarmesystem. Denne driftsstrategien kalles lastforskyvning og litteraturen som er studert i denne oppgaven viser at systemvirkningsgraden til et fjernvarmesystem kan forbedres dersom varmeproduksjonen i systemet reguleres i henhold til en slik strategi.

Simuleringene som presenteres i oppgaven er foretatt med den hensikt å utforske hvor stor lastforskyvningseffekt som er mulig å oppnå i nettet uten at det påvirker kvaliteten på inneklimate i bygningene i systemet. Den simulerte skolebygningen er satt sammen av tre bygningsdeler som har forskjellig konstruksjon og det er derfor simulert én representativ sone fra hver bygningsdel slik at det fremgår hvordan forskjeller i termisk masse påvirker bygningsdelens evne til å fungere som varmelager.

Simuleringsresultatene viser at det fullt mulig å redusere effektuttaket fra fjernvarmenettet med om lag 30 % i tidsrommet mellom kl. 06:00 og kl. 10:00 uten at dette gir noen merkbar endring i komfort. Det er imidlertid også vist at det er mulig å oppnå en reduksjon på hele 75 % dersom det tillates at den ventede andelen misfornøyde (PPD) øker fra 6 % til 8 %. Det ble også avdekket at varmebehovet til den ene bygningsdelen var så lite på dagtid at det ikke hadde noen hensikt å forskyve effektbehovet og i denne simuleringen ble det derfor simulert nattsinking i stedet for effektforskyvning. Resultatene fra denne simuleringen viser at forbruket av energi til oppvarming kan reduseres med nesten 14 % dersom settpunktet for romvarme justeres ned til 16 °C om natten.

De oppnådde simuleringsresultatene er imidlertid kun betraktet som veiledende fordi det er uvisst om bygningskonstruksjonen i simuleringsmodellen har samme mengde termisk masse som i virkeligheten. Til tross for dette har oppgaven vurdert resultattrenden som pålitelig og konklusjonen er derfor at det er mulig å foreta lastforskyvning i nettet uten at det går på bekostning av inneklimatekvaliteten til bygningene i systemet.

Abstract

This thesis consists of two parts; a study of literature that focus on how the interaction between the district heating grid and the thermal mass of its buildings can be utilized to reduce the energy consumption of this system, and simulation analysis of a school building to examine how such interaction affect the indoor climate of buildings in the system.

The study results reveals that it is possible to utilize building mass in a district heating system as a short-term heat storage. The heat capacity and the thermal inertia of construction materials enables the thermal mass to absorb sensible heat in periods where surplus heat is delivered to the building and store it for a short period until it may be emitted back to the room in times of heat deficit. The heat supply systems in buildings can be utilized to control the nature of this heat transfer process in such a way that peak loads in the district heating grid are displaced. This heat supply strategy is called load shifting and this thesis have discovered that the system efficiency of district heating increases if the heat generation and distribution are controlled in accordance with this strategy.

The simulations that are presented in this thesis have been conducted for the purpose of analyzing how large a load shifting effect than can be achieved without jeopardizing the quality of the indoor climate of the buildings in the system. The analyzed school building consists of three building parts that all have different constructions. This implies that the amount of thermal mass would be different in each part and it was hence necessary to analyze one thermal zone from each of them to be able to determine its ability to function as a heat storage.

The simulations results demonstrate that it is possible to reduce the heat load of a building by 30 % during peak hours (06:00–10:00) without causing any perceptible change in the indoor climate. Furthermore, a reduction of 75 % could be achieved in a scenario where the predicted percentage of dissatisfied (PPD) is permitted to increase from 6 % to 8 %. In addition, it was also discovered that one of the building parts had such a low heat demand during daytime that there was no point in reducing it. It did however consume a considerable amount of heat during night, but by applying a night setback schedule, this overnight consumption was reduced by nearly 14 %.

Unfortunately, the building constructions utilized in the simulation model may be different from the real ones and the obtained results should hence be regarded as indicative results only. The discussion included in this thesis has however concluded that the nature of the results is correct and the conclusion is hence that it is possible to perform a load shifting strategy in a district heating grid without reducing the quality of the indoor climate in the system's buildings.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Innhold	vii
Figurer	xi
Tabeller	xv
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 Formål	2
1.3 Begrensninger	3
1.4 Metode	3
1.5 Struktur	4
2 Termisk inneklime	5
2.1 Faktorer som påvirker menneskers varmebalanse	5
2.2 Termisk komfort	7
2.3 Operativ temperatur og komfortindekser	8
2.4 Komfortbedømming i IDA ICE	10
3 Introduksjon til fjernvarmesystemer	11
3.1 Varme- og effektbehov	11
3.1.1 Varmebalanse	11
3.1.2 Variasjon i effektbehov	13
3.2 Varmeproduksjon	15
3.2.1 Grunnlast og spisslast	16
3.2.2 Problemet med effekttopper	17
3.3 Distribusjon og varmeleveranse	18
3.4 Regulering	20
3.4.1 Direkte regulering av varmebehov	20
3.4.2 Regulering av massestrøm	21
3.4.3 Regulering av differensialtrykk	22
3.4.4 Regulering av tur-temperatur	22
3.5 Tap av varme	23

3.6	Varmelagring i fjernvarmesystemer	24
3.6.1	Varmeakkumulering i distribusjonsnettet	24
3.7	Fjerde generasjons fjernvarme	25
4	Lagring av varmeenergi i bygninger	27
4.1	Varmelagringsprinsipper	27
4.1.1	Sensibel varmelagring	27
4.1.2	Latent varmelagring	28
4.1.3	Termokjemisk varmelagring	28
4.1.4	Potensiale for implementering i eksisterende bygg	29
4.2	Lagringsstrategier	30
4.2.1	Aktiv lagring	30
4.2.2	Passiv lagring	32
4.3	Lagringspotensial	32
4.3.1	Varmekapasitet - materialvalg	32
4.3.2	Bygningsdesign og konstruksjon	35
4.4	Bygningers tidskonstant	35
5	Termisk energilagring (TEL) i fjernvarmesystemer	39
5.1	Termisk masse som TEL-system	39
5.2	Lastforskyvning	40
5.2.1	Forskyvningsstrategier	42
5.2.2	Prediktiv lastforskyvning i smarte varmenett	43
5.3	Tidligere studier av lastforskyvning	44
5.3.1	Varmelagring i termisk masse for å redusere effekttopper	45
5.3.2	Syklisk lagring for redusert døgnvariasjon	46
5.4	Fordel som kan oppnås med TEL	48
6	Simulering av Storhamar skole	51
6.1	Bygningen	51
6.1.1	Varmesystemet	51
6.1.2	Antakelser om varmebehov	52
6.1.3	Beregning av tidskonstanter	53
6.2	Metode for simulering	56
6.3	Referansemodell	57
6.3.1	Klima og værdata	58
6.3.2	Romgeometri	58
6.3.3	Bygningskropp	59
6.3.4	Varmesystem	62
6.3.5	Ventilasjon	62
6.3.6	Personer	63
6.3.7	Øvrige interne varmetilskudd	64

6.4	Beskrivelse av simuleringsscenarioer	64
6.4.1	Simulering av referansemodellen	64
6.4.2	Nattsenking gjennom endring av settpunkttemperatur	65
6.4.3	Lastforskyvning gjennom endring av settpunkttemperatur	66
7	Simuleringsresultater	69
7.1	Helårssimulering av referansemodellen	69
7.2	Vinterdagssimulering av referansemodellen	72
7.2.1	Analyse av varmebalansen i sonene	72
7.2.2	Romtemperatur og komfortbedømming	74
7.3	Nattsenking i B104	76
7.3.1	Temperaturer	76
7.3.2	Komfortpåvirkning	78
7.3.3	Resulterende effektbehov og varmeleveranse	79
7.4	Lastforskyvning i A202 og Rom 16	81
7.4.1	Temperaturer	81
7.4.2	Komfortpåvirkning	83
7.4.3	Resulterende effektbehov og varmeleveranse	85
8	Diskusjon	91
8.1	Litteraturstudiet	91
8.2	Tidskonstantberegningen	92
8.3	Simuleringsmodellen	92
8.3.1	Valget av soner og simuleringsintervall	92
8.3.2	Inndataene i modellen	93
8.4	Simuleringsresultatene	94
8.5	Resultatenes betydning for varmedistribusjonen i fjernvarmesystemer	95
9	Konklusjon	97
	Referanser	99
	Vedlegg	103
	A. Utkast til vitenskapelig rapport	A
	B. Inndata fra SIMIEN	B
	C. MATLAB-script og funksjoner	C

Figurer

1.1	Energibruk i Norge fordelt på ulike forbruksgrupper [2].	1
2.1	Kroppens metabolisme øker med graden av aktivitet. [9].	6
2.2	Termisk komfort er et samspill mellom rom, tekniske installasjoner og mennesker [9].	7
2.3	Sammenheng mellom ventet gjennomsnittlig vurdering (PMV) og ventet andel misfornøyde (PPD)	8
2.4	Optimal operativ temperatur for ulike nivåer av aktivitet og bekledning. . .	9
3.1	Variasjon i varmebehov illustrert med gjennomsnittlige timeverdier for varme- last i et fjernvarmesystem. [12]	13
3.2	Et fjernvarmesystem kan benytte flere energikilder [16]	15
3.3	Varighetsdiagram for effektbehovet for et varmeanlegg [13]	16
3.4	Nasjonale tall for energikilder brukt i fjernvarme i 2015 [21].	17
3.5	Undersentral med indirekte kobling mellom fjernvarmenettet og varmesyste- met i en bygning.	19
3.6	Forenkelt fremstilling av fjernvarmeregulering, illustrert med én undersentral.	21
3.7	Eksempel på utetemperaturkompenseringskurve	22
3.8	Oversikt over norsk fjernvarmeproduksjon i 2015. Tallene viser at tapene i distribusjonsnettet utgjør omlag 10% av netto varmeproduksjon [29].	23
3.9	Temperaturforløp ved akkumulering av varme i nettet [30]	24
4.1	Sammenheng mellom temperatur og lagret varmemengde for sensible og la- tente lagringsprosesser [33].	28
4.2	Oversikt over strategier for lagring av termisk energi i bygninger [35].	30
4.3	Termodecksystemet er et eksempel på en aktivt lagringssystem. Illustrasjon hentet fra [36].	31
4.4	Temperaturforløp i tunge og lette bygninger [38].	34
4.5	Avkjølingsforløp for en bygning . Redigert figur fra [13].	36
5.1	Prinsipiell skisse av lagringsprosessen i et TEL-system [32].	39
5.2	Prinsipiell fremstilling av lastforskyvning i et varighetsdiagram.	41
5.3	Illustrasjon av tre forskjellige strategier for lastforskyvning.	42
5.4	Simuleringsresultat fra [47] som viser varmebalanse ved laststyring.	45
5.5	Simuleringsresultat fra [47] som viser det resulterende temperaturforløpet. .	46
5.6	Systemskisse for reguleringsystemet benyttet i et svensk studie [23].	47
6.1	3D-modell av Storhamar skole (skjermdump fra IDA ICE).	51

6.2	Eksempel på gjennomsnittlig ukentlig varmebehov i offentlige administrasjonsbygninger (herunder skolebygg) [14].	52
6.3	Temperaturforøp etter avstenging av siste kilde for varmetilførsel.	54
6.4	Eksempel på beregning av tidskonstant ved hjelp av et idealisert temperaturforløp.	55
6.5	Standard kompenseringsskurve benyttet i IDA ICE	62
6.6	Timeplan for oppholdstid i klasserommene i bygningen.	64
6.7	Settpunktforløp benyttet til simulering av nattsinking (TEST1, TEST 2 og TEST3).	65
6.8	Settpunktforløp benyttet til simulering av nattsinking (TEST 4 og TEST 5).	65
6.9	Settpunktforløpet "LAST 1", benyttet til simulering av lastforskyvning.	66
6.10	Settpunktforløpet "LAST 2", benyttet til simulering av lastforskyvning.	66
6.11	Settpunktforløpet "LAST 3", benyttet til simulering av lastforskyvning.	67
7.1	Resultater fra referansesimuleringen som viser forventet antall misfornøyde (PPD) for hver uke gjennom et helt år.	69
7.2	Resultater fra referansesimuleringen som viser temperaturforløp for uteluft og avtrekksluft fra Storhamar skole.	70
7.3	Oversikt over månedlig levert energi ved simulering av referansemodellen.	71
7.4	Oversikt over sonenes månedlige energibruk til romoppvarming per kvadratmeter.	71
7.5	Dynamisk varmebalanse for de tre simulerte sonene i referansemodellen.	72
7.6	Temperaturforløp for den operative temperaturen i hver enkelt sone.	74
7.7	Komfortopplevelsen i vinterdagssimuleringene illustrert med dynamiske verdier for PPD og PMV.	75
7.8	Operative temperaturforløp i B104 forårsaket av de ulike settpunktforløpene benyttet til simulering av nattsinking.	76
7.9	Resultater som viser hvordan komfortopplevelsen i testsimuleringene er i forhold til referansesimuleringen.	78
7.10	Fremstilling av levert varmeeffekt til romoppvarming for TEST 1, TEST 2 og TEST 3 i forhold til referansesimuleringen.	79
7.11	Fremstilling av levert varmeeffekt til romoppvarming for TEST 4 og TEST 5 i forhold til referansesimuleringen.	80
7.12	Sammenligning av simuleringsresultater for operativ temperatur i A202.	82
7.13	Sammenligning av simuleringsresultater for operativ temperatur i Rom 16.	82
7.14	PPD-verdier beregnet i IDA ICE som viser de forskjellige lastforskyvningens innvirkning på komfortopplevelsen i A202.	84
7.15	PPD-verdier beregnet i IDA ICE som viser de forskjellige lastforskyvningens innvirkning på komfortopplevelsen i Rom 16.	84
7.16	Den dynamiske varmebalansen ved simulering av "LAST 3" som er det settpunktforløpet som gir størst ladeeffekt.	85

7.17 Forholdet mellom overflatetemperaturen på veggene og romlufttemperaturen i Rom 16 ved simulering av "LAST 3".	86
7.18 Levert varmeeffekt ved simulering av forskyvning av varmebehovet til A202.	88
7.19 Levert varmeeffekt ved simulering av forskyvning av varmebehovet til Rom 16.	89

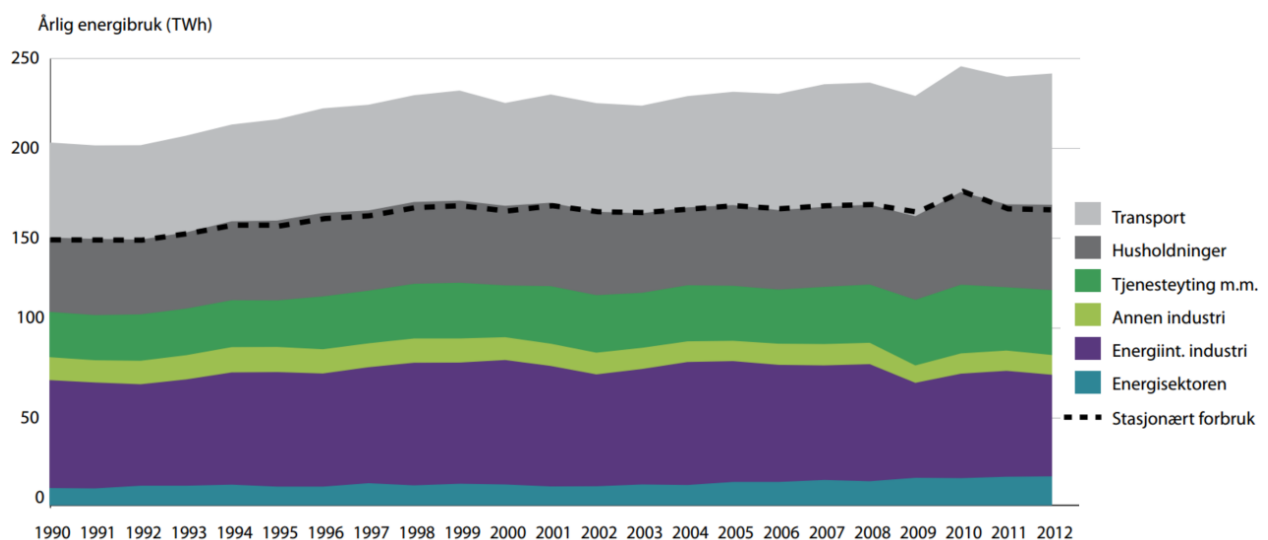
Tabeller

2.1	Effekten av endringer i bekleddningsnivå.	6
2.2	Metabolismeverdier for utvalgte aktivitetsnivåer. [9].	6
2.3	Påvirking og bestemmelse av termisk komfort [9].	7
3.1	Faktorer i bygningers varmebalanse [13].	12
4.1	Termiske egenskaper for typiske byggematerialer (Utsnitt av tabell i [13]). . .	33
6.1	Beregnete tidskonstanter for Storhamar skole.	56
6.2	Soner valgt som gjenstand for simulering i IDA ICE.	57
6.3	Viktige arealdata i referansemodellen.	59
6.4	Utvalgte inndata for bygningskroppen, hentet fra Vedlegg B.	59
6.5	Tekniske spesifikasjoner for vinduene i simuleringsmodellen	60
6.6	Inndata for bygningsdelenes veggkonstruksjon.	61
6.7	Materialegenskaper i IDA ICE.	61
6.8	Sentrale inndata for ventilasjonsanlegget i referansemodellen.	63
7.1	Oversikt over oppnådd reduksjon i energibruk og økning i maksimalt effektbehov som resultat av de forskjellige nattsenkingstestene.	80
7.2	Sammenligning av resultater fra helårssimulering av referansemodellen og helårssimulering der varmetilførselen til B104 styres av ”TEST 5”.	81
7.3	Lastforskyvningenes innvirkning på energibruk og effektbehov i A202.	88
7.4	Lastforskyvningenes innvirkning på energibruk og effektbehov i Rom 16. . .	89

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn og motivasjon

Bygningsmassen i Norge har de siste årene brukt om lag 80 TWh energi årlig, noe som utgjør om lag 40 % av den totale energibruken [1]. Det høye forbruket har bidratt til økt energibevissthet og fokus på energibruk i bygninger, noe som synliggjøres politisk gjennom stadig skjerpede energikrav til nybygg. Energistatistikken i Figur 1.1 viser imidlertid at strengere byggeforskrifter ikke har bidratt til å redusere den totale energibruken hverken for husholdninger eller bygg i tjenesteytende næringer.



Figur 1.1: *Energibruk i Norge fordelt på ulike forbruksgrupper [2].*

En naturlig slutning, som støttes av flere andre studier ([3], [4], [5]), er derfor at det er nødvendig å energieffektivisere eksisterende bygninger for å oppnå en reduksjon i byggsektorens bruk av energi. Byggenæringens Landsforening (BNL) anslår at 75 % av dagens bygninger fremdeles vil være i drift om 30 år og at det er i denne andelen av landets bygninger at minst 80 % av reduksjonspotensialet er å finne [6]. Dette bekreftes også av Enovas potensial- og barrierestudie som har avdekket at en fullstendig teknisk oppgradering av alle husholdninger og yrkesbygg samt krav om at all nybygging foregår på lavenerginivå vil utgjøre en årlig energisparing på 13,4 TWh for husholdninger og 19,5 TWh for yrkesbygg [7]. For å realisere en størst mulig andel av dette tekniske potensialet, etterlyser Enova utvikling av nye løsninger for energieffektiv teknologi.

Nyere studier viser at fjernvarmesystemer vil kunne spille en viktig rolle i fremtidens bærekraftige energisystem, men at dette forutsetter en videreutvikling av fjernvarmeteknologien på flere områder [4]. Dette inkluderer blant annet integrering av driftsstrategier som gjør det mulig å redusere distribusjonstap og samtidig sørge for at

dynamikken i varmeoverføringen blir fleksibel slik at fjernvarmesystemet kan driftes mer strategisk. For å oppnå dette er det nødvendig å betrakte fjernvarmesystemer som mer enn bare et distribusjonsnett, en varmesentral og et antall undersentraler, - det inkluderer også et stort antall bygninger som kan benyttes til midlertidig lagring av varme [8]. Denne termiske lagringskapasiteten burde tas med i betraktningen når nye teknologier og fremtidige driftsstrategier skal utvikles.

Firmaet Effektiv Energi AS er i ferd med å utvikle et nytt styringssystem for fjernvarme. Målet er at systemet skal bidra til å redusere både distribusjonstap og varmebehovet til bygningene i systemet. Teknologien består av et intelligent IKT-verktøy som benytter en adaptiv reguleringsalgoritme til å bestemme turtemperaturen i bygningenes vannbårne varmesystemer. Foreløpig er teknologien i utviklingsfasen, men som et pilotprosjekt drifter den i dag varmesystemet til Storhamar skole. I tillegg til bruk av tradisjonell utetemperaturkompensering (hvor turtemperaturen i varmeanlegget bestemmes av utetemperaturen), benytter styringssystemet på Storhamar skole også målinger av innetemperatur til å bestemme den nødvendige turtemperaturen i varmeanlegget. Reguleringen gjør at varmeavgivelsen til systemet blir bedre tilpasset det faktiske varmebehovet enn hva som er tilfelle når det benyttes utetemperaturkompensering alene. Dette skyldes termisk treghet i bygningen, en egenskap som innebærer at endring i utetemperatur ikke nødvendigvis fører til umiddelbar endring i innetemperatur og derfor heller ikke fører til en momentan økning i varmebehovet. Styringssystemet er imidlertid fremdeles i utviklingsfasen og Effektiv Energi har som mål å integrere funksjoner som utnytter termisk lagringskapasitet i bygningene til å redusere den totale energibruken i fjernvarmesystemet.

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er først og fremst å studere relevant litteratur for å avdekke hvordan fjernvarmesystemer kan utnytte termisk lagringskapasitet i bygninger for å oppnå en energieffektiviserende effekt som ikke går på bekostning av kvaliteten på inneklimaet i de berørte bygningene.

I henhold til oppgaveteksten er det i tillegg ønsket at det konstrueres en simuleringsmodell av Storhamar skole slik at denne kan benyttes til å undersøke om et samspill mellom fjernvarmenettet og bygningens termiske masse kan bidra til å redusere den totale energibruken i fjernvarmesystemet Storhamar skole er en del av. Etersom skolebygningen er en del av pilotprosjektet til Effektiv Energi er det ønskelig å analysere simuleringsresultatene grad av pålitelighet for å avdekke hvorvidt det er mulig for styringssystemet deres å realisere eventuelle reduksjonspotensialer i virkeligheten.

Til sist er det også ønskelig at hovedresultatene fra arbeidet med denne oppgaven fremstilles i et utkast til en vitenskapelig rapport.

1.3 Begrensninger

Oppgaven begrenser seg i all hovedsak til å utforske samspillet mellom fjernvarmesystemer og termiske kapasiteter i bygninger som allerede eksisterer. Det forutsettes at det ikke er økonomisk gjennomførbart for eksisterende bygninger å benytte teknologier og løsninger som krever store investeringer. Som følge av dette fokuserer oppgaven kun på løsninger som kan implementeres uten at det stilles krav til strukturelle endringer, store tekniske oppgraderinger etc. Dette innebærer at det hovedsakelig er driftsstrategier for fjernvarme- og oppvarmingssystemet i de eksisterende bygningene som er i fokus.

I oppgaven forutsettes det at fjernvarmesystemer og bygninger er utstyrt med nødvendig utstyr for regulering og kontroll av varmetilførselen. Slikt utstyr er en forutsetning for å kunne kontrollere varmeutvekslingen mellom primærsiden og sekundærsiden i undersentralene og er derfor nødvendig for alle driftsstrategier. Utover dette er alle bygninger tilkoblet fjernvarmesystemer interessante for denne oppgaven.

1.4 Metode

Siden oppgaven består av to hovedelementer er omfatter arbeidet både innsamling og studie av relevant litteratur og bruk av simuleringsverktøyet IDA ICE.

Litteraturstudiet utgjør grunnlaget for oppgaven. Den studerte litteraturen omfatter alt fra læreboklitteratur, vitenskapelige rapporter og tidligere masteroppgaver, til informasjonskilder som artikler, datablader og faktabokser tilgjengelig på relevante organisasjoners webområde. Litteraturen det refereres til i oppgaven har i all hovedsak blitt oppsøkt gjennom NTNU Universitetsbibliotekets nettbaserte database, men har også i mange tilfeller blitt oppdaget ved gjennomgang av relevante fagbøker som er anskaffet i løpet av studiet.

Hovedtyngden av litteraturen det refereres til gjennom oppgaven behandler temaene termisk lagring i bygg og drift og regulering av fjernvarmesystemer med hensyn på termisk kontroll i bygninger, men en liten andel fokuserer også på bygningers termiske inn klima. I henhold til oppgaveteksten og oppgavens mål vil utvidet kunnskap innen samtlige av de nevnte emnene bidra til at tolkning og analyse av simuleringsresultatene kan utføres på en kompetent måte.

Det andre hovedelementet i oppgaven er energisimulering av Storhamar skole. Det benyttede simuleringsprogrammet, IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE), er et dynamisk simuleringsverktøy som lar brukeren analysere bygningers ytelse med hensyn på energibruk og termisk inn klima. Softwaren utgis av svenske EQUA Simulation AB, og er ifølge utgiveren selv et godt validert verktøy med en bred brukerbasis i Skandinavia.

IDA ICE er et tredimensjonalt simuleringsprogram som tillater flersonesimuleringer på en modell av vilkårlig geometri. Brukeren står fritt til å opprette 3D-modeller av bygninger direkte i programmet eller på grunnlag av importerte tegninger i CAD-format. Modellen kan deretter fritt deles inn i klimatiske soner på den måte brukeren finner det mest hensiktsmessig. Programmet er basert på moduler som beskriver virkemåten til den enkelte parameter og bygningskomponent. Parametere som temperatursettpunkt, intensitet på internlast, bruksmønster etc. kan defineres for den enkelte sone, mens tekniske spesifikasjoner for bygningskroppen, HVAC-systemer etc. kan defineres for alle sonene under ett. Brukeren har dermed mulighet til å foreta detaljerte simuleringer og kontrollere og loggføre alle ønskelige parametere, noe som kan benyttes til å få svært detaljerte simuleringsresultater.

Den høye kompleksitetsgraden fører til at det er svært arbeidskrevende å konstruere en velfungerende modell i IDA ICE og programmet er dermed for avansert for de fleste prosjekter. Kompleksitetsgraden er dog en fordel for denne oppgaven fordi den tillater tolkning og analyse på et nivå som er mer detaljert enn de fleste andre simuleringsprogrammer.

1.5 Struktur

Første del av oppgaven fremstiller resultatene fra litteraturstudiet i form av teorigapitler. I kapittel 2 gis en kort introduksjon til bygningers termiske inneklima. Formålet med dette er å etablere et grunnlag for bedømming av hvorvidt ulike oppvarmingsstrategier gir en komfortabel termisk situasjon inne i bygningen. I kapittel 3 gjennomgås oppbygning og drift av fjernvarmesystemer. Det gis her et overblikk over blant annet varme- og effektbehov, energikilder brukt i varmeproduksjonen og regulering av fjernvarmesystemer. I kapittel 4 gjøres det rede for hvordan bygninger kan lagre varmeenergi og hvilke faktorer som påvirker lagringskapasiteten. Kapittel 5 følger deretter opp med å forklare hvordan et fjernvarmesystem kan driftes for å oppnå et samspill med den termiske lagringskapasiteten i tilkoblede bygninger slik at energibruken i systemet kan reduseres.

I andre del av oppgaven presenteres arbeidet med simulering av Storhamar skole. Kapittel 6 gjør rede for oppbygningen av simuleringsmodellen og de gjennomførte simuleringene, mens kapittel 7 går gjennom simuleringsresultatene. Kapittel 8 diskuterer påliteligheten til oppgavens resultater før kapittel 9 til sist runder av med konklusjonen.

Hovedelementene (inkludert de viktigste resultatene) er i henhold til oppgaveteksten også fremstilt i et utkast til en vitenskapelig rapport. Denne rapporten er inkludert i vedlegg A.

2. Termisk inneklima

Formålet med bygninger er først og fremst å gi ly for vær og vind, men det er også viktig at de tilpasses de aktivitetene som foregår i bygningen slik at inneklimate blir sunt, behagelig og bidrar til god helse, trivsel og prestasjonsevne. Det å oppnå og ikke minst opprettholde et inneklimate som tilfredstiller disse kravene og på samme tid sørge for at det ikke brukes mer energi enn nødvendig, krever god innsikt i de termiske forholdene som påvirker varmebalansen til både mennesker og bygninger.

Kvaliteten på en bygnings inneklimate avhenger av det termiske-, akustiske-, atmosfæriske-, aktiniske- og mekaniske miljøet [9]. Det termiske miljøet er av spesiell interesse for denne oppgaven fordi de klimatiske parametere som har innflytelse på menneskets varmebalanse også påvirker mengden energi som brukes i bygninger. Dette kapitlet forklarer de termiske inneklimateparametere og hvordan kvaliteten på inneklimate i en bygning oppleves og bedømmes av brukerne i bygget.

2.1 Faktorer som påvirker menneskers varmebalanse

Det termiske inneklimate omfatter fire klimatiske faktorer som har innflytelse på menneskers generelle varmebalanse: innendørs lufttemperatur, midlere strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet. Følgende beskrivelser av faktorene er basert på SINTEF Byggforsk sin behandling av begreper for termisk inneklimate [10].

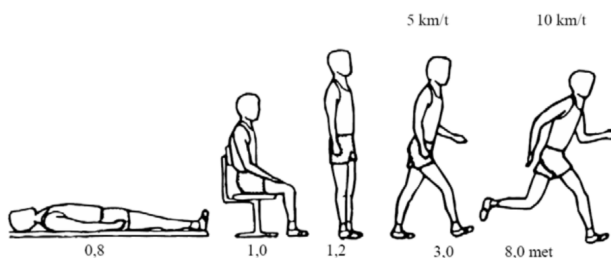
- **Lufttemperatur** er det viktigste målet for termisk inneklimate. Den er definert som målt temperatur uten påvirkning av varmestråling (tørrkuletemperatur). For å unngå termisk ubehag er det viktig at det ikke oppstår for store temperaturforskjeller mellom ankelnivå og hodenivå.
- **Midlere strålingstemperatur** beskriver strålingsutvekslingen som er mellom en person og de omgivende flater i rommet. Strålingsutveksling bidrar til varmetap hos mennesker og det er overflatetemperaturen på de omgivende flatene som bestemmer størrelsen på dette varmetapet.
- **Luftfuktighet** - vanligvis betraktes variasjoner i luftfuktighet innenfor variasjonsområdet 20-60% relativ luftfuktighet å ha liten innflytelse på inneklimate. Faktoren er likevel normal å nevne fordi for høy relativ luftfuktighet kan føre til mikrobiologisk vekst og fare for kondens som leder til bygningsskader, mens for lav relativ luftfuktighet kan resultere i problemer med uttørring av huden.
- **Lufthastighet** - for høy lufthastighet oppleves som trekk noe som gir lokal diskomfort. Trekk er ubehagelig fordi det fører til lokal kjøling av kroppen.

Foruten disse vil også personfaktorene *bekledning* og *aktivitetsnivå* ha betydelig innflytelse på hva som oppleves som det optimale termiske inn klimaet. Bekledning er en faktor som gir mennesker muligheten til å isolere kroppen og dermed regulere dens varmetap. Varmeledningsmotstanden i bekledning angis i den relative enheten *clo* (1 clo tilsvarer standard innendørs vinterbekledning, 0,5 clo tilsvarer lett sommerbekledning). Kroppen er svært sensitiv for endringer i bekledningens isolasjon og som vist i tabell 2.1 kan selv små endringer i bekledningsnivået gjøre store utslag på hvilken temperatur som føles komfortabel.

Type aktivitet	Tilpassende aktivitet	Effekt av tilpassende aktivitet	Endring i optimal operativ temperatur
Bekledning	Ta på genser eller jakke	+ 0,35 clo	2,2 °C
	Tettsittende/løstsittende tøy	± 0,26 clo	1,7 °C
	Tettsittende skjortekrave og slips	+ 0,13 clo	0,8 °C
	Valg av kontorstol	± 0,05 clo	0,3 °C

Tabell 2.1: Effekten av endringer i bekledningsnivå. Utdrag fra tabell i Byggforsk Byggdetaljer 421.501 [10].

Graden av aktivitet påvirker menneskekroppens metabolisme og varmeproduksjon. Som vist i Figur 2.1 og Tabell 2.2, øker varmeproduksjonen med intensiteten på aktiviteten kroppen utfører. Metabolismen angis i den relative enheten *met* (1 met tilsvarer aktivitet for en stillesittende, avslappet person). I tillegg til graden av fysisk aktivitet, vil varmeproduksjon også avhenge av personen, helsesituasjon, alder og kjønn.



Figur 2.1: Kroppens metabolisme øker med graden av aktivitet. [9].

AKTIVITETSNIVÅ	STOFFSKIFTE	
	W/m ²	met
Sovende	48	0.8
Stillesittende, avslappet	58	1.0
Stående, avslappet	70	1.2
Sittende (kontor, skole, lab)	65-100	1.1-1.5
Stående (forretning, lab, lett industri)	90-120	1.6-2.1
Moderat aktivitet (husarbeid, maskinarbeid)	115-160	2.0-2.8
Gå (2 km/h)	110	1.9
Gå (5 km/h)	200	3.4
Løpe (9 km/h)	435	7.5

Tabell 2.2: Metabolismeverdier for utvalgte aktivitetsnivåer. [9].

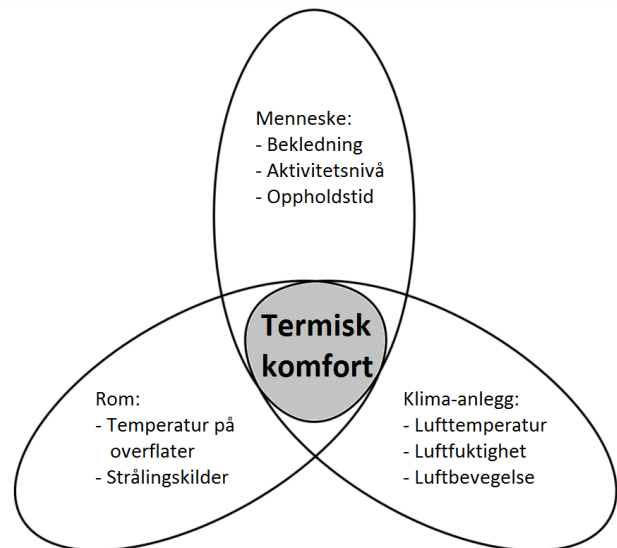
2.2 Termisk komfort

Først når det termiske miljøet er balansert slik at inneklimate opplevs som behagelig kan mennesker oppnå *termisk komfort*. Termisk komfort er definert som ”den sinnstilstand der mennesker uttrykker full tilfredsstillhet med de termiske omgivelsene”. For at flest mulig av menneskene som oppholder seg i en bygning skal oppnå termisk komfort kreves god innsikt i de termiske forholdene beskrevet i forrige delkapittel.

Faktorer som påvirker termisk komfort	
Luftens tørrkuletemperatur	Luftfuktighet
Termisk stråling i rommet	Aktivitetsnivå
Lufthastighet og turbulens	Bekledning
Oppholdstid	Alder
Termiske egenskaper; bord, stoler, gulv etc.	Kjønn
Kroppens stilling stå, sitte, ligge etc.	Sinnstilstand
	Tretthet
	Psykisk legning
	Sult, metthet, fordøyelse

Faktorer som bestemmer termisk komfort	
Hudtemperatur, 32-34 °C	
Kjernetemperatur, 37-38 °C	
Svettesekresjon, hudvåthetsgrad < 0,25	

Tabell 2.3: Påvirkning og bestemmelse av termisk komfort. Basert på tabell i ”Enøk i bygninger” [9].



Figur 2.2: Termisk komfort er et samspill mellom rom, tekniske installasjoner og mennesker [9].

Figur 2.2 viser at termisk komfort er et samspill mellom bygning, tekniske installasjoner og mennesker. Det er dog vesentlig å merke seg at det skilles mellom det som påvirker termisk komfort, og det som bestemmer termisk komfort. Tabell 2.3 viser at det er en persons subjektive opplevelse av det termiske miljøet, ikke de romklimatiske faktorene i seg selv, som avgjør hvorvidt personen er tilfreds. Opplevelsen av termisk komfort krevet at personen hverken ønsker det varmere eller kaldere, verken for kroppen som helhet eller for de enkelte kroppsdeler (ingen tilfeller av lokalt termisk ubehag) [10]. Dette er mulig å oppnå ved å regulere faktorene som påvirker termisk komfort. Den optimale klimatiske tilstanden vil være den som er slik at mengden varme produsert av mennesker gjennom stoffskiftet blir lik den mengden varme som utveksles mellom menneskekroppen og omgivelsene [13]. I en slik situasjon opplever kroppen termisk nøytralitet og personen vil derfor være tilfreds med det termiske inneklimate.

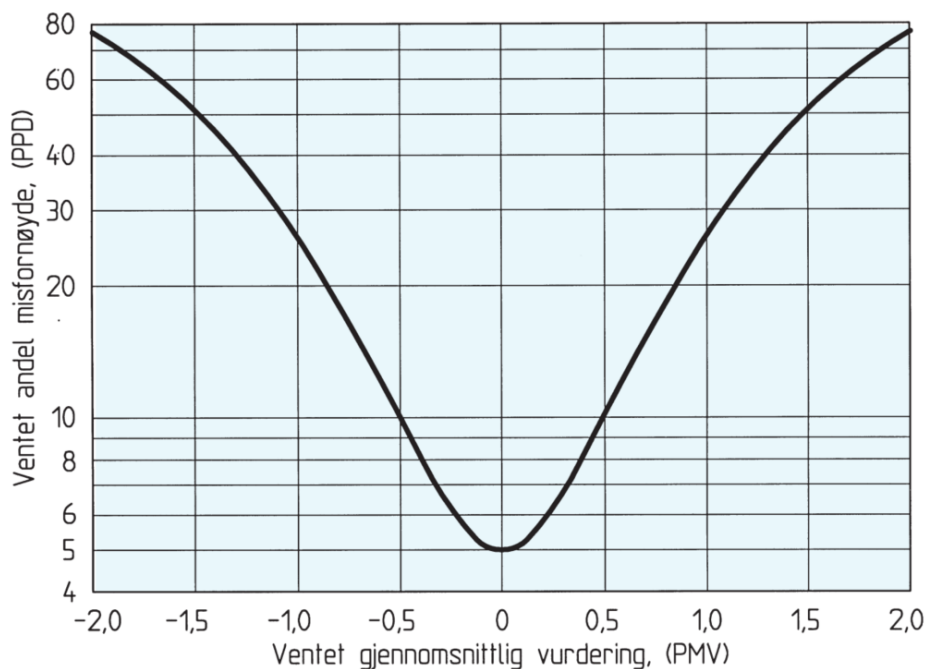
Det er dog slik at opplevelsen av det termiske innemiljøet er svært subjektiv og det regnes derfor som umulig å finne en inneklimate som tilfredsstillende samtlig. Noen mennesker kan for eksempel være svært sensitive for temperaturvariasjon og er dermed vanskelige å tilfredsstillende, mens andre er mindre følsomme. For å avgjøre hvorvidt inneklimate er behagelig for flertallet av menneskene i en bygning, benyttes to standardiserte komfortindekser til å beregne graden av tilfredsstillende.

2.3 Operativ temperatur og komfortindekser

Komfortindeksene PMV (ventet gjennomsnittlig vurdering) og PPD (ventet andel misfornøyde) benyttes for å angi hvordan en tilfeldig sammensatt gruppe mennesker vil vurdere et gitt termisk inneklime. Indeksene baserer seg på Fangers empiriske undersøkelser og er i dag akseptert som standardiserte metoder for vurdering av inneklime [9].

PMV-indeksen bruker en 7-trinns psykofysisk skala (heltallsverdier fra -3 til +3) for å angi ventet gjennomsnittlig vurdering av et termisk klima. Vurdering 0 angir termisk nøytralitet, -1/+1 angir moderat ubehag grunnet henholdsvis lett kulde og lett varme, mens de øvrige verdiene (-3, -2, +2, +3) anses å representere misnøye grunnet for kalde eller varme omgivelser.

PPD-indeksen forutsier hvor stor andel av en gruppe mennesker som vil være misfornøyde med et termisk inneklime, gitt et nivå av bekledning/aktivitet. PPD-indeksen kan beregnes ut fra PMV-verdien i henhold til beskrivelser i NS-EN ISO 7730 [11]. Figur 2.3 viser sammenhengen mellom de to indeksene. Som tidligere nevnt anses det som umulig å oppnå et inneklime som tilfredsstillende alle mennesker, noe som også fremgår av figuren da en PMV lik 0 er ensbetydende med ventet andel misfornøyde lik 5%.



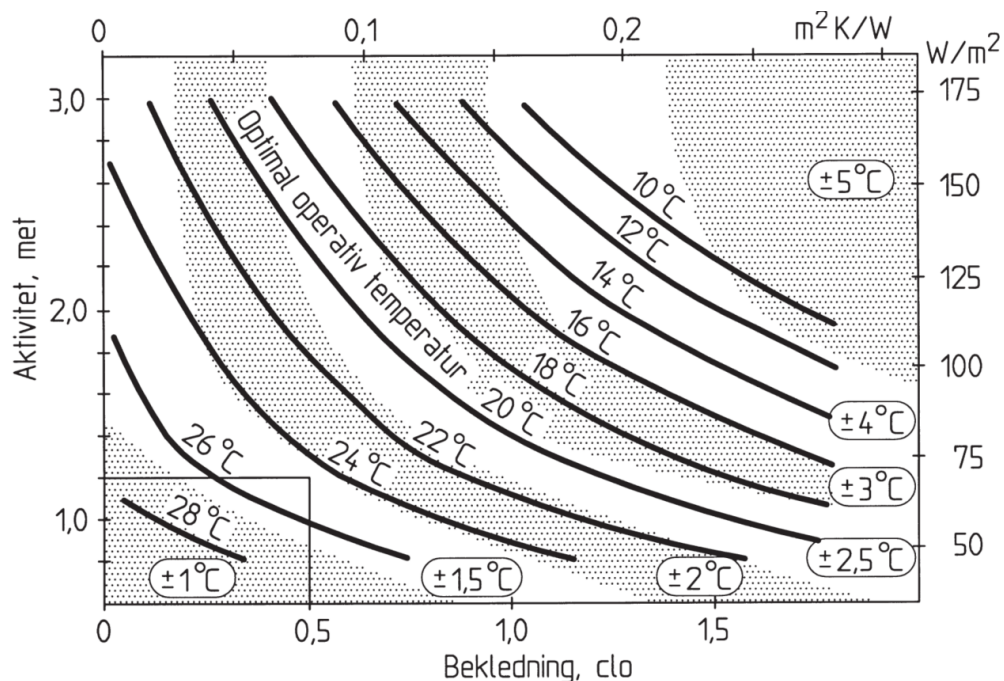
Figur 2.3: Sammenheng mellom ventet gjennomsnittlig vurdering (PMV) og ventet andel misfornøyde (PPD). Fra Byggforsk Byggedetaljer 421.501 [10]

Anbefalte krav til termisk inneklime i et rom er gitt i NS-EN ISO 7730 og omfatter blant annet krav til ventet andel misfornøyde (under 10%) og ventet gjennomsnittlig vurdering (mellom -0,5 og +0,5). Dette betyr at et inneklime som har PMV- og PPD-verdier i dette

intervallet er å betrakte som akseptabelt. Kriteriene gjelder for opplevelsen av termisk komfort i kroppen som helhet.

Det er vanlig å benytte *operativ temperatur* som et mål på opplevd innetemperatur. Operativ temperatur er et konstruert temperaturmål som tar gjennomsnittet av lufttemperatur og omgivende overflatetemperaturer (middelstrålingstemperaturen). I de fleste normale tilfeller er det ikke vesentlig forskjell mellom lufttemperaturen og den operative temperaturen. Dette gjelder så lenge forskjellen mellom middelstrålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4°C , lufthastigheten er mindre enn $0,2\text{ m/s}$ og det ikke er svært høy luftfuktighet [10]. Dette gjør det mulig å forholde seg til ett inneklimaparameter i stedet for fire.

Den optimale operative temperaturen er den temperaturen som gir et forventet gjennomsnittlig vurdering (PMV) lik 0. Figur 2.4 viser hvordan optimal operativ temperatur varierer med ulike bekleddings- og aktivitetsnivå. De skraverte og hvite feltene markerer temperaturintervaller rundt optimal operativ temperatur der forventet antall misfornøyde tilsvarende mindre enn 10%. Det fremgår at moderate svingninger i innetemperatur ($\pm 1,0^{\circ}\text{C}$) ikke vil påvirke oppfatningen av termisk komfort i nevneverdig grad.



Figur 2.4: Optimal operativ temperatur for ulike nivåer av aktivitet og bekleddning. Fra Byggforsk Byggedetaljer 421.501 [10]

2.4 Komfortbedømming i IDA ICE

IDA ICE er et avansert simuleringsverktøy som ved dynamiske modellering inkluderer alle parametere diskutert i dette kapitlet. Lufttemperatur, gjennomsnittlig strålingstemperatur, relativ luftfuktighet og lufthastighet loggføres kontinuerlig for hver time for hver enkelt sone i bygningen. Beklednings- og aktivitetsnivå kan defineres av brukeren slik at programmet beregner graden av termisk komfort basert på dette.

En simulering inneholder derfor detaljert informasjon om inneklimaet i de forskjellige sonene. Brukeren kan analysere temperaturforløp, luft- og varmestrømmer, samt kvaliteten på inneluften for å identifisere hvilke forhold som har ført til eventuell misnøye med inneklimaet.

Simuleringsprogrammet bruker størrelsen PDH (Hours of people dissatisfied) som et helhetlig mål på hvor tilfredsstillende inneklimaet er. PDH er den samlede summen av antall timer hvor mennesker i bygningen har vært utilfredse med kvaliteten på inneklimaet. I tillegg kan programmet generere tabeller og kurver som viser dynamiske verdier for PPD og PMV.

3. Introduksjon til fjernvarmesystemer

For at en bygning skal klare å opprettholde en innetemperatur og et inneklima som tilfredsstillende brukernes komfortbetingelser må varmesystemer aktivt tilføre varme til bygningen. I mange bygninger utvinnes varmesystemer varme direkte fra lokale energikilder, men i bygninger med vannbårne varmesystemer benyttes det ofte varme overført fra et fjernvarmesystem. Et fjernvarmesystem omfatter en eller flere varmesentraler som produserer og distribuerer varme med vann som energibærer. Varmtvannet som produseres distribueres til kundene gjennom et nettverk av nedgravde isolerte rør og overføres til kundenes egne varmesystemer ved hjelp av varmevekslere installert hos den enkelte kunde.

I arbeidet med å identifisere hvordan varme- og effektbehovet i et fjernvarmesystem kan reduseres har det vært nødvendig å analysere hele verdikjeden til varmen som leveres. Dette kapitlet gir en innføring i hvordan fjernvarmesystemer er bygd opp og hvilke faktorer som påvirker driften og virkningsgraden i systemet.

3.1 Varme- og effektbehov

Systemlasten i et fjernvarmesystem består av det akkumulerte varmebehovet til alle tilknyttede bygninger og er dermed direkte styrt av kundenes behov. Lasten består av to komponenter; varmebehov og effektbehov. Varmebehovet er den energimengden som kreves, mens effektbehovet er den hastigheten energimengden må produseres og leveres med. Bygningers varmebehov består av behov for varmt tappevann og behov for romoppvarming. Disse behovene varierer over tid, noe som impliserer at også lasten i fjernvarmesystemet vil variere. Lastvariasjon vil i tur påvirke både varmeproduksjonen og fjernvarmeanleggets drift generelt.

Årsaken til at bygningers varmebehov varierer avhenger av en rekke sosiale og fysiske forhold. Under sosiale forhold inngår den atferd hos mennesker som påvirker en bygnings varmebehov. Det fremste eksemplet på slik atferd er bruk av varmt tappevann [12], et behov som avhenger av menneskenes daglige rutiner. Fysiske forhold er uavhengig av mennesker og inkluderer faktorer som blant annet temperaturforskjell mellom inne- og uteluft, materialegenskaper og isolasjonstykkelse, vindstyrke og solinnstråling [12]. Dette er faktorer som påvirker den termiske balansen i bygninger.

3.1.1 Varmebalanse

Den termiske balansen, eller varmembalansen, er summen av alle varmestrømmer som opererer i en bygning. Når det oppstår temperaturdifferanse mellom inne- og uteluft vil varme strømme fra der det er høy temperatur til der det er lav temperatur. Følgelig vil en utetemperatur som er lavere enn innetemperaturen resultere i at bygningen taper varme til

omgivelsene. Varmetapet vil fortsette til det ikke lenger er noen temperaturdifferanse som driver varmetvekslingen. For å unngå fall i innetemperatur må varmesystemer tilføre en viss varmeeffekt, som vist med ligning (3.1), slik at varmebalanse opprettholdes ved den ønskede balansetemperaturen [13].

$$\Phi_v = (H_T + H_V) \cdot (T_i - T_e) - \Phi_{sol} - \Phi_{in} \tag{3.1}$$

Det fremgår at nødvendig effekt til romoppvarming Φ_v [W] avhenger av både fysiske og sosiale forhold. Varmetapskoeffisientene for transmisjon, H_T [W/K], og infiltrasjon/ventilasjon, H_V [W/K], beskriver den varmen som strømmer gjennom klimaskjermen (bygningsskroppen) på grunn av temperaturdifferansen $T_i - T_e$ [K], og er dermed et fysisk forhold. Det samme gjelder for varmetilskuddet fra sol, Φ_{sol} [W], mens varmetilskudd fra interne kilder, Φ_{in} [W], er en kombinasjon av sosiale og fysiske forhold fordi størrelsen her inkluderer tilskudd fra både personer, belysning og utstyr. For en gitt sum av tilført varmeeffekt til et rom ($\Phi = \Phi_v + \Phi_{sol} + \Phi_{in}$) kan dermed ligning (3.1) skrives om for å utrykke den resulterende innetemperaturen T_i (K), som en funksjon av lufttemperaturen utendørs, T_e (K) og den totale varmetapskoeffisienten, $H = H_T + H_V$:

$$T_i = T_e + \frac{\Phi}{H} \tag{3.2}$$

Ligningene over er noe forenklet da de ikke tar høyde for varmekapasiteten i bygningen som bidrar til at bygningen i seg selv kan fungere både som varmesluk og varmekilde. Denne egenskapen blir viktig når effektbehovet betraktes over tid fordi bygningen absorberer eller frigir varme i perioder hvor det er henholdsvis overskudd eller underskudd av varme. Dette skaper varmestrømmer innad i bygningen som hverken har positive eller negative bidrag til varmebalansen (i den forstand at de gir netto tap eller gevinst av varme i forhold til omgivelsene), men som er med på å jevne ut behovet for varmeeffekt. Denne effekten forklares nærmere i kapittel 4.4.

Tabell 3.1 oppsummerer faktorene i varmebalansen og forhold som påvirker dem.

Ledd i balansen:	Påvirkes særlig av:
Varmetap:	
Transmisjon gjennom omhyllingsflatene	U-verdi, form
Infiltrasjon, luftlekkasjer	Lufttetthet
Ventilasjon	Ventilasjonskrav/-system, varmegjenvinning, styring
Varmetap med avløpsvann	Varmtvannsforbruk
Varmetilskudd:	
Lys og utstyr	Utstyrmengde, effektivitet
Personer	Antall personer, aktivitet
Solinstråling	Vindusløsning, orientering, avskjerming
Romoppvarmingsanlegg	Systemvalg, styring
Vannoppvarmingsanlegg	
Varmelagring:	
Bygningskonstruksjoner	Varmekapasitet, overflate
Møbler	Varmekapasitet, overflate

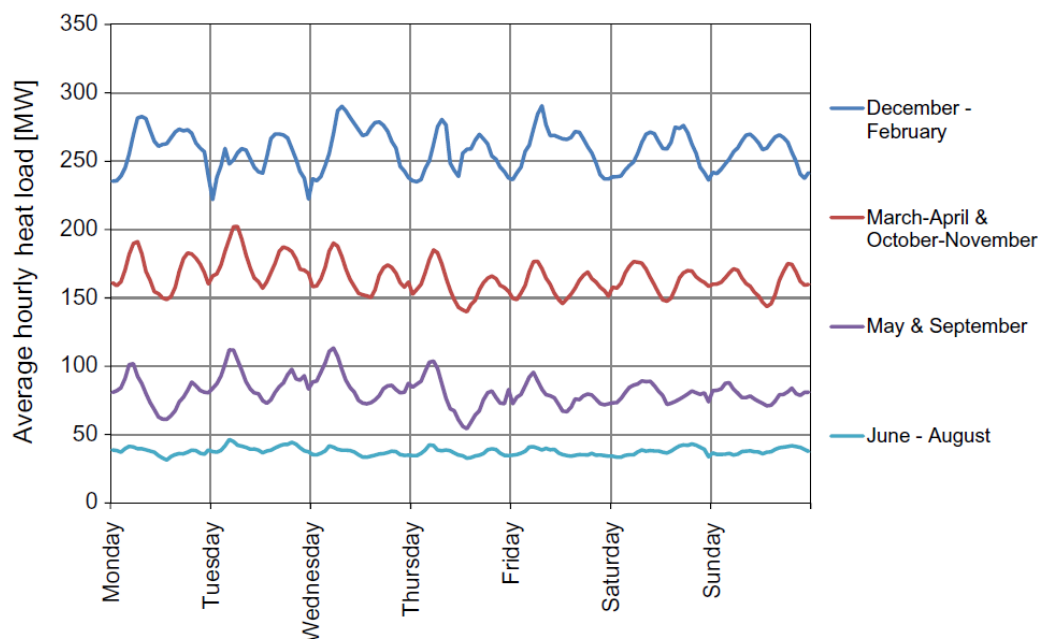
Tabell 3.1: Faktorer i bygningers varmebalanse [13].

3.1.2 Variasjon i effektbehov

Det er allment kjent at den store temperaturforskjellen mellom sommer og vinter fører til stor sesongvariasjon i bygningers behov for varme, men behovet kan også variere betydelig både i løpet av en dag og fra en dag til en annen [12].

Døgnvariasjon i effektbehov skyldes hovedsakelig sosiale forhold [12]. Når en person bruker varmtvann til dusjing eller håndvask fører dette til en liten økning i bygningens momentane behov for varmeeffekt. Det økte effektbehovet er dog kortvarig, for så snart personen er ferdig med aktiviteten vil det igjen reduseres. Dette er et eksempel på sosial atferd som resulterer i variasjon i effektbehov.

Også fysiske forhold kan bidra til å skape varierte effektbehov. Temperaturdifferanse mellom natt og dag er et typisk eksempel på dette. Lav utetemperatur nattetid krever kontinuerlig oppvarming av rom, mens en høyere utetemperatur på dagtid fører til at behovet ikke er like stort. På dagtid vil også solinnstråling fungere som en intern varmekilde og dermed bidra til å redusere oppvarmingsbehovet ytterligere.



Figur 3.1: Variasjon i varmebehov illustrert med gjennomsnittlige timeverdier for varmelast i et fjernvarmesystem. [12]

I fjernvarmesystemer blir døgnvariasjon noe jevnet ut på grunn av geografisk spredning av kunder og det faktum at samtidighetsfaktoren for effektbehov i de fleste tilfeller er betydelig lavere enn 1 fordi effekttopper ikke inntreffer samtidig hos alle kundene. Tross dette, kan anlegg som leverer varme til mange bygninger likevel oppleve store effekttopper. Dette skyldes kollektiv sosial atferd som fører til at menneskers økte effektbehov inntreffer ved noenlunde samkjørte tidspunkt på døgnet. Eksempler på slik kollektiv atferd er bruk

av varmt tappevann i husholdninger og behov for varme i yrkesbygg. I husholdninger er bruken av varmtvann spesielt stor om morgenen og om kvelden - periodene da beboeren er tilstede. I yrkesbygg er behovet for tappevann og romvarme på sitt største midt på dagen - perioden da flest mennesker er på jobb. Slik kollektiv sosial atferd resulterer i at lasten i et fjernvarme system til en viss grad er forutsigbar, noe som fremgår av effektbehovene i Figur 3.1. To viktige karakteristiske trekk som fremgår av figuren er at effektbehovet følger tydelige døgnsykluser og at det er to effekttopper hver dag, en om morgenen og en om kvelden.

I studiet figuren over er hentet fra er det definert to variabler som kan benyttes til å beskrive og sammenligne lastvariasjon i ulike fjernvarmesystemer. De to variablene er [12]:

1. G_a - Årlig relativ døgnvariasjon (annual relative daily variation)
2. D_a - Årlig relativ sesongvariasjon (annual relative seasonal variation)

Den første variabelen; årlig relativ døgnvariasjon, uttrykker hvor stor prosentandel av den årlige varmelasten som leveres ved en effekt som er høyere enn den dagsgjennomsnittlige effekten. Den er dermed et mål på all døgnvariasjon i et fjernvarmesystem gjennom et år og prosentverdien vil naturlig nok variere med både størrelsen og varigheten på effekttoppene i systemlasten. Den andre variabelen; årlig relativ sesongvariasjon, uttrykker på tilsvarende måte hvor stor prosentandel av den årlige varmelasten som leveres ved en effekt som er høyere enn gjennomsnittet for sesongen. For å beregne variabelverdiene benyttes ligningene (3.3) og (3.4) som benytter verdier for systemets time-gjennomsnittlige last (P_h), dag-gjennomsnittlige last (P_d) og årsgjennomsnittlige last (P_a) [12].

$$G_a = \frac{\frac{1}{2} \sum_{h=1, d=1}^{8760, 365} |P_h - P_d|}{P_a \cdot 8760} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.3)$$

$$D_a = \frac{\frac{1}{2} \sum_{d=1}^{365} |P_d - P_a|}{P_a \cdot 8760} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.4)$$

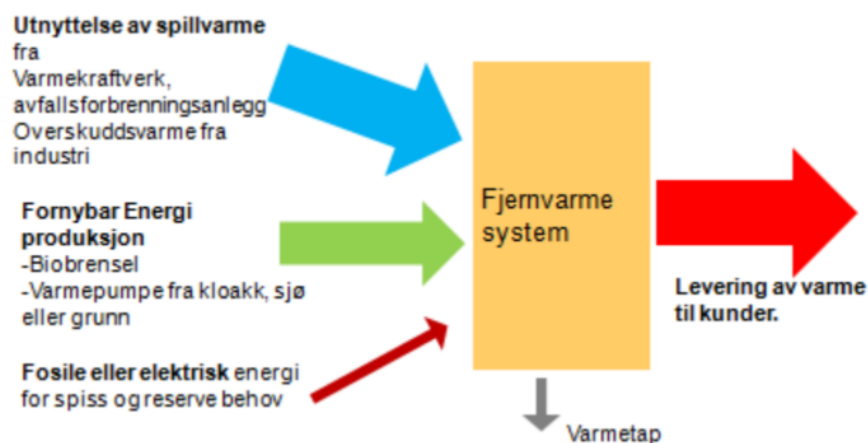
Målinger presentert i [12] viser at gjennomsnittlige verdier for årlig relativ døgn- og sesongvariasjon i varmelasten er henholdsvis 4.5% og 24.0%. Måleresultatene fra dette studiet viser videre at både små og store systemer har omtrentlig samme variasjonsprofil, noe som er overraskende siden det er naturlig å anta at store systemer på grunn av større geografisk spredning av kunder vil ha lavere døgnvariasjon siden returvannet fra de forskjellige undersentralene ankommer varmesentralen til ulik tid.

I et studie som sammenlignet lastprofilene for levert varme i 141 forskjellige undersentraler [14] ble det imidlertid funnet en sammenheng mellom lastvariasjon og aktiviteten i bygningen(e) undersentralen var koblet til. Bygninger som kun var i bruk deler av dagen

(kontorbygninger og offentlige administrasjonsbygg som skoler, etc.) hadde stor variasjon i varmelasten sammenlignet med leilighetskomplekser og andre husholdningsbygninger hvor det typisk er mennesker til stede gjennom hele døgnet. Dette skyldes naturlig nok at varmebehovene til en bygning reduseres når det ikke er personer til stede i bygningen. Målingene som ble foretatt i studiet viste at den årlige relative døgnvariasjonen i de offentlige administrasjonsbyggene var i området 8%-18%, mens den for husholdninger kun var 4%-10% [14].

3.2 Varmeproduksjon

Varmesentralen(e) i fjernvarmesystemet er dimensjonert for å generere en varmeeffekt høy nok til å dekke hele det akkumulerte varme- og effektbehovet til alle de tilknyttede bygningene. Slik stor-skala varmeproduksjon er mer effektivt enn separat produksjon i hver enkelt bygning [4]. Dette skyldes hovedsakelig at det for en varmesentral er mulig å kombinere bruk av flere varmegenererende enheter, noe som muliggjør varmetutvinning fra forskjellige energikilder. Eksempler på vanlige enheter er forbrenningskjeler som kan utnytte avfall og biomasse, fossile eller fornybare gasser eller olje, kjeler som går på elektrisitet (el-kjeler) og varmepumper som henter varme fra omgivelsene [15]. Bruk av flere energikilder sikrer høy leveringssikkerhet og tillater fleksibilitet i varmeproduksjonen. Skissen i Figur 3.2 illustrerer hvordan et fjernvarmesystem kan utnytte flere energikilder for å generere den varmeeffekten kundene har behov for.



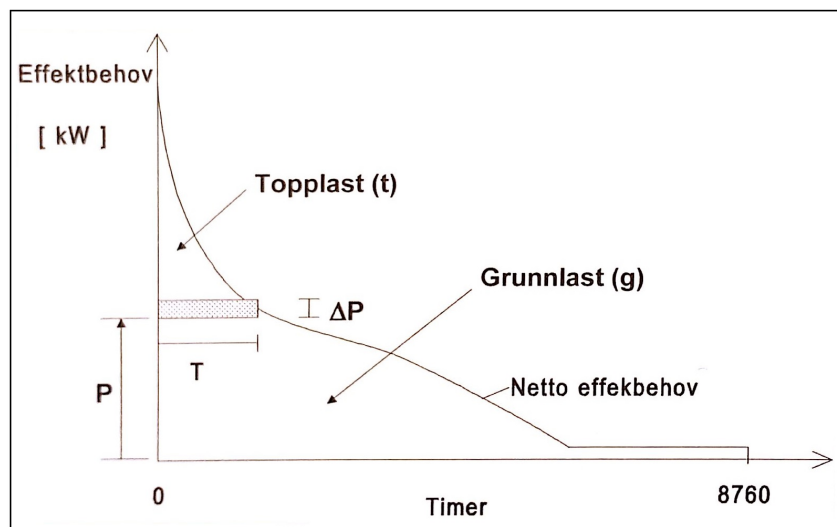
Figur 3.2: Et fjernvarmesystem kan benytte flere energikilder [16]

Spillvarme fra avfallsforbrenning og industri og bruk av biobrenslere som blir til overs ved skogsdrift er de vanligste energikildene i norske fjernvarmeanlegg. Dette er energikilder som ellers ville gått tapt og de bidrar derfor ikke til uttaket av primære energiresurser. Primærenergi er de energiråstoffene som utvinnes direkte fra naturen og alt uttak av primære energiresurser bidrar derfor til naturinngrep. Ved å utnytte energikildene som er å betrakte som restprodukter fra andre prosesser og aktiviteter henter fjernvarmesentraler ut det som er å betrakte som overskuddsenergi, og fjernvarmesystemer bidrar dermed til å

redusere utslipp, naturinngrep og energitap i samfunnet [17]. Utover dette har de nevnte energikildene som regel lav brenselpris og de betraktes som miljøvennlig, noe som gjør fjernvarme til en viktig del av fremtidens energiløsninger [4]. Som resultat av dette er det vanligvis disse energikildene som benyttes til å dekke grunnlasten i et fjernvarmesystem. De øvrige energikildene på figuren, fossile brenslere og elektrisitet, brukes nesten utelukkende til å dekke effekttoppene (spisslasten) som oppstår på kalde vinterdager eller når kundenes kollektive sosiale atferd resulterer i stort behov for varmeeffekt.

3.2.1 Grunnlast og spisslast

For å avgjøre hva som er den optimale kombinasjonen av kjeleffekter er det nødvendig å identifisere det maksimale effektbehovet. Som det fremgår av Figur 3.1 er behovet for varmeeffekt størst i vintermånedene og det maksimale behovet inntreffer som regel på den kaldeste dagen i året. For å kartlegge varigheten av det maksimale behovet er det vanlig å sortere effektbehovet per time gjennom året i et effektvarighetsdiagram. I et slikt diagram er det mulig å lese av både størrelsen og varigheten på det maksimale effektbehovet, samt at arealet under varighetskurven angir den totale energibruken gjennom året. Figur 3.3 viser en prinsipiell fremstilling av effektbehov i et varighetsdiagram.

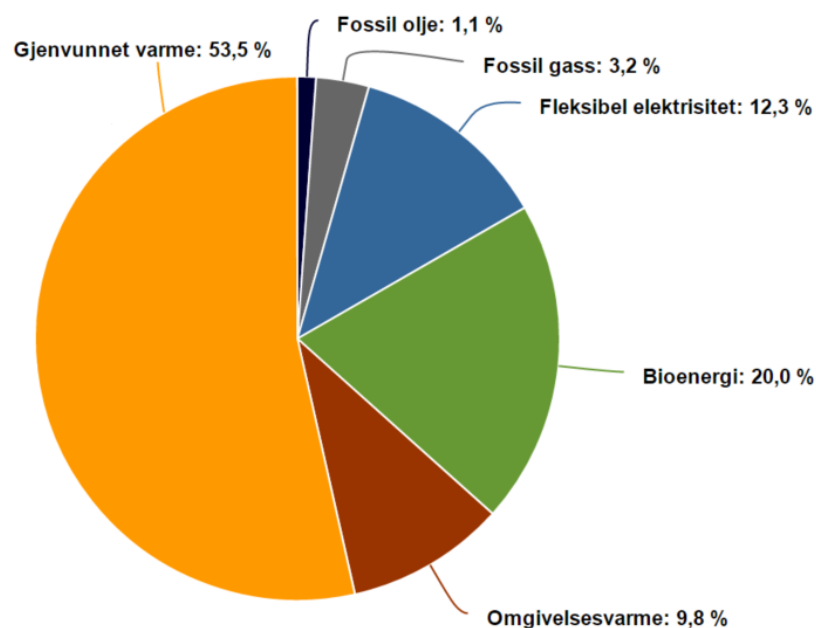


Figur 3.3: Varighetsdiagram for effektbehovet for et varmeanlegg [13]

For å levere energi med lavest mulig gjennomsnittlig energikostnad, benyttes varighetsdiagrammet til å dele effektbehovet inn i grunnlast og spisslast. Ved bestemmelse av kapasiteten (effekten) som skal installeres for å dekke lasten i hvert lastområde fokuseres det på forholdet mellom investeringskostnader og driftskostnader. De typiske grunnlastkildene har som nevnt lav energikostnad, men krever store investeringer for effekt. For spisslastkilder er det motsatt, energikostnaden er høyere og effektkostnaden mindre [13]. For å forsvare investering i en kostbar grunnlastkjel er man avhengig av å få utnyttet denne maksimalt over året. Utnyttelsesgraden kan beskrives med enhetens brukstid. Brukstiden er

definert som energibruken gjennom året delt på maksimalt effektbehov og den betegner dermed hvor lang tid en kjel ville gått på full effekt for å dekke hele energibehovet. Høy brukstid innebærer derfor at investeringskostnaden er fordelt på flere driftstimer, slik at kostnaden per leverte energienhet minimeres. Den optimale effektfordelingen, den som gir lengst brukstid og lavest total kostnader bestemmes derfor av marginalkostnadene til varmekildene, og er gitt som den effektfordelingen der marginalkostnaden (kostnaden for siste leverte energienhet) er lik for begge effektkildene [20].

Vanligvis vil slik kostnadsanalyse resultere i at grunnlastkjeler installeres med en effektdekningsgrad på omkring 40-50% av det maksimale effektbehovet [16], slik at brukstiden blir høy og kjelen kan driftes med effekten den er dimensjonert for. Dette tilsvarer likevel ofte en energidekningsgrad på 80-90% nettopp fordi behovet for maksimal effekt er begrenset til korte kuldeperioder vinterstid. Figur 3.4 inneholder nasjonale tall for energimiksen i norsk fjernvarme som bekrefter at dekningsgraden til energikildene som benyttes i grunnlastområdet (gjenvunnet varme, omgivelsesvarme og bioenergi) til sammen står for over 80% av fjernvarmen som ble leveres til norske bygninger.



Figur 3.4: Nasjonale tall for energikilder brukt i fjernvarme i 2015 [21].

3.2.2 Problemet med effekttopper

For et eksisterende fjernvarmesystem er bruken av spisslast direkte avhengig av varigheten til effekttoppene i systemlasten. Dette innebærer at behovet for spisslastproduksjon av varme vil reduseres dersom effekttoppene flates ut og variasjonen i systemlasten reduseres. Redusert behov for spisslast er fordelaktig fordi miljøpåvirkningen blir lavere når bruken av fossile brensler og andre primærenergikilder begrenses [22].

I tillegg vil en reduksjon i effektbehov resultere i forbedret virkningsgrad for systemet som helhet fordi varmeproduksjonen kan gjennomføres mer energieffektivt. Variasjon i kundenes varmebehov gjør det vanskeligere å produsere varme på en effektiv måte. Hyppige endringer i effektbehov kan resultere i at kjelene må startes/stoppes flere ganger i løpet av en dag, noe som fører til økte varmetap og lavere virkningsgrad for enhetene som utvinner varme [23]. For biokjeler og avfallsforbrenningsanlegg som er enheter som ofte benytter brenslers i fast form, innebærer dette i tillegg økt slitasje og dermed redusert levetid for utstyret - noe som på sikt bidrar til å redusere systemvirkningsgraden ytterligere [24].

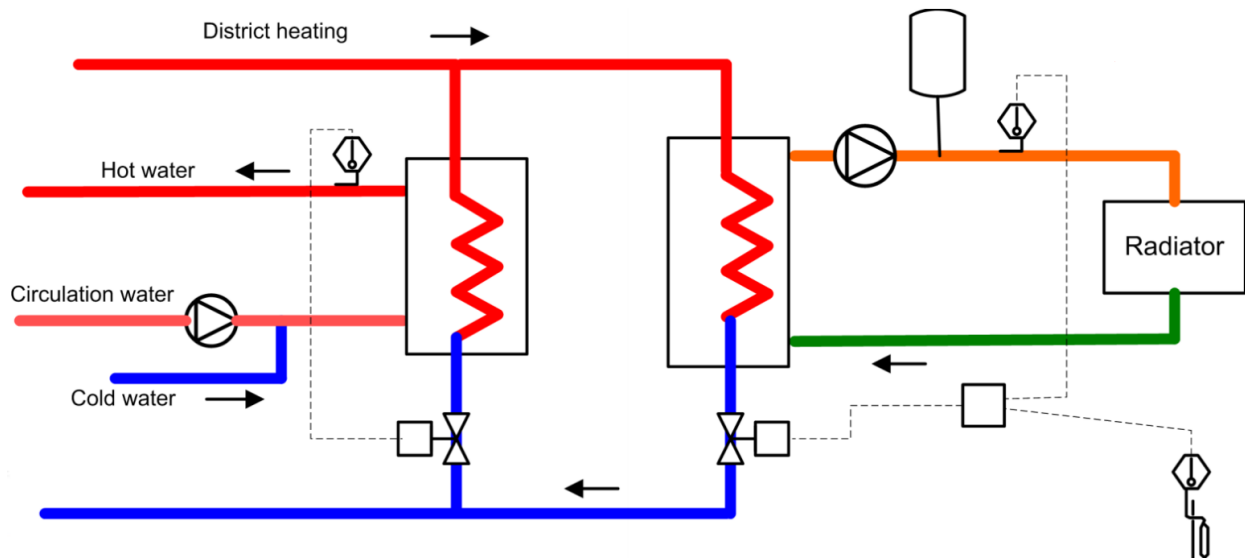
3.3 Distribusjon og varmeleveranse

Vannet som varmes opp i sentralvarmeanlegget transporters til de tilknyttede bygningene gjennom isolerte rør i bakken som er termisk koblet til bygningenes interne vannbårne oppvarmingssystemer gjennom undersentraler. Distribusjonsnettets fra fjernvarmesentralen er primærsiden i systemet, mens det interne vannbårne anlegget hos hver enkelt kunde utgjør sekundærsiden. Det finnes ulike metoder for oppbygging av distribusjonsnettverk (se [25] for en oversikt), men felles for alle nett er at de bygges som en lukket sløyfe av trykksatte rør for transport av varmt tur-vann til undersentralene og avkjølt returvann tilbake til varmeanlegget. Varmeeffekten som distribueres avhenger av massestrømmen i rørene og temperaturdifferansen mellom tur- og returvann.

For at vannet skal sirkulere i fjernvarmenettet benyttes én eller flere sirkulasjonspumper. Pumpetrykket må være stort nok til å kompensere for trykkfallet som oppstår på grunn av friksjon i nettverket, slik at vannet kan transporteres helt ut til det mest perifere punktet i nettet. Nødvendig pumpetrykk, Δp_{pumpe} (Pa), er derfor summen av trykkfallet i turledningen, Δp_t (Pa), trykkfallet i returledningen Δp_r (Pa) og det nødvendige differensialtrykket Δp_{min} (Pa) over den mest perifere undersentralen i nettverket, som vist i ligning (3.5).

$$\Delta p_{pumpe} = \Delta p_t + \Delta p_r + \Delta p_{min} \quad (3.5)$$

Trykket i distribusjonsnettets brukes til å opprettholde den massestrømmen som er nødvendig for å sikre at varmemengden i nettet er tilstrekkelig til å dekke varmebehovet til alle tilknyttede bygninger. Varmebehovene dekkes ved at varmeenergi overføres fra fjernvarmenettet til bygningen gjennom varmeveksling. I Norge er det vanligst å benytte undersentraler for å koble fjernvarmenettet indirekte sammen med de interne vannbårne varmesystemene i hver enkelt bygning. Systemskissen i Figur 3.5 viser hvordan en slik indirekte termisk kobling ser ut. Skissen illustrerer at undersentralen er en komplett enhet, utstyrt med varmevekslere for varmeoverføring og utstyr for regulering av varmeoverføringen.



Figur 3.5: Undersentral med indirekte kobling mellom fjernvarmenettet og varmesystemet i en bygning. Systemskissen viser en forenklet versjon (varmebatteri i ventilasjonsanlegget er utelatt) av oppbygningen til fjernvarmeriggen brukt til undervisningsformål ved Institutt for Energi- og Prosessteknikk ved NTNU [26].

Tur-vannet på primærsiden vil alltid være varmere enn det innkommende returvannet på sekundærsiden og det er temperaturdifferansen mellom disse som bestemmer hvor mye varme som maksimalt kan overføres i varmeveksleren.

Hos kunden kan det oppvarmede vannet benyttes til tre formål [25]:

- Det kan transporteres i vannbårne oppvarmingssystemer for å avgi varme til bygningen gjennom for eksempel gulvvarme eller radiatorer.
- Det kan benyttes til beredning av varmt tappevann. Beredningen kan enten skje direkte eller ved hjelp av en varmtvannsbereder.
- Det kan benyttes til oppvarming av tilluft i ventilasjonssystemet ved hjelp av et vannbasert varmebatteri.

Hvilke formål varmen går til er avhengig av oppbygningen til varmesystemet i den enkelte bygning. Systemskissen i figuren over viser at dette anlegget kun benytter fjernvarme til to av de nevnte formålene; oppvarming av tappevann og romoppvarming. Merk at varmeenergi overføres i separate varmevekslere for de to formålene, slik at det kun overføres varme til tappevann i de periodene det brukes varmt tappevann.

Varmemengden, Q (J), som overføres til kunden kan beregnes på grunnlag av temperaturdifferansen mellom tur- og returvann og mengden vann som har strømmet

gjennom varmevekslerne over en valgt periode, som vist med ligning (3.6).

$$Q = \int_0^V c_p \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot dV \quad (3.6)$$

der

ΔT = temperaturdifferanse mellom tur og returvann (K)

V = vannvolum (m^3)

c_p = vannets spesifikke varmekapasitet (J/kgK)

ρ = vannets massetetthet (kg/m^3)

Tidligere var det vanlig å manuelt lese av energiforbruket én gang i måneden eller én gang i kvartalet, men moderne automatiserte systemer er utstyrt med sensorer og energimålere som gir både kunden og leverandøren fortløpende informasjon om forbruket [14].

Temperatursensorer i tur- og returledning på primærsiden, samt målere som registrer volumstrømmen gjennom hver varmeveksler [26], gjør det mulig å overvåke varmeoverføringen kontinuerlig gjennom hele døgnet. I dag er det derfor vanlig å lese av energiforbruket på time-basis, noe som gir god dynamisk oversikt over lastprofilen i nettet.

3.4 Regulering

Regulering av fjernvarme omfatter fire uavhengige reguleringsfunksjoner som kan illustreres med en forenklet systemskisse som vist i Figur 3.6. De fire funksjonene er [25]:

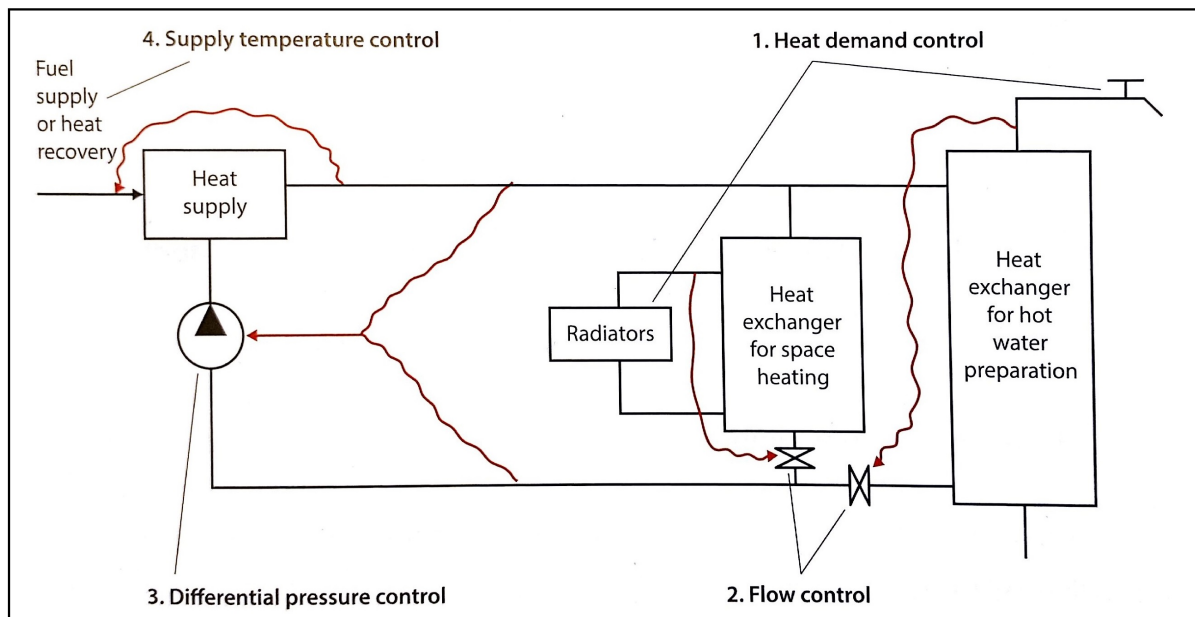
1. Direkte regulering av varmebehov
2. Regulering av massestrøm
3. Regulering av differensialtrykk
4. Regulering av tur-temperatur

De to første reguleringsfunksjonene utføres med utstyr som er plassert på kundesiden av nettet, mens de to sistnevnte kontrolleres direkte av fjernvarmeleverandøren selv.

3.4.1 Direkte regulering av varmebehov

Direkte regulering av varmebehov omfatter manuell åpning/lukking av tappevannskraner og termostatventiler som justerer varmemengden som slippes ut fra radiatorne i hver enkelt bygning. Termostatventiler er bygd opp slik at de stenges og dermed struper sirkulasjonen av varme gjennom radiatorer når temperaturen i et rom stiger. Når det blir kaldere i rommet, åpnes ventilen slik at sirkulasjonen igjen oppstår. En termostatventil stilles inn med et settpunkt for ønsket romtemperatur, noe som innebærer at varmeavgivelsen fra radiatoren reguleres slik at denne temperaturen opprettholdes. De fleste termostatventiler har imidlertid et dødbånd på om lag $\pm 0,5^\circ C$ som medfører at romtemperaturen kan variere i dette området uten at varmeavgivelsen fra radiatoren endres

[8]. Dersom radiatorene i en bygnings varmesystem ikke har termostatventiler reguleres oppvarmingsbehovet av et åpent reguleringssystem som ikke mottar informasjon om den faktiske innetemperaturen [25].



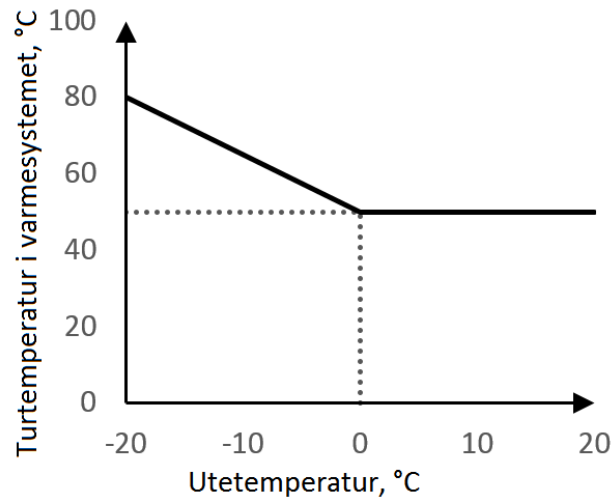
Figur 3.6: Forenkelt fremstilling av fjernvarmeregulering, illustrert med én undersentral [25].

3.4.2 Regulering av massestrøm

Regulering av massestrøm skjer i fjernvarmesystemets undersentraler ved regulering av ventilåpningen til en reguleringsventil. På denne måten reguleres vannmengden og følgelig varmemengden som strømmer inn på varmevekslerne i undersentralen [25]. Massestrømmen gjennom varmeveksleren som varmer opp tappevann bestemmes av en termostat som kontrollerer om vannet som kommer ut av varmeveksleren holder den ønskede settpunkttemperaturen. For massestrømmen gjennom varmeveksleren som varmer opp vannet i romoppvarmingskretsen reguleres ventilåpningen slik at turtemperaturen til enhver tid stemmer med settpunkttemperaturen i dette systemet. Settpunkttemperaturen for det interne varmesystemet bestemmes vanligvis på grunnlag av utetemperaturen ved hjelp av en såkalt kompenseringsskurve, som vist i Figur 3.7.

Ved å kompensere turtemperaturen inn på varmesystemet etter utetemperaturen unngås unødvendig høye returtemperaturer fra varmesystemet, noe som igjen fører til at returtemperaturen i selve fjernvarmenettet blir så lav som mulig. Det er normalt å etterstrebe en lav returtemperatur i nettet ettersom høye temperaturer kan redusere virkningsgraden til varmesentralen og føre til økte varmetap i nettet [27].

Temperaturkompensering er således et reguleringsprinsipp som benyttes for å optimalisere driften av hele fjernvarmesystemet.



Figur 3.7: Eksempel på utetemperaturkompenseringskurve

3.4.3 Regulering av differensialtrykk

Differensialtrykket i systemet reguleres ved hjelp av sirkulasjonspumpen. På grunnlag av målt differensialtrykk bestemmer en regulator hvor stor pumpeeffekt sirkulasjonspumpen må levere for å sikre at et forhåndsbestemt differensialtrykk opprettholdes ved nettverksperiferien. En slik reguleringsfunksjon er viktig fordi den sørger for at reguleringsventilene i den siste undersentralen er i stand til å sende varme inn på varmevekslerne som overfører varme til bygningen(e) som er koblet til denne undersentralen [25].

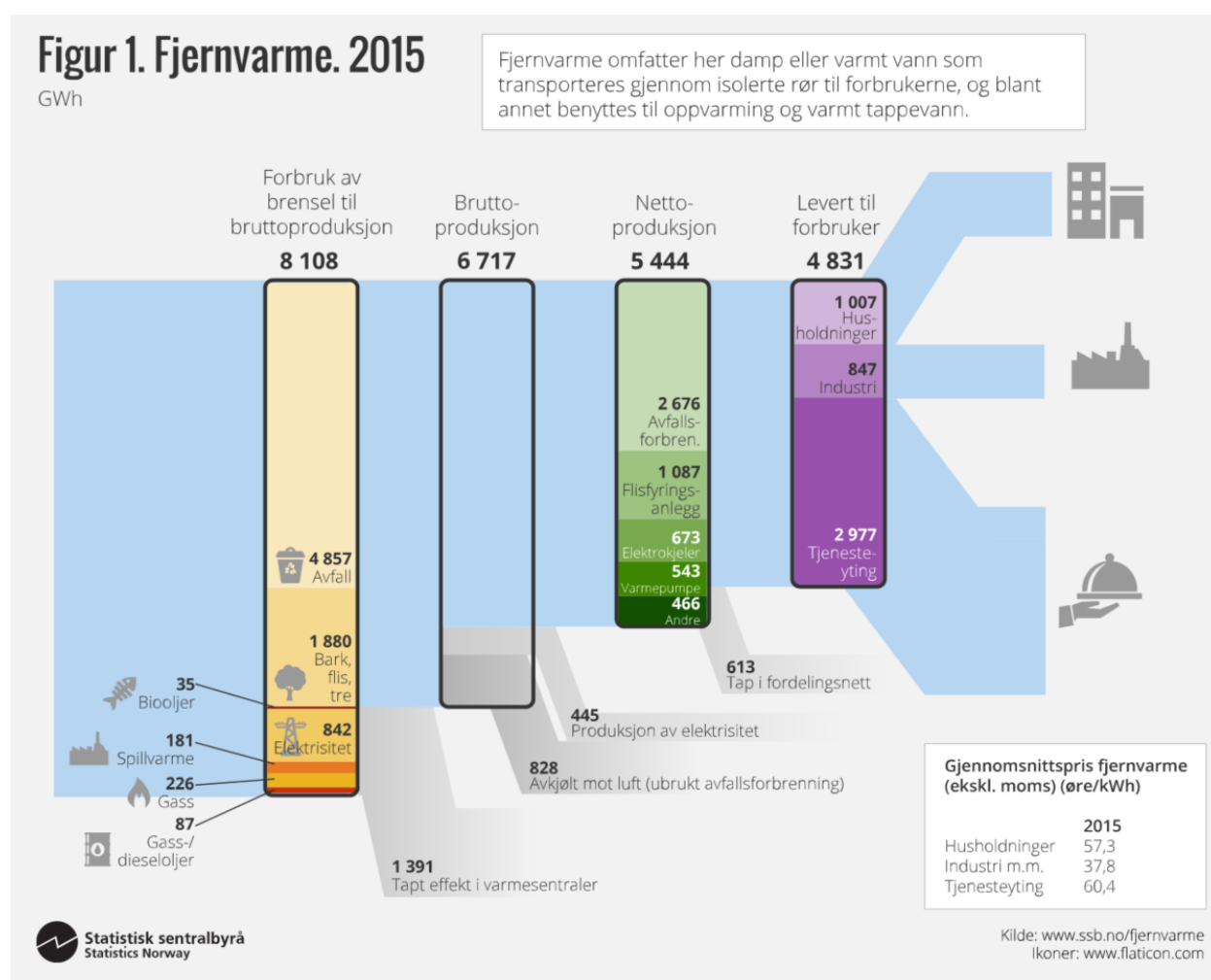
3.4.4 Regulering av tur-temperatur

Siden varmemengden som leveres i fjernvarmenettet avhenger av temperatuddifferansen mellom tur- og returvann, kan den tilgjengelige varmeeffekten kontrolleres ved å regulere turtemperaturen ut fra varmesentralen. Turtemperaturen reguleres i henhold til varmebehovet og vil følgelig være høyest på den kaldeste dagen i året, ved den såkalte dimensjonerende utetemperaturen.

Temperaturdifferansen mellom turvann og returvann avgjør hvor stor varmeeffekt systemet kan levere. Temperaturen på returvannet kan ikke kontrolleres direkte da den er et resultat av alle avkjølingsprosessene i de forskjellige undersentralene, noe som betyr at temperaturdifferansen og varmeeffekten i nettet reguleres ved å regulere temperaturen på turvannet. Turtemperaturen holder vanligvis et stabil nivå som først økes dersom det er behov for større varmeeffekt i nettet. Den høyeste mulige turtemperaturen er den systemet er designet for og denne er vanligvis gitt som en funksjon av den såkalte dimensjonerende utetemperaturen [25].

3.5 Tap av varme

Når varmt vann distribueres i fjernvarmenettet vil noe varme gå tapt til omgivelsene. Av den grunn må mengden varme som produseres i fjernvarmeanlegget være større enn det faktiske behovet, slik at man sikrer at mengden varme som faktisk leveres er tilstrekkelig til å dekke kundenes behov. Distribusjonstap i fjernvarmenettet omfatter transmisjonstap til grunnen, intern varmeovergang mellom tur- og returledning og energi til pumping av vannet i rørledningene. De to første er rene energitap, mens en del av energien til pumpearbeidet går over til varmeenergi grunnet friksjonstap i rørene og pumpeenergi er dermed ikke et rent tap. Figur 3.8 illustrerer at om lag 10% av netto produsert fjernvarme i Norge i 2015 gikk tapt i distribusjonsnett. Denne tapsandelen har vært stabil de siste 30 årene [28].



Figur 3.8: Oversikt over norsk fjernvarmeproduksjon i 2015. Tallene viser at tapene i distribusjonsnett utgjør omlag 10% av netto varmeproduksjon [29].

Hvor mye varme som går tapt til grunnen avhenger blant annet av hvor godt isolert rørledningene er, samt avstanden fra kilden til sluttbrukeren av varmen [25]. Tapsgraden avhenger av temperaturdifferansen mellom vannet i rørene og omgivelsestemperaturen rundt rørene [12]. Når effektbehovet er høyt må turtemperaturen økes for å sikre at den

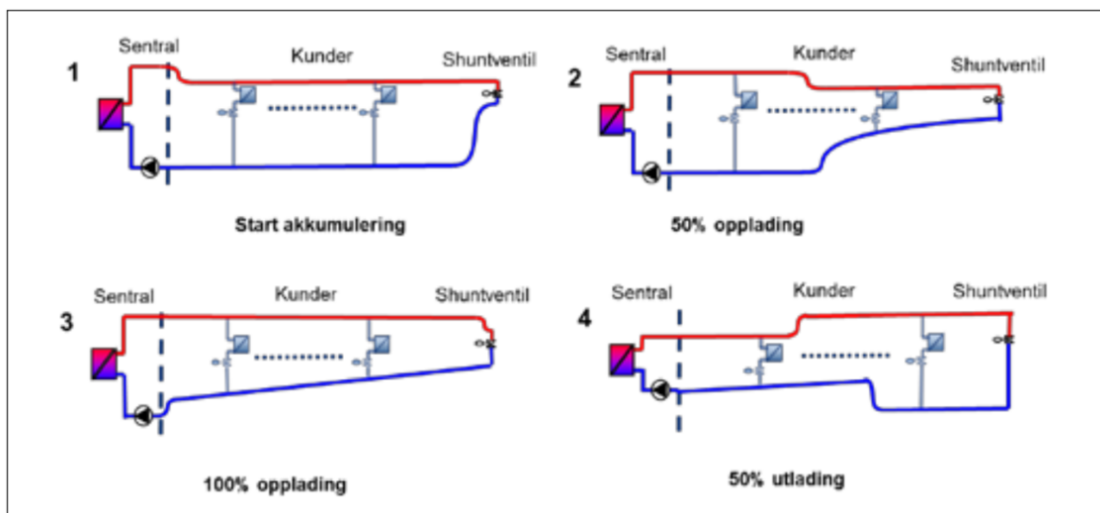
mest perifere undersentralen mottar tilstrekkelig varmeeffekt. Økte temperaturer medfører økte varmetap til grunnen og resulterer derfor i lavere virkningsgrad for distribusjonen. For å minimere tapene er det derfor av interesse å finne reduksjonspotensialer i effektbehovet, slik at temperaturene i nettet kan senkes.

3.6 Varmelagring i fjernvarmesystemer

I prinsippet er varmeproduksjonen i et fjernvarmesystem direkte drevet av øyeblikkelige behov, noe som impliserer at varmeeffekt må produseres og leveres i henhold til kundenes krav. Ved slik drift vil imidlertid variasjonen i kundenes varme- og effektbehov føres direkte over til varmesentralen. For å jevne ut variasjonen og oppnå mer effektiv varmeproduksjon er det vanlig å akkumulere og lagre varme i forkant av forventede effekttopper, slik at den lagrede varmemengden kan benyttes til å dekke deler av effektbehovet. Bruk av akkumulatortanker for lagring av varmt vann er en relativt vanlig metode for slik varmelagring i fjernvarmesystemer, men det er også mulig å akkumulere varme i selve distribusjonsnettet.

3.6.1 Varmeakkumulering i distribusjonsnettet

Dersom man er i stand til å forutse effekttopper i bygningers varmebehov vil det også være mulig å redusere behovet for effekt idet effekttoppen inntreffer [25]. Årsaken er at forutsigbar last gjør det mulig å utnytte distribusjonsnettet på samme måte som man bruker en akkumulatortank - til å lagre varme når den er tilgjengelig, for så å benytte den på et senere tidspunkt når behovet er høyere.



Figur 3.9: Temperaturforløp ved akkumulering av varme i nettet [30]

Vannet i et fjernvarmenett har stor termisk lagringskapasitet og dermed stor evne til å akkumulere varmeenergi. Akkumulering av varme gjennomføres ved å øke turtemperaturen

ut på nettet over det nivået som er nødvendig for å dekke varmelasten. Økt temperatur er ekvivalent med økt varmemengde og innebærer derfor at det blir et overskudd av varme i nettet. Det tar tid før den økte temperaturfronten når ut til kunden og det er denne forsinkelsen som gjør varmeakkumuleringen mulig. Den akkumulerte varmen vil være tilgjengelig i nettet frem til uttaket av varmeeffekt øker, eller til den er transportert tilbake til varmesentralen. Figur 3.9 viser hvordan temperaturforløpet i nettet blir ved slik drift. Varmeakkumulering stiller økte behov til pumpeeffekt og gir større varmetap i nettet, men vil likevel gi økonomiske gevinster så lenge det er en viss prisdifferanse mellom grunnlastkilden og spisslastkilden som alternativt hadde blitt benyttet [30].

Varmeakkumulering er en relativt vanlig driftsstrategi i fjernvarmeanlegg fordi det er mulig å oppnå fordeler som:

- Rimelig energi fra grunnlastkilder kan lagres og benyttes til å dekke deler av effekttoppene som man vanligvis dekker utelukkende med dyrere spisslast.
- Svingninger i effektbehov kan jevnes ut slik at disse lettere kan håndteres med trege bio- og avfallskjeler [30].

I tillegg kan varmeakkumulering i nettet benyttes til å forsinke ”morgentoppene” i effektbehovet. I mange fjernvarmeanlegg blir spisslastkjeler koblet inn om kvelden og driftes natten over slik at man unngår å måtte rykke ut tidlig på morgenen for å koble inn spisslastkjelene før systemlasten øker. Dette kan man unngå ved å begynne og akkumulere varme på et tidspunkt som gjør at nettkapasiteten er full når morgentoppene kommer, slik at behovet for ekstra spisslasteffekt forsinkes.

3.7 Fjerde generasjons fjernvarme

De fleste fjernvarmeanlegg som er i drift i dag er anlegg som benytter systemløsninger som tilhører den såkalte tredje generasjonen av fjernvarme - en generasjon som kjennetegnes av varmedistribusjon ved middels ($80 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperaturnivå. Denne tradisjonelle systemløsningen er dog i ferd med å bli utdatert grunnet forbedret teknisk standard i nye bygninger. Dagens bygninger blir bygd med tettere bygningskropp og mer effektive varmesystemer, noe som reduserer oppvarmingsbehovet i det enkelte bygg. For fjernvarmesystemer innebærer dette at det ikke vil være økonomisk å tilføre høytemperatur varme til et område med mange lavenergibygnings ettersom forholdet mellom varmetap i nettet og varmemengde solgt til kunder blir uakseptabelt høyt [4]. Den nye byggenormen resulterer dermed i at tradisjonelle fjernvarmesystemer ikke vil bli konkurransedyktig i fremtiden og utviklingen av nye, lavtemperatur fjernvarmesystemer er derfor i gang. Disse nye systemene kalles gjerne fjerde generasjons fjernvarme [3].

Hovedforskjellen mellom tredje og fjerde generasjon fjernvarme er at distribusjonstemperaturen er redusert fra $80 - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $50 - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27]. Dette gjør at de

nye systemløsningene er tilpasset energigjerrige bygg med lave varmebehov og mer effektive varmesystemer som ikke krever like høye turtemperaturer. Det lave temperaturnivået vil bidra til å redusere varmetapene i fordelingsnettene og i tillegg gjøre det mulig å ta i bruk fornybare lavtemperatur energikilder i varmesentralen, slik som for eksempel overskuddsvarme fra andre bygg, solvarme og geotermisk varme [3].

For eksisterende bygninger vil integrering av den nye generasjonen fjernvarme ha sine utfordringer. Varmesystemene i eldre bygg er gjerne dimensjonert for høye temperaturer, tilpasset tredje generasjons fjernvarme. Dersom distribusjonstemperaturene i disse varmesystemene reduseres vil dette gå ut over varmeavgivelsen og systemet kan få problemer med å dekke varmebehovet i disse bygningene. Det er med andre ord viktig å finne frem til og identifisere tiltak som kan redusere varmebehovet i eksisterende bygninger og dermed bidra til å muliggjøre en overgang til fjerde generasjons lavtemperatur fjernvarme. Flere studier rapporterer imidlertid at det foreløpig ikke er funnet noen kostnadseffektive tiltak som kan bidra til å realisere dette i nærmeste fremtid ([3], [4]).

4. Lagring av varmeenergi i bygninger

For å kunne benytte termiske kapasiteter i bygninger til å redusere varme- og effektbehovet i fjernvarmesystemer er det nødvendig å studere hvordan termisk energi lagres i bygninger. Dette kapitlet gir derfor en innføring i termisk energilagring (TEL) i bygninger.

4.1 Varmelagringsprinsipper

Det er vanlig å kategorisere varmelagring etter hvilket lagringsprinsipp som benyttes. Det finnes tre forskjellige prinsipper for lagring av varme i bygninger: lagring av sensibel varme, lagring av latent varme og termokjemisk lagring av varme.

4.1.1 Sensibel varmelagring

Lagring av sensibel varme, ofte betegnet følbar varme, kjennetegnes ved at lagringsprosessen fører til temperaturendringer i lagringsmediet. I bygninger er vi omgitt av materialer som lagrer følbar varme; vann, luft, mur, betong etc. Dette er materialer som ved varmeopptak vil få en økt temperatur, og ved varmeavgivelse få en lavere temperatur, noe som impliserer at den lagrede varmemengden er temperaturavhengig. Mengden følbar varme som er lagret i et materiale er gitt av ligning (4.1).

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V \Delta T \quad (4.1)$$

Den lagrede varmemengden, Q (J), er dermed avhengig av temperaturendringen, ΔT , i materialet samt volumet, V (m^3), den spesifikke varmekapasiteten, c_p ($J/kg \cdot K$) og densiteten, ρ (kg/m^3), til lagringsmaterialet. Spesifikk varmekapasitet er i tillegg til materialdensitet, de egenskapene som bestemmer hvor mye varmeenergi som maksimalt kan lagres i materialet, og de er dermed avgjørende for materialets potensiale for å fungere som et termisk energilager.

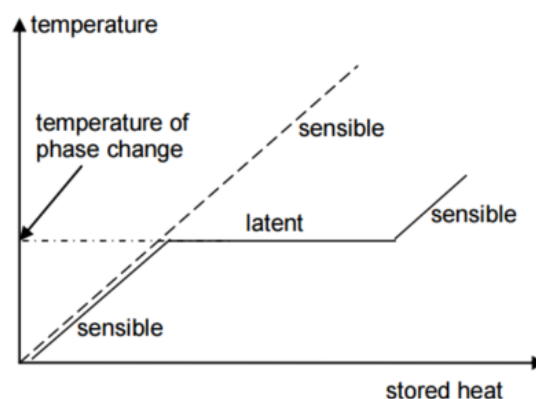
I en bygning vil utveksling av følbar varme finne sted så fort det oppstår temperaturdifferanse mellom romluften og byggematerialenes overflater. Materialene vil både ved opptak og avgivelse av varme gjennomgå en lineær temperaturendring som vist i figur 4.1, der endringshastigheten bestemmes av materialets varmeledningsevne. Varmeledningsevnen, gitt av materialets termiske konduktivitet, λ (W/mK), er også avgjørende for materialets potensiale for å fungere som energilager. For høy termisk konduktivitet vil resultere i at opptatt varmeenergi transporteres gjennom materialet og tapes til omgivelsene på den andre siden, mens for lav termisk konduktivitet vil gjøre varmeoverføringsprosessen for treg til at den er mulig å utnytte. Den sensible varmelagringsprosessen behandles mer utførlig i kapitell 4.3.1.

4.1.2 Latent varmelagring

Latent varme er den varme som tas opp eller frigis når et materiale går gjennom en faseendring. I bygninger kan latent varme utnyttes ved å ta i bruk spesielt designede PCM-materialer (Phase Change Materials) som lagringsmedium. For å få et PCM til å endre fase – f.eks. smelte fra fast form til væske – kreves tilførsel av varmeenergi. Den tilførte varmen går med til å drive faseovergangen og lagres latent i materialstrukturen. Som illustrert i Figur 4.1 skjer den latente varmelagringen ved konstant temperatur og temperaturen i materialet vil derfor ikke endres når materialet skifter fase. Ligning (4.2) viser at den lagrede varmemengde i stedet er et produkt av materialets masse (kg) og entalpiendringen, Δh (J/kg), i faseovergangen.

$$Q = m \cdot \Delta h \quad (4.2)$$

Det er utviklet spesielle faseskiftende komposittmaterialer som kan introduseres som TEL-systemer i bygninger ved å integrere dem inn i bygningskomponenter som veggplater, gulv, tak og gipsplater, slik at komponenten kan bidra til å redusere temperaturvariasjoner i bygningers inn klima [31]. Det er dog kun et fåtall av slike materialer som har blitt kommersialisert, noe som hovedsakelig skyldes at man ikke har klart å utvikle gode nok materialer. Typiske problemer er dårlig kontroll av faseovergang, korrosjon, lav termisk konduktivitet og ustabilitet i materialene [32].



Figur 4.1: Sammenheng mellom temperatur og lagret varmemengde for sensible og latente lagringsprosesser [33].

4.1.3 Termokjemisk varmelagring

Ved termokjemisk varmelagring utnyttes spesielle materialer (Thermochemical materials, TCM) som kan gjennomgå reversible kjemiske prosesser. Lagringsprosessen baserer seg på endo- og eksotermiske prosesser ved absorpsjon eller adsorpsjon [32]. Endotermiske prosesser er prosesser som krever energi, men om prosessen reverseres slik at reaksjonen går den andre veien, blir prosessen eksotermisk og frigir energi. Følgelig er resultat at den totale entalpien i systemet vil være forskjellig før og etter reaksjonen, noe som skyldes at varmeenergi har blitt utvekslet.

Det finnes spesielle materialer for termokjemisk varmelagring, men siden bindingsenergien som kreves i de fleste kjemiske reaksjoner er høy innebærer termokjemisk varmelagring ofte svært høye temperaturnivåer (400 °C) [32]. Høye temperaturer impliserer dog at det dreier seg om store energimengder og varmelagringstettheten i slike materialer er derfor stor. Bruk av slike materialer i TEL-systemer innebærer derfor et stort varmelagringspotensiale.

4.1.4 Potensiale for implementering i eksisterende bygg

Systemer for termisk energilagring (TEL-systemer) som baserer seg på sensibel varmelagring har lavere ytelse per volum og vekt sammenlignet med systemer for latent og termokjemisk lagring av varme, noe som gjør sensible teknologier mindre gunstig. Latent og termokjemisk er imidlertid hovedsakelig kun aktuelle ved lagring av varme ved en langt høyere temperatur enn det som er tilfelle ved bruk i kombinasjon med fjernvarme samt at forsinkelse ved faseovergang og ved kjemiske reaksjoner gjøre det vanskeligere å regulere varmeoverføringsprosessene i [32] i slike prosesser. I tillegg er spesialdesignede komposittmaterialer for lagring av latent varme i bygninger ofte svært kostbare samt at de må integreres i konstruksjonen, noe som krever grundig planlegging før bygging. Følgelig er det kun løsninger og teknologier som benytter seg av sensibel varmelagring som er realistisk å implementere i eksisterende bygninger. Dette medfører at det kun er slike teknologier som er interessante for denne oppgaven og ytterligere studier av TEL-systemer basert på latent og termokjemisk varmelagring er derfor utelatt.

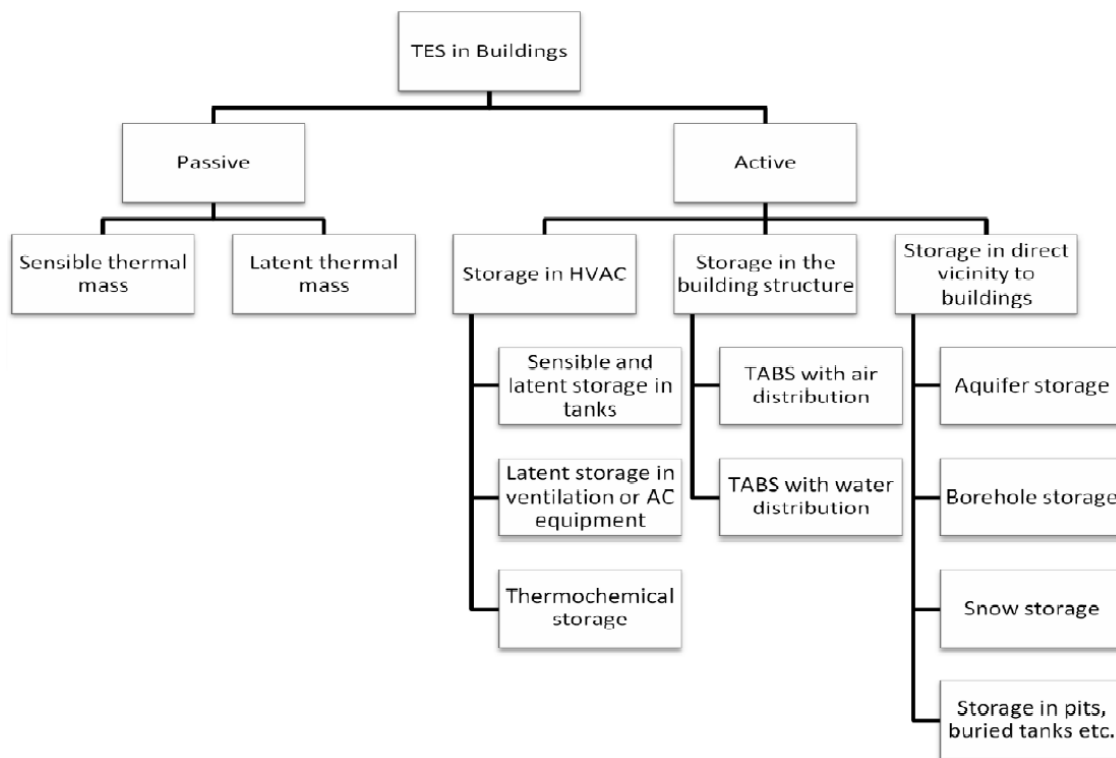
Sensibel varmelagring er definitivt den mest vanlige metoden for varmelagring.

Varmtvannstanker som brukes til lagring av varmt tappevann og oppbevaring av termisk varme i fjernvarmeanlegg og varmelagring i bakken ved hjelp av varmpumper er eksempler på typiske lagringssituasjoner der varmen lagres som sensibel varme [34]. Utover dette kan også bygningers termiske masse benyttes til varmelagring.

Termisk masse kan beskrives som den andelen av bygningskonstruksjonen og øvrige masser i bygningen som er eksponert mot innelufta og som dermed vil påvirkes av temperaturendringer i bygningen. Varmeinnholdet i den termiske massen er mulig å regulere ved hjelp av varmetilførselen til inneluften. Endring i varmetilførsel fører til at det oppstår differanse mellom innelufttemperaturen og overflatetemperaturen til den termiske massen og denne differansen er en drivende kraft som iverksetter varmeutveksling mellom de to mediene. Grunnet termisk treghet i den termiske massen vil varmeutveksling mellom de to mediene foregå relativt tregt noe som fører til at termisk masse i praksis fungerer som et termisk energilager. Dette innebærer videre at varmeoverføring til og fra den termiske massen vil være mulig å kontrollere gjennom regulering av innetemperatur. Sensibel varmelagring i bygningers termiske masse er dermed et TEL-system som er mulig å ta i bruk i eksisterende bygninger og som kan reguleres ved hjelp av eksisterende varmesystemer.

4.2 Lagringsstrategier

Formålet med å lagre termisk energi i en bygning er å opprettholde et tilfredsstillende inneklima uten å bruke mer energi enn nødvendig. Som nevnt innledningsvis gjør lagring av varme det mulig å separere tidspunktet for når varmen genereres og når den produseres, noe som kan utnyttes til å overføre varme fra perioder med overskuddsvarme til perioder med underskudd på varme. Det eksisterer mange forskjellige strategier og teknologier for TES-systemer som muliggjør dette, men ikke alle er like lett anvendbare på bygninger som allerede eksisterer. Som vist i Figur 4.2 finnes det to strategier for lagring av varme; passiv og aktiv lagring. Den fundamentale forskjellen mellom disse er at i et passivt system så skjer varmetvekslingen av seg selv, mens et aktivt system krever en form for ekstern energikilde for å få utvekslingen til å skje.



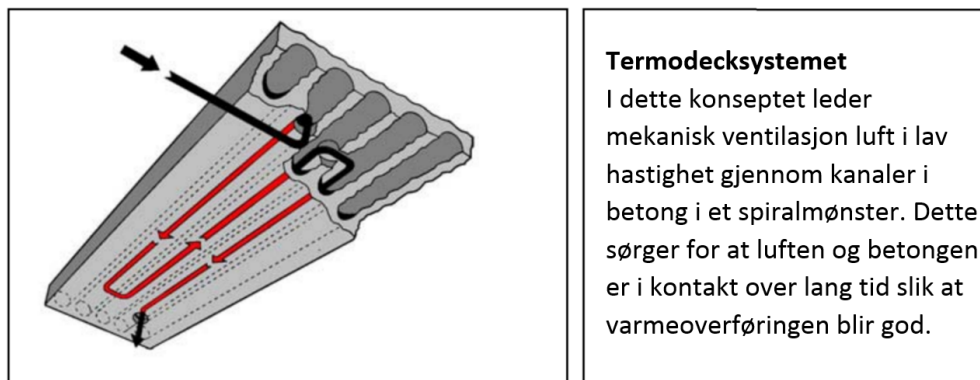
Figur 4.2: Oversikt over strategier for lagring av termisk energi i bygninger [35].

Hovedforskjellen mellom de to strategiene er at en passiv lagringsteknologi aktiveres av den naturlige temperaturvariasjonen som finner sted i en bygning, mens aktive teknologier behøver en form for ekstern energikilde for å aktivere lagringsmekanismen.

4.2.1 Aktiv lagring

Aktive lagringsstrategier kan, som vist i Figur 4.2, deles i tre undergrupper; lagring i tekniske anlegg, lagring i bygningskonstruksjonen og lagring i omgivelsene. Som nevnt i begynnelsen på dette kapittelet kjennetegnes aktive lagringsstrategier av at de krever

energi for at varmelagringsprosessen skal fungere. Dette skyldes at aktive systemer ofte benytter komponenter og teknologier som er utviklet for å drive varmeutvekslingsprosesser i bygninger. Komponenter og teknologier som dette må ofte implementeres i bygningskonstruksjonen eller som en del av de tekniske anleggene i bygninger og som følge av dette vil det som regel ikke være gjennomførbart å bruke aktive lagringssystemer i eksisterende bygninger. For å fremheve forskjellen på passive og aktive systemer viser Figur 4.3 et eksempel på hvordan en aktiv lagringsteknologi benytter energi til å drive varmeoverføring.



Figur 4.3: Termodecksystemet er et eksempel på en aktivt lagringssystem. Illustrasjon hentet fra [36].

Termodecksystemet er et aktivt TEL-system levert av det svenske selskapet TermoDeck [37] som benytter termisk lagringskapasitet i bygningskonstruksjoner. Termodeck-konseptet er et TABS-system (Thermally Active Building Structure) bestående av betongdekker som er konstruert med hule kanaler som tillater transport av luft inne i betongen. Ved å ventilere kanalene med luft som har enten høyere eller lavere temperatur enn betongen vil det overføres energi til henholdsvis oppvarming eller kjøling. Betongens varmeledningsevne hjelper til med å overføre varmeenergien mellom rommet og luften i kanalene, men på grunn av termisk treghet kan betongen også lagre varmemengder i kortere perioder. Dette systemet er dermed et indirekte TEL-system - det benytter ett medium til å transportere varmen og ett annet til å lagre den [32].

Termodeck har vist seg å være spesielt nyttig til reduksjon av kjølebehov i bygninger. I tilfeller der intensiteten på interne varmekilder (personer og utstyr) er så stor at et rom får et overskudd av varme vil den overflødig varmen kunne tas opp i betongen og transporteres ut av bygningen ved at betongkanalene ventileres med kjølig luft. Slik drift av TEL-systemet kan ifølge TermoDeck selv redusere behovet for mekanisk kjøling med opptil 50%, noe som i de fleste tilfeller er ekvivalent med at behovet for kjøling elimineres fullstendig.

4.2.2 Passiv lagring

Passiv lagring av varme omfatter alle varmelagringsprosesser som skjer på grunn av naturlige temperaturvariasjoner i en bygning, men i denne oppgaven fokuseres det kun på passiv lagring av sensibel varme i bygningskonstruksjoners termiske masse. Alle bygningsmaterialer er i stand til å lagre varme på grunn av deres varmekapasitet og all termisk masse har derfor et visst potensiale for å lagre varme. Bevisst bruk av termisk masse som et TEL-system forutsetter imidlertid at innnetemperaturen er tillatt å variere. Som vist i Figur 4.1 er passiv varmelagring i bygningskonstruksjonen avhengig av at varmelageret må gjennomgå en temperaturendring for at varme skal overføres og dette kan ikke oppnås uten at det eksponeres mot luft som har varierende temperatur.

Som beskrevet i kapittel 4.1.4 kan bevisst regulering av innelufttemperatur benyttes til å få kontroll over varmeoverføringen til og fra den termiske massen i bygninger. Innnetemperatur er mulig å regulere ved å regulere varmeleveransen til bygningen, men siden energien som benyttes ikke tilføres den termiske massen direkte regnes dette fortsatt som en passiv varmelagringsstrategi. Forskningslitteratur viser at denne typen lagringsstrategi kan kombineres med fjernvarmesystemer for å redusere både varme- og kjølebehovet til bygninger i systemet ([32], [34]). I resten av denne oppgaven er det derfor slik passiv varmelagring som er i fokus.

4.3 Lagringspotensial

Som forklart i det foregående påvirker mengden termisk masse bygningers behov for oppvarming og kjøling. For å kunne utnytte denne effekten til å minimere behovet for varmetilførsel er det viktig å kartlegge hvor stor påvirkning som kan forventes i den enkelte bygning. Dette kapitlet behandler derfor bygningers varmekapasitet og resulterende varmelagringsevne.

4.3.1 Varmekapasitet - materialvalg

Alle bygningsmaterialer har termiske egenskaper som tillater absorbering, lagring og transport av termisk energi. Når overflaten til et materiale eksponeres mot luft vil sensibel varme overføres dersom temperaturen på luften ikke er lik overflatetemperaturen på materialet. Den spesifikke varmekapasiteten, c (J/kgK), er den varmemengden som utveksles mellom 1 kg av materialet og omgivelsene når omgivelsestemperaturen endres med $\pm 1^\circ C$. Varmekapasitet er med andre ord et mål på materialers varmelagringspotensiale som gjør det mulig å gruppere og sammenligne bygninger med lignende termisk ytelse. I denne konteksten er det vanlig å betegne bygninger med høy varmekapasitet som *termisk tunge* og bygninger med lav varmekapasitet som *termisk lette* [13].

En tung bygning kan fungere som et energireservoar og absorbere overskuddsvarme fra rommene i bygningen og lagre den til det er bruk for den. For å fungere optimalt er det imidlertid ikke tilstrekkelig med et energireservoar som kun har høy varmekapasitet. Den termiske massens egenskaper i forholdet til rommet den eksponeres mot avhenger av forholdet mellom følgende faktorer[38]:

- Evnen den har til holde på varme (varmekapasitet)
- Evnen den har til å lede varme (konduktivitet)
- Hvordan dens varmekapasitet og konduktivitet harmonerer med døgnvariasjonen i bygningens varmebehov.

Tunge bygninger har typisk bygningskonstruksjoner av betong eller murverk. Tabell 4.1 viser at dette er materialer med stor spesifikk varmekapasitet og lav/moderat varmelagringsevne og det er nettopp denne kombinasjonen av egenskaper som er optimal for et sensibelt varmelager. Stor spesifikk varmekapasitet er, i kombinasjon med høy materialdensitet, en forutsetning for at materialet skal kunne ha en varmelagrende effekt som er stor nok til å innvirke på inn klima og energibruk [13].

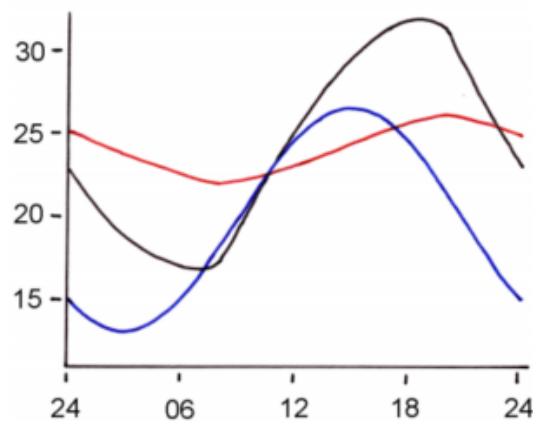
Materiale	Materialdensitet ρ (kg/m ³)	Spesifikk varmekapasitet c (J/(kg K))	Termisk konduktivitet λ (W/(m·K))	Termisk effusivitet b (J/m ² ·K·s ^{0,5})	Termisk diffusivitet a (m ² /s)
Stål	7800	450	50	13300	$15 \cdot 10^{-6}$
Granitt	2600	1000	2.8	2700	$1.1 \cdot 10^{-6}$
Betong	2300	1000	1.7	2000	$0.75 \cdot 10^{-6}$
Porebetong	500	1000	0.15	275	$0.3 \cdot 10^{-6}$
Teglstein	1600	830	0.6	900	$0.45 \cdot 10^{-6}$
Tre (gran, furu)	500	1600	0.13	325	$0.16 \cdot 10^{-6}$
Mineralull	15-150	1030	0.036	25-75	$2.3-0.23 \cdot 10^{-6}$

Tabell 4.1: Termiske egenskaper for typiske byggematerialer (Utsnitt av tabell i [13]).

Varmeledningsevnen til et materiale beskrives med størrelsen termisk konduktivitet. Varme transporteres tregere gjennom et materiale med lav konduktivitet enn et med høy konduktivitet og for å oppnå energieffektiv lagring av termisk energi er derfor optimalt å bruke materialer med relativt lav konduktivitet. Grunnen til dette er at et varmelager må kunne lagre energien en viss periode og dette er ikke mulig om lagringsmaterialet har høy varmeledningsevne for da vil varmeenergien transporteres gjennom materialet og overføres til omgivelsene (varmetap). Det er imidlertid heller ikke gunstig med for lav varmeledningsevne, da dette vil gjøre varmeoverføringsprosessene mellom luft og materiale så trege at varmelageret ikke rekker å respondere på hurtige endringer i innetemperatur. Eksemplene nedenfor illustrerer hvordan forholdet mellom varmekapasitet og konduktivitet påvirker vanlige byggematerialers evne til å fungere som varmelager:

- **Stål** – er materiale er et svært kompakt materiale med høy varmekapasitet, men i tillegg er varmeledningsevnen svært stor. Varme vil ledes hurtig gjennom materialet og lagringsevnen er derfor liten.
- **Mineralull** – er designet for å ha en isolerende effekt. Det har liten varmekapasitet og svært lav varmeledningsevne og materialet har derfor ikke noen reell varmelagringsfunksjon.
- **Tre** – er et materiale med svært høy varmekapasitet, men for lav varmeledningsevne til at materialets varmeinnhold kan utnyttes til å jevne ut kortvarige variasjoner i innnetemperatur.
- **Betong og murverk** – som nevnt tidligere er disse materialene ideelle for lagring av varme. Høy varmekapasitet, høy densitet og lav/moderat ledningsevne gjør at betong og murverk har varmelagringssegenskaper som lar dem overføre varme mellom seg selv og inneluft såpass hurtig at det har en utjevne effekt på variasjoner i innnetemperatur.

De termiske egenskapene til betong og murverk gjør at bygningskonstruksjoner med disse materialene får stor termisk masse og dermed kan klassifiseres som termiske tunge bygninger. Effekten av termiske masse på inneklimate er forskjellig i tunge og lette bygninger og denne forskjellen illustreres godt i et studie foretatt av SINTEF (referert til i [38]). Simuleringsresultater fra dette studiet, gjengitt i Figur 4.4, illustrerer at temperaturforløpet til romluften i én tung og én lett bygning er av svært forskjellig karakter.



Figur 4.4: Simuleringsresultater av temperaturforløp for utetemperatur (blå), romluftstemperatur for standard lett konstruksjon (sort) og romluftstemperatur for tung konstruksjon med eksponert termisk masse (rødt) gjort av SINTEF. Figur hentet fra [38].

Romluftstemperaturen i den lette bygningen svinger mellom $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ mens romluftstemperaturen bare svinger mellom $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ i den tunge bygningen. At temperatursvingningene er så mye lavere i den tunge bygningen viser at termisk masse har en utjevne effekt på det termiske inneklimate. Den tunge konstruksjon har større

termisk treghet enn den lette konstruksjonen, noe som resulterer i at den bruker lenger tid på å respondere på endringer i utetemperatur. Dette resulterer igjen i at både kjølebehovet og varmebehovet reduseres, noe som gjør det mindre energikrevende å opprettholde en jevn temperatur i en tung bygning enn i en lett bygning [38].

4.3.2 Bygningsdesign og konstruksjon

For å kunne utnytte en bygnings termiske masse er det nødvendig å være klar over at det ikke bare er materialenes termiske egenskaper som påvirker det termiske lagringspotensialet. For at høy varmekapasitet og varmeledningsevne skal kunne utnyttes må det den termiske massen og romluften i bygningen ha en termisk kobling som tillater et dynamisk samspill mellom de to. For å oppnå en god synergieffekt, som sikrer at den termiske massen utnyttes optimalt, er det nødvendig å ta hensyn til følgende tekniske og arkitektoniske forhold [39]:

- **Den termiske massens plassering i rommet** – Bygningsdeler som er plassert nærmere interne varmekilder eller som ofte eksponeres for sollys, vil absorbere mer varme enn en bygningsdel som ikke er det.
- **Den termiske massens plassering i konstruksjonen** – Det er kun mulig å utnytte termisk masse som ligger innenfor isolasjonssjiktet i veggen.
- **Det totale vindusarealet** – Påvirker solinnstrålingen til oppholdssonene i bygningen.
- **Dekkematerialers tykkelse og termiske egenskaper** – Dekkematerialer, som for eksempel linoleumsbelegg på gulv og isolasjon i vegger, har termisk resistans og vil derfor påvirke den termiske koblingen mellom inneluften og den termiske massen
- **Bygningens orientering** – Mengden sollys avhenger av fasadenes orientering. Sørvendte fasader er mest eksponert for sollys.
- **Intensitet på interne tilskudd** – Mengden varme som genereres inne i bygningen påvirker hvor mye varme som overføres.
- **Styringsstrategi og regulering av ventilasjonssystemet** – Behovet for kjøling i bygninger kan reduseres betydelig dersom varme som er absorbert gjennom dagen transporteres ut av bygningen ved hjelp av kald natteluft, ofte omtalt som nattkjøling.

4.4 Bygningers tidskonstant

Som beskrevet i kapittel 3.1.1 om bygningers varmebalanse må varmesystemer tilføre energi til et rom for at innetemperaturen i rommet skal holdes stabil. Ved stasjonære forhold kan varmebalansen til et rom uttrykkes med ligning (3.1) fra det nevnte kapittel, men i en

situasjon med transiente forhold, altså der temperaturer og varmestrømmer endrer seg over tid, er dette ikke tilstrekkelig. Ved slike betingelser er det i tillegg nødvendig å ta høyde for bygningsdelenes varmekapasitet og deres innvirkning på de termiske forholdene, noe som gir en dynamisk varmebalanse. Den dynamiske varmebalansen for en bygning eller et rom kan beskrives med ligning (4.3).

$$\Phi = H \cdot (T_i - T_e) + S \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (4.3)$$

Der:

Φ = totalt effekttilskudd til rommet (W)

H = den totale varmetapskoeffisienten (W/K)

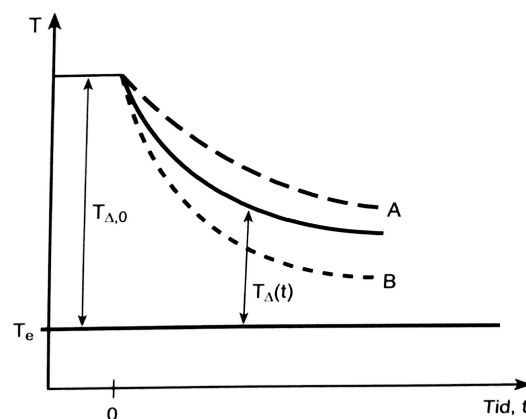
S = rommets varmelagringssevne (Ws/K)

T_i = innetemperaturen (K)

$\frac{dT_i}{dt}$ = innetemperaturens endringshastighet (K/s)

T_e = utetemperaturen (K)

Endringer i romlufttemperatur som skyldes tilskudd eller tap av varme vil også medføre en endring av temperaturen og dermed av varmeinnholdet i konstruksjoner og inventar som har overflate mot rommet [13]. Den termiske massen vil med andre ord akkumulere eller avgi varme dersom dens overflatetemperatur er forskjellig fra romlufttemperaturen, noe som skaper varmestrømmer internt i rommet og dermed er med og påvirker varmebalansen. På grunn av termisk treghet i materialer vil den termiske massen reagere mye tregere på endringer i omgivelsene enn det som er tilfelle for romluften og varmeovergang mellom termisk masse og romluft vil derfor foregå relativt tregt. Hastigheten er dog avhengig av varmekapasiteten til massen og tilstanden til de andre faktorene i varmebalansen.



Figur 4.5: Avkjølingsforløp for en bygning . Redigert figur fra [13].

Figur 4.5 viser avkjølingsforløpet for en idealisert bygning. I en slik situasjon antas det at varmetilskudd og varmetap er konstante størrelser og inneluftas overtemperatur vil gå eksponentielt mot null med tiden [13]. De stiplede linjene illustrerer hvordan forløpet ville

vært om varmekapasiteten hadde vært høyere (kurve A) og hvordan det ville vært med økt ventilasjonsmengde (kurve B). Det fremgår at avkjøling skjer raskere jo større varmetapene er og jo mindre varmekapasiteten er.

Den termiske tregheten som forårsaker den langsomme avkjølingsprosessen kan beskrives med den termiske tidskonstanten τ . Den er definert som forholdet mellom varmelagringsevnen, S , og varmetapskoeffisienten, H , som beskrevet med ligning (4.4).

$$\tau = \frac{S}{H} \quad (4.4)$$

Ved å sette uttrykket for τ inn i ligning (4.3) og løse denne som beskrevet i *Enøk i bygninger* [13] kan temperaturforløpet til inneluften beskrives som følger:

$$T_i(t) = T_0 + \frac{\Delta\Phi}{H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.5)$$

Her er T_0 innetemperaturen på det tidspunktet effekttilskuddet endres med $\Delta\Phi$ og det er forutsatt at utetemperaturen, T_e og det totale effekttilskuddet til rommet, $\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi$, er konstant i tidsrommet fra $t = 0$ til $t = t$. Med disse forutsetningene viser ligningen at innetemperaturen endrer seg eksponentielt mot en ny stasjonær balansetemperatur, $T_i(\infty)$, og temperaturforløpet over tid kan derfor uttrykkes som en funksjon av bare tidskonstanten og temperaturene ved $t = 0$ og $t = \infty$:

$$T_i(t) = T_i(\infty) - [T_i(\infty) - T_0] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.6)$$

der den stasjonære balansetemperatur er konstant lik:

$$T_i(\infty) = T_e + \frac{\Phi_0 + \Delta\Phi}{H} \quad (4.7)$$

På den måten er tidskonstanten en viktig størrelse fordi den kan brukes i modeller til å beregne hvordan innetemperaturen i en bygning vil påvirkes dersom det er diskontinuitet i byggets oppvarmingssystem eller dersom andre faktorer forårsaker endringer i oppvarmingsbildet. Rent praktisk kan tidskonstanten forklares som den tiden det tar for en bygning eller et rom å oppnå 63,2% av den endelige temperaturendringen. Denne prosentverdien fremgår ved å sette inn $t = \tau$ i ligning (4.5), noe som gir:

$$T_\tau = T_0 + 0,632 \cdot \frac{\Delta\Phi}{H} \quad (4.8)$$

Tidskonstanten oppgis i timer eller døgn og størrelsen vil avhenge av hvor ”tung” bygningen er. Termisk tunge bygninger har stor varmekapasitet og stor varmetreghet og vil derfor har høye tidskonstanter. Typiske verdier er 15-20 timer bygninger med ”lette” konstruksjoner og 50-200 timer for ”tunge” bygg [13].

5. Termisk energilagring (TEL) i fjernvarmesystemer

Tradisjonelt sett er varmeproduksjonen i et fjernvarmeanlegg direkte drevet av kundenes behov. Dersom kundene ønsker mer varme må leverandøren derfor umiddelbart øke varmeproduksjonen for å unngå temperaturfall i nettet. Ved å benytte systemer for termisk energilagring (TEL) kan denne dynamikken gjøres mer fleksibel. TEL-systemer er metoder for kortsiktig lagring av varme som gjør det mulig å magasinere varmeenergi og frigi den når det er behov for den [34]. Dette kapitlet forklarer hvordan fjernvarme og termisk masse i bygninger kan benyttes som et TEL-system og hvordan dette systemet kan driftes for å bidra til å redusere bygningenes og fjernvarmesystemets bruk av energi.

5.1 Termisk masse som TEL-system

Formålet med termisk energilagring i fjernvarmesystemer er å separere tidspunktet for når varmeenergi produseres og når den tas i bruk i de tilknyttede bygningene [34]. I bygninger overføres varme mellom den termiske massen og romluften så fort det oppstår temperaturdifferanse mellom de to. Naturlige temperaturvariasjoner i romluften vil derfor resultere i at den termiske massen absorberer, lagrer og frigir varmeenergi for å oppnå samme temperatur som romluften den er i kontakt med. Selv om dette er en naturlig prosess som finner sted uavhengig av menneskelig inngripen, er den også mulig å kontrollere ved bevisst regulering av innetemperaturen. En økning i temperatur vil medføre at den termiske massen absorberer mer varme, mens et fall i temperatur fører til at den termiske massen gradvis vil avgi varme. Når varmeinnholdet i den termiske massen kontrolleres på denne måten kan prosessen betraktes som et TEL-system der den termiske massen er lagringsmediet. I et TEL-system er det vanlig å betrakte utvekslingen av varme som en lagringsprosess med tre steg; lading, lagring og utlading [32]. Denne lagringsprosessen er illustrert i Figur 5.1.



Figur 5.1: Prinsipiell skisse av lagringsprosessen i et TEL-system [32].

Varmelagringsprosessen er en dynamisk prosess og den termiske massen vil absorbere varme i en periode og avgi den i en annen. Som et resultat av dette vil netto tilskudd til bygningens varmebalanse jevnes ut med tiden og lagringsprosessen i seg selv har derfor liten innvirkning på bygningens energibruk over tid. På kort sikt kan derimot varmelagring ha en svært fremtredende effekt. Om det på et tidspunkt er overskuddsvarme i et rom vil denne absorberes av den termiske massen slik at behovet for kjøling reduseres. På grunn av termisk treghet vil denne absorberte varmen lagres for så å bli frigitt på et tidspunkt når rommet har et underskudd av varme. Siden deler av rommets varmebehov da dekkes av varme avgitt fra den termiske massen reduseres behovet for levert varmeeffekt fra bygningens varmesystem. På denne måten bidrar et TEL-system til å redusere momentane behov for både varme- og kjøleeffekt [40].

Til forveksling kan dette minne om varmeakkumulering i distribusjonsnettet, men når termisk masse benyttes som lagringsmedium for varmeenergi oppnås en helt annen lagringsfunksjonalitet enn det man gjør i fjernvarmenettet. Ved varmeakkumulering i nettet er lagringseffekten begrenset til den tiden det tar for den økte temperaturfronten å nå ut til kunden (1-2 timer i store distribusjonsnettverk [41]). Så fort temperaturfronten ankommer undersentralen vil massestrømmen gjennom varmevekslerne justeres slik at den overførte varmemengden forblir uendret og den akkumulerte lagringseffekten vil da forsvinne [41]. I termisk masse kan den effektive lagringsperioden være så lang som et par døgn, men dette er sterkt avhengig av hvilke materialer som er benyttet og hvordan konstruksjonen er designet. Typiske avkjølingsforløp for termisk tunge bygninger (se kapittel 6.1.3) bekrefter at termisk masse er treg og at det kan ta lang tid før varmeinnholdet i den blir betydelig redusert.

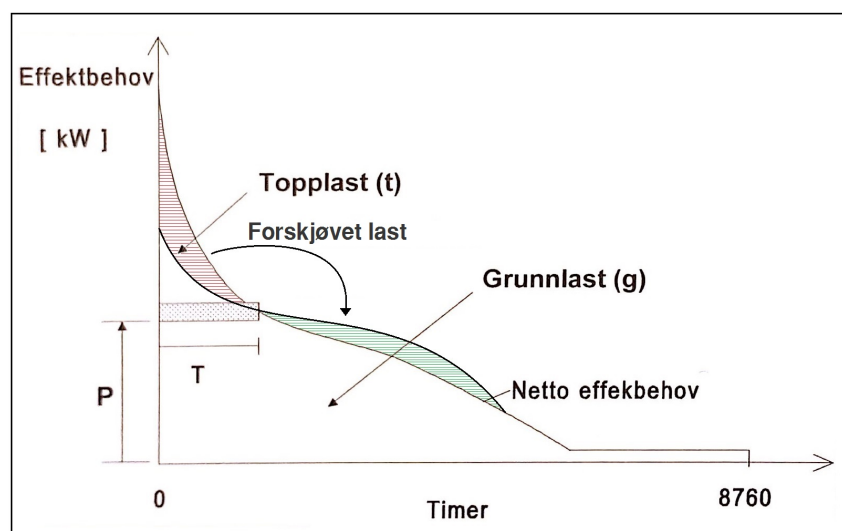
5.2 Lastforskyvning

Lastforskyvning er en driftsstrategi for fjernvarmesystemer som utnytter lagringskapasitet i termisk masse til å magasinere varme i forkant av forventede effekttopper i varmebehovet. Formålet med denne strategien er å benytte magasinert varme til å dekke deler av varmebehovet i perioder med stort effektbehov slik at varmesystemet kan avlastes i denne perioden [40]. For å oppnå en slik tilsiktet magasinering må det i perioden før effekttoppen tilføres mer varme til romluften enn det som er nødvendig for å opprettholde den ønskede innnetemperaturen. Overskuddsvarmen vil føre til at temperaturen (og dermed også mengden sensibel varme) øker både i luften og i den termiske massen luften er i kontakt med.

Om temperaturøkningen finner sted mens det er mennesker til stede er det ønskelig å modere økningen slik at den ikke blir følbart for menneskene og bringer inneklimate utenfor komfortsonen. Figur 2.4 viser at temperatursvingninger i området $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ omkring den optimale operative temperaturen er moderate nok til at det ikke påvirker følelsen av

termisk komfort. Dette er svært lave temperaturforskjeller, men tabellen med oversikt over byggematerialers varmekapasitet i kapittel 4.3.1 viser at selv små temperaturendringer gir store endringer i varmeinnhold.

Når den termiske massen er ladet til det ønskede nivået reduseres varmetilførselen til et nivå som ikke er tilstrekkelig til å kompensere for varmetapene gjennom bygningskroppen. Dette ville normalt ført til hurtige fall i innetemperatur, men på grunn av termisk treghet i den termiske massen vil den akkumulerte varmemengden i massen avgis til rommet med en effekt som forhåpentligvis er stor nok til å kompensere for den manglende effekten fra varmesystemet. Dermed vil romluften opprettholde en akseptabel temperatur frem til den termiske massen er utladet (til den oppnår samme temperatur som luften). Tiden det tar før temperaturen kommer utenfor komfortsonen avhenger av andelen termisk masse - det tar lengre tid i bygninger med høy tidskonstant enn i bygninger med lav tidskonstant [8]. Flere studier (se kapittel 5.3) har vist at det er mulig å forskyve varmebehovet til bygninger og oppnå denne effekten uten at det i betydelig grad går ut over inneklimateet.



Figur 5.2: Prinsipiell fremstilling av lastforskyvning i et varighetsdiagram. Den rød-skraverte andelen av spisslasten kuttes bort og erstattes med en tilsvarende andel grunnlast (grønn-skravert område). Figuren er hentet fra [13], men er redigert for å illustrere lastforskyvningseffekten.

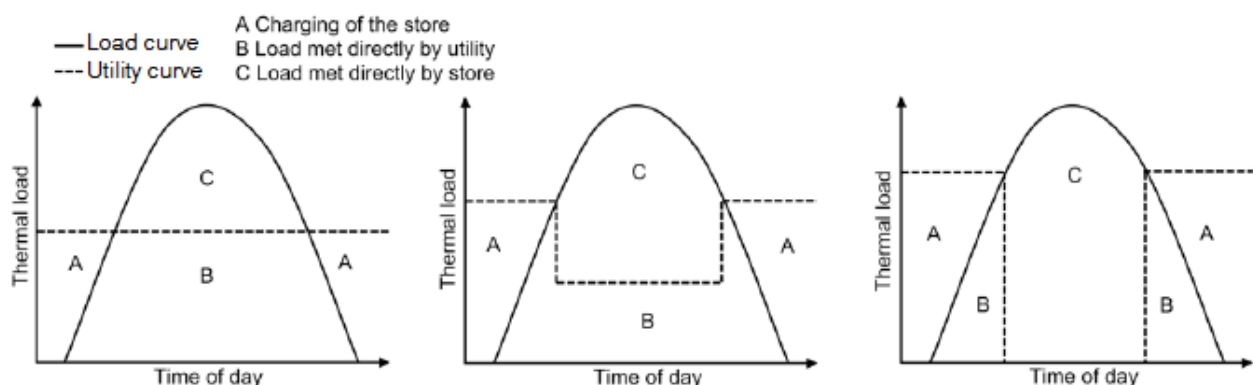
Med lastforskyvning flyttes deler av effektbehovet fra perioder med stort varmebehov til perioder med lavt varmebehov [8]. Dette gjør det mulig å redusere uttaket av varmeeffekt fra fjernvarmenettet i perioder med effekttopper (morgen og kveld) slik at bruken av spisslastkilder kan kuttes ned. For varmeproduksjonen innebærer dette at den bortkuttede bruken av spisslastkilder kan erstattes med økt bruk av grunnlastkilder. Figur 5.2 viser en prinsipiell fremstilling av denne effekten i et effektvarighetsdiagram. Diagrammet illustrerer at det maksimale effektbehovet reduseres og at en større andel av effektbehovet flyttes til grunnlastområdet. Arealene til de skraverte områdene viser likevel at den totale

energibruken er tilnærmet uforandret. Dette skyldes at selve varmebehovet ikke er forandret, det er kun tidspunktet varmen leveres på som er forskjøvet. I virkeligheten vil imidlertid noe varme gå tapt til omgivelsene i løpet av den tiden varmen lagres i den termiske massen, men dette tapet forblir relativt lite om ikke lagringsperioden er for lang [34].

Siden lastforskyvning tillater at en økt andel av varmeproduksjonen i fjernvarmesystemet kan foregå i grunnlastområdet er det mulig å øke bruken av energiøkonomiske og miljøvennlige energikilder samtidig som bruken av fossile brenslere og andre primærenergikilder som benyttes til spisslast kan reduseres [22]. I tillegg til dette vil en reduksjon av maksimalt effektbehov gi flere andre driftsfordeler. Varighetsdiagrammet viser blant annet at lastforskyvning bidrar til å jevne ut variasjonen i fjernvarmesystemets systemlast, noe som betyr at kjelene i varmesentralen kan driftes mer stabilt. Stabil drift gir god systemvirkningsgrad for varmeproduksjonen og bidrar til å minimere tapene i denne delen av systemet [24]. Lavere effektbehov tillater også at varmen kan distribueres i nettet med lavere temperatur, noe som også bidrar til å minimere varmetapene i distribusjonen [25].

5.2.1 Forskyvningsstrategier

Siden en andel av spisslastbehovet skyves ned i grunnlastområdet kalles lastforskyvning ofte *peak shaving* fordi effekttoppene mer eller mindre "barberes" bort. Det finnes tre forskjellige strategier for å oppnå denne barberingseffekten; "load levelling", "demand limiting" og "full storage" ([40], [42]). Disse er illustrert i Figur 5.3. Det som skiller de tre strategiene fra hverandre er den termiske massens rolle i oppvarmingsbildet. Som figuren illustrerer leverer varmesystemet ulik effekt i hver av strategiene, noe som påvirker utnyttelsesgraden av lagringspotensialet til den termiske massen.



Figur 5.3: Illustrasjon av tre forskjellige strategier for lastforskyvning [40].
 Fra venstre: "Load levelling", "Demand limiting" og "Full storage".

Ved utjevning av last, eller "load levelling", leveres varme ved konstant effekt, noe som gir høy virkningsgrad for driften av fjernvarmesystemet, men som fører til at varmesystemet

kun er i stand til å dekke deler av varmebehovet (felt B i figurene) i perioder med stort effektbehov. I perioder med lavt effektbehov vil det imidlertid leveres et overskudd av varme slik at den termiske massen lades med varmeenergi (felt A). Når effekttoppen inntreffer så benyttes den lagrede varmemengden til å dekke den delen av effektbehovet varmesystemet ikke har kapasitet til å dekke selv (felt C). Sammenlignet med de andre strategiene utnytter denne strategien mindre av det termiske lagringspotensialet og reduksjonen av effekttoppen blir derfor tilsvarende liten. Varmeproduksjonen kan imidlertid foregå ved et konstant effektnivå, noe som gir best mulig virkningsgrad [40].

De to resterende strategiene i figuren er strategier som bortprioriterer virkningsgrad i varmeproduksjonen til fordel for økt utnyttelsesgrad av lagringspotensialet i den termiske massen. Som det fremgår av figuren forutsetter "full storage"-strategien at TEL-systemet har tilgang til både høy installert varmeeffekt og stor lagringskapasitet i bygningen. I perioden med effekttopper kuttet varmetilførselen fullstendig slik at den termiske massen må dekke hele varmebehovet. Om en slik strategi benyttes på mange bygninger i et fjernvarmesystem vil derfor effekttoppen i systemlasten reduseres betydelig. En slik strategi er imidlertid kun gjennomførbar i systemer der varigheten på effekttoppene er svært kort [42].

Det er klart at valget av lastforskyvningsstrategi avhenger av hvor stor effekt som er tilgjengelig i fjernvarmesystemet og varmelagringsevnen til den termiske massen i bygningene som skal benyttes i TEL-strategien. Det vil for eksempel ikke være gjennomførbart å benytte "full storage"-strategien i en lett bygning eller i tunge bygninger der den termiske massen er tildekket eller av andre grunner ikke er godt nok eksponert mot romluften, uten at det oppstår uakseptable temperaturfall [40]. Siden ingen bygninger er like og driftsbetingelsene for bygningers varmesystemer varierer, er det problematisk å på generell basis si noe om hvilke bygninger som er kapable til å opprettholde et tilfredsstillende inneklima dersom varmetilførselen deres reguleres for å oppnå lastforskyvning. Av den grunn må en bygnings evne til å tolerere lastforskyvning vurderes individuelt for hver enkelt bygning.

5.2.2 Prediktiv lastforskyvning i smarte varmenett

I kapittel 3.1.2 ble det identifisert to viktige karakteristiske trekk ved systemlasten i et fjernvarmesystem; at kundenes effektbehov følger tydelige døgnsykluser og at det er to effekttopper hver dag, en om morgenen og en om kvelden. Dette medfører at det med en viss nøyaktighet er mulig å forutsi tidspunktet for når effekttopper i systemlasten kommer til å oppstå. Størrelsen på de forventede effekttoppene kan videre anslås på grunnlag av forventet utetemperatur, ettersom denne i stor grad er bestemmende for effektbehovet i nettet [43]. Tilgang til slik informasjon om tidspunkt for og størrelse på effekttopper i systemlasten må anses som en forutsetning for vellykket bruk av lastforskyvningsstrategier

siden den gjør det mulig å legge lade- og utladingsperiodene slik at lagringsystemet kan utnyttes optimalt.

Årsaken til at systemlasten i et fjernvarmenett følger en repetitiv døgnsyklus er at mange bygninger har et bruksmønster som repeteres på daglig basis. I kontor- og administrasjonsbygninger og i offentlige formålsbygg slik som skoler og barnehager er det mer eller mindre like stor aktivitet hver dag i arbeidsuken og liten eller ingen aktivitet i helger. For husholdninger er situasjonen motsatt - der er ofte aktiviteten konsentrert til ettermiddager, kvelder og helger. Siden varmebehovet til et bygg avhenger av om det er i bruk eller ikke fører disse forutsigbare bruksmønstrene til at det er relativt stor forutsigbarhet i varmebehovsprofilene til disse bygningene, noe som innebærer at det er mulig å anslå størrelsen på effektbehovet deres før det inntreffer [14].

Til tross for at det kan være enkelt å anslå en bygnings fremtidige varmebehov er det nødvendig å benytte avanserte matematiske algoritmer for å sikre at det foretas en prediksjonen som er nøyaktig nok til at det er mulig å stole på den. Blant nyere vitenskapelige utgivelser finnes det mange eksempler på studier som har både forsøkt og lyktes med å utvikle slike algoritmer; [44], [45] og [46] er bare noen eksempler på slike. Felles for mange av disse nyutviklede algoritmene er at de beregner fremtidige varmebehov ved å sammenligne sanntids behov med en database av historiske behov for å finne likheter som kan brukes til å predikere hvordan varmebehovsprofilen vil se ut i timene fremover. Det er altså ofte store historiske datamengder som utgjør grunnlaget når matematiske algoritmer predikerer fremtidig last.

Det fremgår at et system som benytter en matematisk algoritme til å beregne når effekttopper kommer til å inntreffe i systemlasten til et fjernvarmenett, vil være i stand til å planlegge lastforskyvning i nettet slik at disse toppene reduseres eller unngås fullstendig. Et slikt system kan dermed betraktes som et ”smart” system siden det tilsynelatende har en form for intelligens som gjør det i stand til å tolke og analysere et gitt oppvarmingsbilde og benytte denne informasjonen til å optimalisere driftsforholdene fremover i tid. Ved å regulere varmedistribusjonen i et fjernvarmenett med et slikt system får man følgelig et smart varmenett (Smart Heat Grid) og nettopp slike nett er ansett som løsningen for å bevare konkurranseevnen til fjernvarme i fremtiden [14].

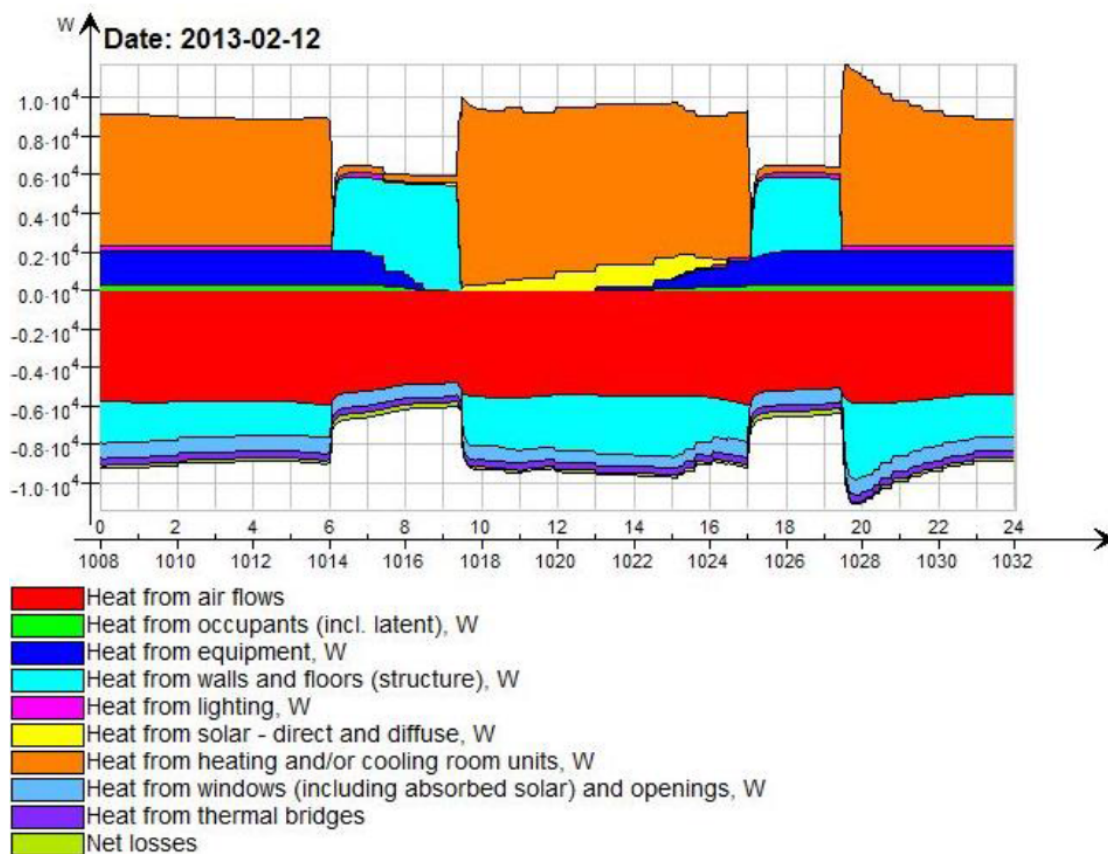
5.3 Tidligere studier av lastforskyvning

I arbeidet med denne oppgaven har det blitt sett på en rekke tidligere studier som har undersøkt hvordan forskyvning av varmebehovet til en bygning innvirker på innklimakvaliteten. Med den hensikt å få inspirasjon til hvordan lastforskyvning kan simuleres og for å vise hvordan tidligere studier av lastforskyvning har blitt gjennomført, er resultatene fra to tidligere studier inkludert i det følgende.

5.3.1 Varmelagring i termisk masse for å redusere effekttopper

I en oppgave utført ved Högskolan i Gävle i 2013 [47] ble IDA ICE benyttet til å utforske hvorvidt lastforskyvning kunne bidra til å redusere effekttopper i fjernvarmenettet. Den anvendte metoden gikk ut på å kutte effektuttaket fra fjernvarmenettet i perioder med effekttopper, slik at størrelsen på effekttoppene ble tilsvarende redusert. Studiet viser at slik styring påvirker innetemperatur, men også at den termiske tregheten til bygninger bidrar til at påvirkningen ikke blir stor nok til å bringe inneklimate utenfor komfortområdet.

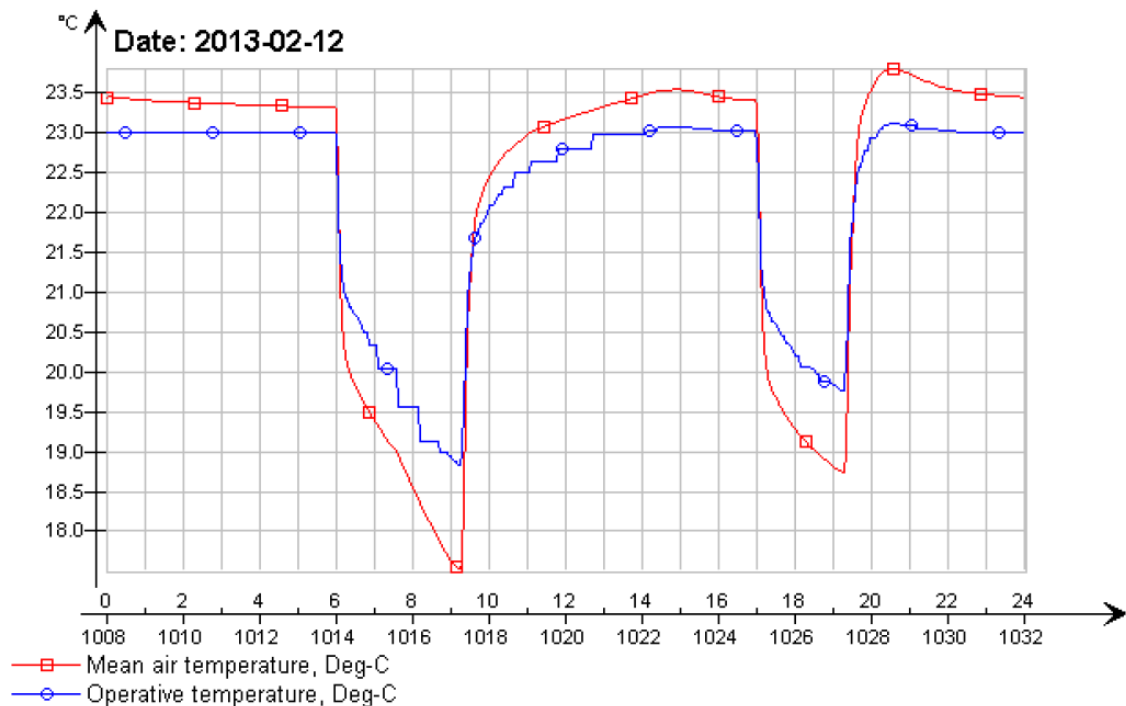
Effekttoppene det fokuseres på i det nevnte studiet er ”morgentoppene” og ”kveldstoppene” som skyldes kollektiv sosial atferd. Disse er i oppgaven definert til å opptre i henholdsvis periodene 06.00-09.00 og 17.00-19.00, noe som betyr at lastforskyvningen resulterte i at varmesystemet var inaktivt 5 timer daglig. I de resterende 19 timene av døgnet fikk den simulerte bygningen tilført den varme som krevdes for å opprettholde innetemperaturen på settpunktverdien $23,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Figur 5.4 viser den resulterende dynamiske varmebalansen i den simulerte bygningen for en normal vinterdag.



Figur 5.4: Simuleringsresultat fra [47] som viser varmebalanse ved laststyring.

Det er tydelig at den termiske massens bidrag til varmebalansen (lyseblått område) veksler mellom å være negativt når varmesystemet er i drift og positivt når varmesystemet er slått av. Dette er mulig fordi varme tas opp av bygningskonstruksjonen så lenge temperaturen

på inneluften er høyere enn den termiske massens overflatetemperatur, men avgis tilbake til rommet så fort det motsatte inntreffer. Idet varmetilførselen slås av, faller innetemperaturen umiddelbart, men den termiske massens varmebidrag resulterer i at temperaturfallet ikke blir så stort som det ville ha blitt om ikke den termiske massen hadde vært ladet med varmeenergi i forkant. Det er for øvrig tydelig at den termiske massen leverer en varmeeffekt som er lavere enn den som normalt leveres av varmesystemet og det er dette som er årsaken til at innetemperaturen faller.



Figur 5.5: Simuleringsresultat fra [47] som viser det resulterende temperaturforløpet.

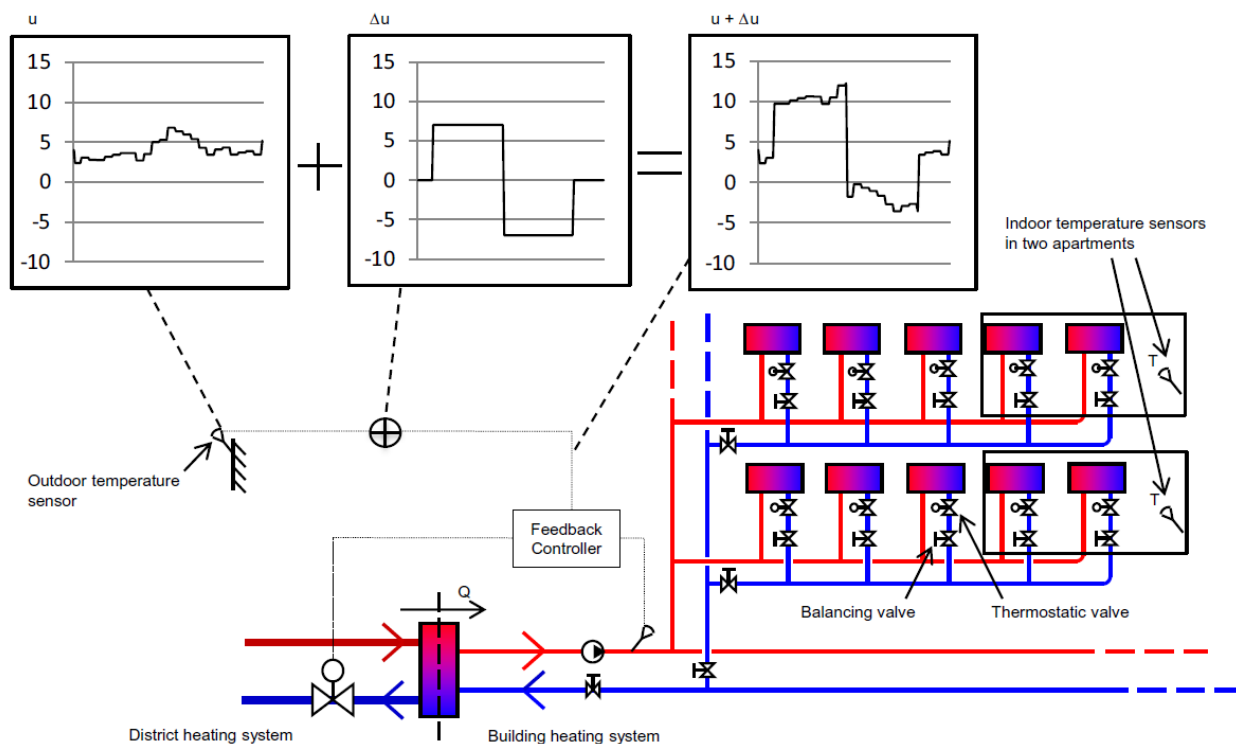
Simuleringsresultatene gjengitt i Figur 5.5 viser at den operative temperaturen i bygningen begynte å falle så fort varmetilførselen ble kuttet og fortsatte å falle helt til den nådde bunnpunktet $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ rett før varmetilførselen ble koblet inn igjen. Dette utgjør en differanse fra settpunkttemperaturen på $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, men studiet betrakter denne differansen som akseptabel fordi varigheten av den lave temperaturen er såpass kort. I tillegg støtter studiet seg på simuleringsresultater som viser at det forventede antall misfornøyde (PPD) i bygningen ikke på noe tidspunkt var større enn 10% og at det resulterende inneklimaet derfor kunne anses som tilfredsstillende.

5.3.2 Syklisk lagring for redusert døgnvariasjon

Et studie [23] av spesiell interesse for denne oppgaven er en pilottest gjennomført i perioden 2010-2011 hvor fem bygningers evne til å fungere som varmelager for et fjernvarmesystem ble testet ut i Göteborg i Sverige. Målet med testingen var å undersøke hvorvidt bygningenes termiske treghet kunne benyttes til å redusere døgnvariasjon i

oppvarmingsbehov og dermed bidra til at varmeproduksjonen i fjernvarmesystemet kunne skje mer effektivt.

Den anvendte metoden omfattet implementering av et reguleringsystem som regulerte varmetilførselen slik at det periodevis ble levert for mye eller for lite varme til bygningene. Som vist i Figur 5.6 ble dette gjennomført ved å justere målingen av utetemperatur før den ble registrert av regulatoren som styrer turtemperaturen i bygningenes respektive varmesystemer. Justeringscyklusene som ble benyttet sørget for at utetemperaturen periodevis ble justert opp eller ned og turtemperaturen i systemene ble følgelig henholdsvis lavere eller høyere enn det som var nødvendig for å dekke varmebehovet i bygningene. Denne reguleringen resulterte i at den termiske massen i bygningene vekslet mellom å absorbere varme i periodene med varmeoverskudd og frigi varme i periodene med varmeunderskudd, og viser dermed at regulering av varmetilførsel gjør det mulig å kontrollere varmestrømmene innad i en bygning. Termisk treghet kan med andre ord benyttes til å separere tidspunktet for når varmeeffekt tas ut fra fjernvarmenettet og når den faktisk benyttes til å dekke varmebehovet i en bygning.



Figur 5.6: Systemskisse for reguleringsystemet benyttet i et svensk studie [23].

I løpet av testperioden ble det prøvd ut flere forskjellige sykluser for justering av utetemperatursignalet. Reguleringscyklusen inkludert i Figur 5.6 er den syklusen som ble grundigst testet (totalt 18 uker med testing) og er derfor den eneste som beskrives i denne oppgaven. Nevnte syklus bestod av en 9 timers periode hvor utetemperaturen ble justert opp $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, en 9-timers periode hvor utetemperaturen ble justert ned $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ og en 3-timers

periode hvor utetemperaturen ikke ble justert. Den totale lengden på syklusen var dermed 21 timer og tidspunktet for når de forskjellige periodene inntraff ble derfor endret fra dag til dag. Formålet med dette var at det ble mulig å separere endringene i innetemperatur som skyldes vanlige variasjoner og endringer som skyldtes endringene i varmetilførselen.

Studiets testresultater visste at syklusen kun én gang i løpet av testperioden hadde forårsaket variasjoner i innetemperaturen større enn $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Til sammenligning ble det beregnet at den normale variasjonen i løpet av en dag i gjennomsnitt er på $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$. Det ble derfor konkludert med at det er svært usannsynlig at reguleringssykluser med tilsvarende (eller kortere) perioder vil resultere i temperaturvariasjoner større enn $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$. Dette ble også ansett som en gyldig konklusjon selv i de tilfeller der normale og påførte temperaturvariasjoner skulle komme til å inntreffe samtidig. Temperaturvariasjoner mindre enn $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ vil ikke påvirke menneskers termiske komfort nevneverdig og testresultatene viser derfor at det syklisk regulering av varmetilførselen er mulig å gjennomføre uten at kvaliteten på inneklimaet blir vesentlig redusert.

5.4 Fordeler som kan oppnås med TEL

Termisk energilagring betraktes som en avansert energiteknologi som gir tilgang til en rekke fordeler knyttet til energibruk og inneklima [34]. Som forklart i det foregående kan lastforskyvning bidra til å redusere behovet for kostbar og lite miljøvennlig spisslast, men det er også en rekke andre fordeler som oppnås ved bruk av TEL. I punktene under gis en oppsummering av de viktigste fordelene et fjernvarmesystem kan oppnå ved integrering av systemer for energilagring i termisk masse.

- **Økt bruk av rimelige, miljøvennlige energikilder** - Reduserte behov for spisslasteffekt resulterer i at bruken av el-kjeler og forbrenningskjeler fyrt med fossile brenslere kan reduseres og erstattes med økt bruk av fornybare teknologier som varmepumper eller grunnlastkjeler som utvinner varme fra biomasse eller avfall ([5], [38]).
- **Økt effektkapasitet** - I perioder med lave effektbehov er det kun nødvendig å utnytte deler av kapasiteten i varmeanlegget og det er derfor mulig å benytte den uutnyttede kapasiteten til å generere et overskudd av varme. Overskuddsvarmen kan leveres til bygningene i systemet og dermed lade deres termiske masse med varmeenergi slik at denne kan tas ut på et tidspunkt med stort varmeeffektbehov der varmeproduksjonen opererer på marginen. Ved bevisst regulering på denne måten får systemet en økt effektkapasitet (varme både fra termisk masse og fra varmesystemet) uten at noen av de varmegenerende enhetene oppgraderes eller erstattes [42].
- **Høyere kjelvirkningsgrader** - Grunnlastkjeler som brenner faste brenslere som biomasse og avfall er trege og de responder derfor dårlig på hyppige lastendringer.

Med termisk lagring kan systemlasten i fjernvarmesystemet holdes mer konstant slik at høye kjelvirkningsgrader kan opprettholdes [41].

- **Lavere varmetap** - Lavere effektbehov hos kundene innebærer at tur-temperaturen i fjernvarmenettet kan senkes. Temperaturdifferansen mot grunnen blir derfor mindre noe som medfører at også varmetapene blir tilsvarende redusert [25].
- **Reduserte kjølebehov om sommeren** - Moderne forskriftskrav forutsetter at det gjøres tiltak for å unngå mekanisk kjøling og en av hovedfordelene med termisk masse er at den kan bidra til å redusere behovet for aktiv klimatisering. På varme sommerdager vil termisk masse ta til seg overskuddsvarme slik at det ikke blir nødvendig å øke ventilasjonsmengdene eller å kjøle ned tilluften for å holde romtemperaturen på et akseptabelt lavt nivå. Ved å ventilere rommene med kald uteluft om natten (nattkjøling) transporteres den absorberte varmen ut av bygningen slik at den termiske massen lades ut og blir i stand til å absorbere mer varme neste dag. Slik passiv klimatisering krever betydelig mindre energi enn mekanisk kjøling i løpet av dagen og nattkjøling av termisk masse bidrar derfor til å redusere både effektbehovet og energibruken knyttet til kjøling [38].
- **Bedre utnyttelse av varmetilskudd fra solinnstråling** - Varmetilskuddet fra solinnstråling er som oftest størst i de periodene når det er minst behov for ekstra tilskudd av varme. Bevisst utnyttelse av lagringskapasiteten i termisk masse gjør det mulig å lagre varmetilskuddet fra solinnstråling til et tidspunkt hvor det er større behov for det [34].
- **Lavere vedlikeholdskostnader** - Jevnere og mer stabil varmeproduksjon fører til mindre slitasje på utstyret og det vil derfor bli lavere kostnader knyttet til vedlikehold [42].

6. Simulering av Storhamar skole

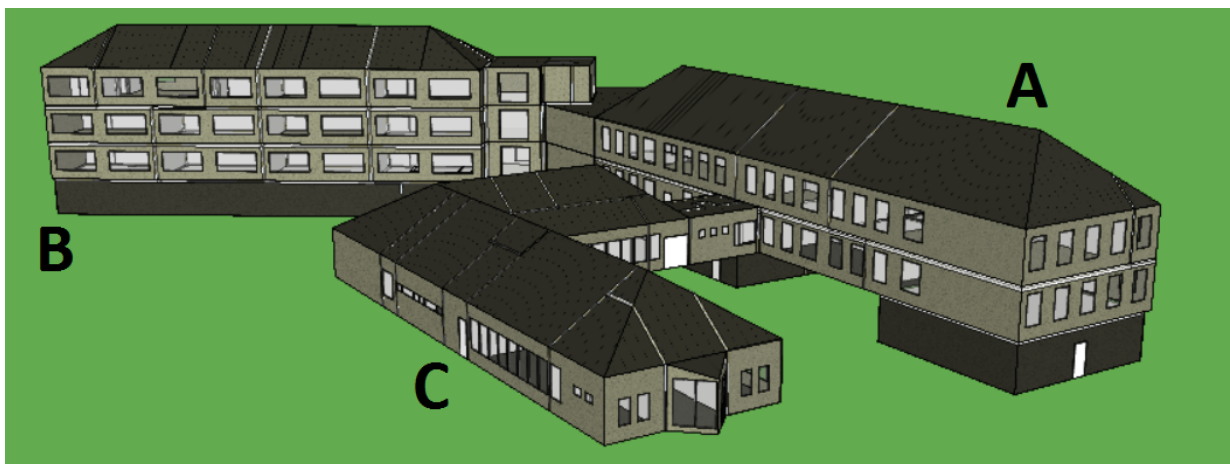
Andre del av denne oppgaven omfatter modellering og simulering av Storhamar skole ved hjelp av simuleringverktøyet IDA ICE. Formålet med dette arbeidet er å studere hvordan samspillet mellom fjernvarmesystemet og den termiske kapasiteten til Storhamar skole og andre tilknyttede bygninger kan utnyttes for å redusere den totale energibruken til dette systemet. Dette kapitlet gir en beskrivelse av bygningen, gjennomgår hvordan den ble modellert i IDA ICE og presenterer simuleringene som er foretatt for å avdekke om det er potensiale for å redusere energibruk samtidig som kvaliteten på inn klimaet opprettholdes.

6.1 Bygningen

Storhamar skole er en barneskole lokalisert i et tettbebygd område i Hamar. Selve skolebygningen er som vist i Figur 6.1 satt sammen av tre forskjellige bygg:

- Bygg A - den originale bygningen oppført i 1914, mellomtung trekonstruksjon.
- Bygg B - tilbygg oppført i 1954, tung betongkonstruksjon.
- Bygg C (Lillebjørn) – tilbygg oppført i 1997, lettere mellomtung konstruksjon.

I tillegg til hovedbygningen disponerer skolen også ytterligere to bygninger, men disse er separate bygg med egne oppvarmingsløsninger og er dermed ikke av interesse for denne oppgaven.



Figur 6.1: 3D-modell av Storhamar skole (skjermdump fra IDA ICE).

6.1.1 Varmesystemet

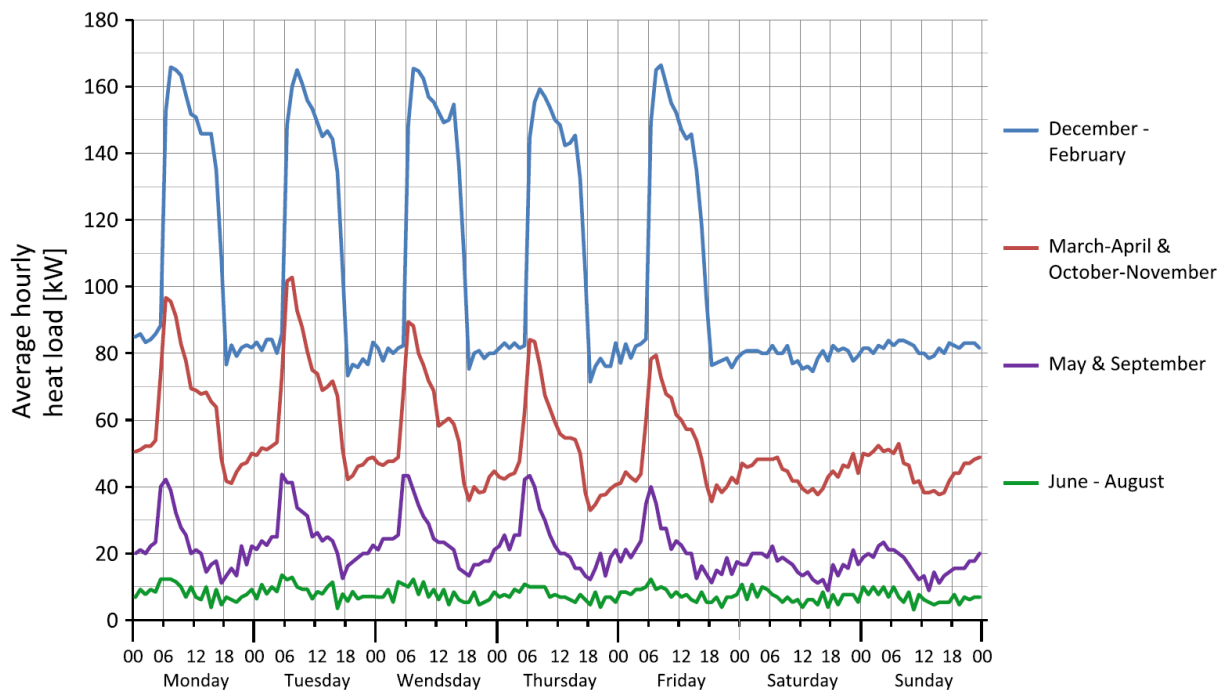
Storhamar skole er koblet til det lokale fjernvarmenettet og fjernvarme dekker hele bygningens energibehov for romoppvarming, ventilasjonsvarme og oppvarming av tappevann. Undersentralen som kobler fjernvarmenettet til skolens eget vannbårne

varmesystem er lokalisert i kjelleren i B-fløyen. Her er det plassert en reguleringsventil som regulerer varmeoverføringen og den resulterende turtemperaturen i det vannbårne varmesystemet ved hjelp av Effektiv Energi sitt styringssystem EE+ "Hands On". Dette styringssystemet benytter en adaptiv reguleringsalgoritme som bestemmer det nødvendige behovet for varme basert både på utetemperaturkompensering og målinger av faktisk innetemperatur. På denne måten opprettholdes det ønskede termiske inneklimaet i bygningen uten at det leveres unødvendig mye varme.

Det vannbårne anlegget som transporterer og overfører varme til skolen er satt sammen av tre separate kretser som forsyner hver sin bygningsdel. Massestrømmen i disse kretsene reguleres ved hjelp av uavhengige shuntventiler og det er derfor mulig å regulere varmemengden for hver bygningsdel separat, noe som innebærer at varmetilførselen kan tilpasses den enkelte bygningsdel.

6.1.2 Antakelser om varmebehov

I denne oppgaven er det ikke samlet inn data for det faktiske varme- og effektbehovet til Storhamar skole. Årsaken til dette er at det ikke er de faktiske behovene, målt i Wh og W , men heller behovsprofilene - trendene i varmebehovet - som er interessant å studere.



Figur 6.2: Eksempel på gjennomsnittlig ukentlig varmebehov i offentlige administrasjonsbygninger (herunder skolebygg) som benytter en tidsinnstilt kontrollstrategi ("time clock operation control"). [14].

I studiet som sammenligner behovsprofiler for 141 undersentraler i svenske fjernvarmesystemer [14] (introdusert i kapittel 3.1.2), ble det konkludert med at offentlige

administrasjonsbygninger (herunder skolebygg som Storhamar skole) typisk har behovsprofiler som vist i Figur 6.2.

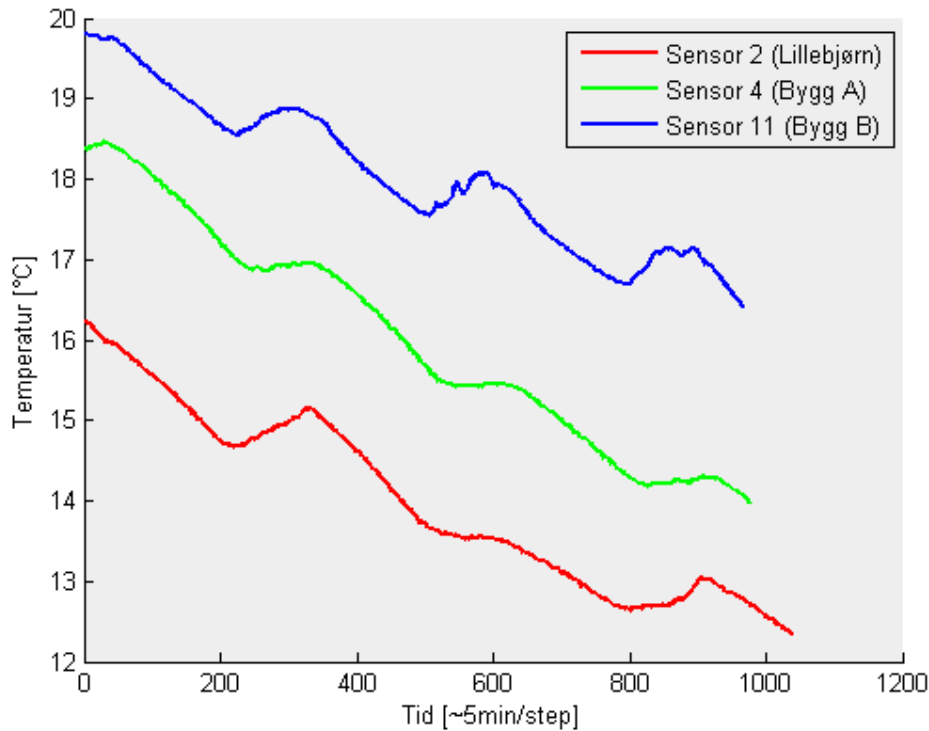
Behovsprofilen illustrerer at det er stor variasjon i varmebehovet til denne bygningskategorien. Dette skyldes at varmesystemene i blant annet skolebygg vanligvis reguleres etter aktiviteten i bygningene (såkalt "time clock operation control") [14]. Som profilen viser fører slik styring til at varmebehovet blir lavt om nettene og i helgene siden det vanligvis ikke er personer til stede i bygningene i disse periodene. Det er ikke behov for oppvarming og tilførsel av frisk luft når det ikke er personer til stede og mekanisk ventilasjon kan derfor slås av eller reduseres til et minimum. I noen bygninger er det i tillegg vanlig å redusere settpunkttemperaturen for romoppvarming i disse periodene (nattsinking), noe som resulterer i at varmebehovet reduseres ytterligere. Som det fremgår av figuren fører slik tidsstyring av ventilasjon og romoppvarming til at skolebygninger vanligvis har mye større døgnvariasjon i sine varmebehov enn det som er tilfelle i for eksempel husholdninger der det er behov for både ventilasjon og romoppvarming 24 timer i døgnet.

6.1.3 Beregning av tidskonstanter

Mangelen på teknisk informasjon om konstruksjonen til Storhamar skole medfører at bygningens termiske lagringspotensiale er uvisst. Det er derfor sett på som nødvendig å identifisere bygningens tidskonstant for å få et anvendbart mål på termisk tregghet og bygningens potensiale for å fungere som et termisk energilager.

I arbeidet med å beregne tidskonstanten ble det gjennomført et forsøk der all varmetilførsel til bygningen ble slått av slik at avkjølingsforløpet til inneluften kunne loggføres og analyseres. Ti temperaturfølere plassert rundt om i bygningen logget temperatur hvert femte minutt gjennom hele testperioden, noe som ga svært detaljerte temperaturforløp. Figur 6.3 viser et utvalg av de loggførte temperaturforløpene som er brukt som grunnlag for beregning av tidskonstanten.

I figuren er det inkludert én temperaturserie fra hver bygningsdel. Det fremgår tydelig at temperaturen ved starttidspunktet, T_0 , er forskjellig for de tre bygningsdelene. Årsaken til dette er at varmesystemet på Storhamar skole ble koblet ut i flere omganger, og T_0 er derfor målt på et tidspunkt da avkjølingsprosessen allerede var i gang. Starttidspunktet er definert slik fordi dette er tidspunktet hvor siste varmekilde ble koblet ut, og det er temperaturforløpet i perioden etter dette som er interessant for tidskonstantberegningen. Differansen mellom de forskjellige utgangstemperaturene er dog en indikasjon på at den termiske treggheten er forskjellig i de tre bygningsdelene og det er derfor beregnet egne tidskonstanter for hver bygningsdel.



Figur 6.3: Temperaturforløp etter avstenging av siste kilde for varmetilførsel.

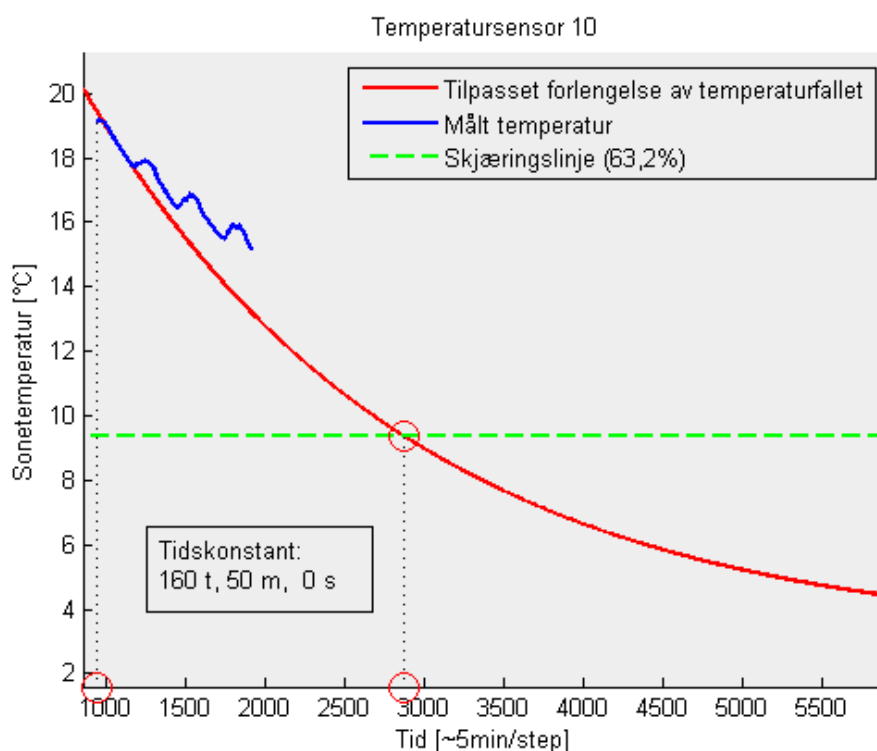
Videre viser figuren at temperaturforløpene har en nedadgående trend. Trenden er imidlertid preget av periodiske forstyrrelser med temperaturøkninger, noe som tydelig forsinker avkjølingsprosessen. Forstyrrelsene skyldes at bygningen daglig utsettes for solinnstråling som gir et varmetilskudd, Φ_{sol} , til oppholdssonene i bygningen, noe som fører til moderat temperaturøkning for inneluften. I tillegg er også utetemperaturen, T_e , høyere på dagtid enn om natten og det er derfor også naturlig å anta at varmetapene gjennom bygningskroppen er lavere. At disse størrelsene ikke er konstante fører til at betingelsene som står til grunn for ligning (4.6) ikke er oppfylt og de registrerte temperaturforløpene gir dermed ikke et korrekt grunnlag for beregning av bygningsdelenes tidskonstanter.

Tidskonstantene har derfor blitt identifisert ved å konstruere idealiserte temperaturforløp med form lik den eksponentielt avtagende avkjølingsprosessen vist i Figur 4.5. De eksponentielle forløp er konstruert og tilpasset de faktiske temperaturdataene ved hjelp av MATLAB. Script og funksjoner inkludert i Vedlegg C viser at de idealiserte temperaturforløpene er bestemt på grunnlag av følgende:

1. Trenden til de faktiske temperaturforløpene frem til første forstyrrelse. Dette er et intervall med stabilt temperaturfall fordi intervallet går over den første natten etter utkobling av varmetilførselen. Det er antatt at varmetap og varmetilskudd til bygningen er tilnærmet konstant i denne perioden.
2. Stasjonær balansetemperatur etter lang tid, $T_i(\infty)$, som er antatt å være lik den gjennomsnittlige utetemperaturen i måleintervallet ($\approx 3,5^\circ\text{C}$). Tidspunktet for når

denne temperaturen oppnås er tilpasset slik at formen på den idealiserte kurven blir slik at den ligger parallelt med de faktiske temperaturfallene gjennom hver natt.

Det er opprettet idealiserte temperaturforløp for samtlige av de ti måleseriene. Plottet i Figur 6.4 viser et eksempel på hvordan de idealiserte temperaturforløpet ble tilpasset for å stemme overens med de faktiske måledataene fra den aktuelle temperatursensoren. Det fremgår at det over tid blir relativt stor differanse mellom det idealiserte og det faktiske temperaturforløpet, men ved å ignorere ”temperaturtoppene ” som oppstår når det er varmetilskudd fra solinnstråling er det tydelig at intervallene med stabilt temperaturfall ligger tilnærmet parallelt med den idealiserte kurven.



Figur 6.4: Eksempel på beregning av tidskonstant ved hjelp av et idealisert temperaturforløp.

Plottet i figuren illustrerer at det ble funnet en tidskonstant for måleserien til temperatursensor 10 ved å beregne den tiden tok for det idealiserte temperaturforløpet å oppnå 63,2% av temperaturendringen som startet da varmetilførselen ble slått av. Tilsvarende plotting og beregning av tidskonstanter ble gjort for samtlige av de ti måleseriene og de resulterende tidskonstantene kan leses av i Tabell 6.1. Merk at resultatene for temperatursensor 5 er utelatt fordi måledataene fra denne sensoren avvok betraktelig fra de andre dataene og derfor ble ansett som feilaktige.

De gjennomsnittlige tidskonstantene viser at alle bygningsdelene kan kategoriseres som termisk tunge. Til tross for dette er det også klart at det er stor differanse mellom de forskjellige delenes termiske treghet, noe som vil påvirke oppvarmingsbildet.

Bygningsdel	Temperatur-sensor	Beregnet tidskonstant	Gjennomsnittlig tidskonstant
Lillebjørn	Sensor 1	75 t	≈ 85 t
	Sensor 2	96 t	
Bygg A	Sensor 3	132 t	≈ 135 t
	Sensor 4	141 t	
	Sensor 6	124 t	
	Sensor 7	139 t	
Bygg B	Sensor 10	161 t	≈ 170 t
	Sensor 11	175 t	
	Sensor 12	170 t	

Tabell 6.1: Beregnede tidskonstanter for Storhamar skole.

6.2 Metode for simulering

Resultatene fra litteraturstudiet viser at lastforskyvning er en driftsstrategi som potensielt kan bidra til å redusere den maksimale systemlasten (nødvendig levert varmeeffekt) i et fjernvarmesystem uten at dette går ut over kvaliteten på inneklimate i bygningene hvor varmetilførselen endres. Den eneste forutsetningen for å oppnå denne effekten er at bygningene har en betydelig andel termisk masse og at denne er eksponert mot romluften slik at de er direkte termisk sammenkoblet. Strategien er derfor mulig å implementere uten at det stilles krav til oppgradering av tekniske anlegg eller innstallering av nytt utstyr og den er derfor svært relevant for eksisterende bygninger, inkludert Storhamar skole.

I kapittel 6.1.2 ble det vist at varmetilførselen i skolebygninger typisk reguleres ned om natten (nattsinking) fordi det er unødvendig å varme opp en bygning når den ikke er i bruk. Nattsinking kan betraktes som en form for lastforskyvning fordi varmeleveransen reduseres i én periode og dermed må økes i en annen for å kompensere for temperaturfallet som har oppstått. Det vil imidlertid være mer korrekt å betrakte nattsinking som en lastreduksjon i stedet for lastforskyvning fordi formålet med nattsinking er å redusere energibruken i bygningen, mens formålet med lastforskyvning er å redusere energitapet i fjernvarmenettet gjennom å kutte effekttoppene i systemlasten slik at temperaturnivåene i nettet kan reduseres. Både nattsinking og lastforskyvning er imidlertid oppvarmingsstrategier som kan bidra til å redusere energibruken i fjernvarmesystemet Storhamar skole er en del av og det er derfor av interesse å simulere begge strategiene.

Lastforskyvning og også nattsinking fordrer at varmetilførselen til bygningen reguleres slik at det oppstår temperaturvariasjoner i bygningen. For å undersøke hvordan den termiske massen i bygningen responderer på endringer i tilførselen av varme må den dynamiske varmebalansen studeres. Som nevnt tidligere er det den kortsiktige effekten på varmebalansen som er interessant å studere og det er derfor valgt et simuleringsintervall

som spenner over kun to døgn. For å sikre at simuleringene blir relevante velges en periode på to vinterdager med lave temperaturer, slik at resultatene vil indikere den nedre tålegrensen for den termiske ytelsen til bygningen.

De beregnede tidskonstantene viser at de tre bygningsdelene har svært forskjellig varmekapasitet. Som nevnt tidligere i denne oppgaven har varmekapasiteten og den resulterende termiske massen til et bygg stor innvirkning på den dynamiske varmebalansen og behovet for varmeeffekt i en bygning. For å få korrekte simuleringer av den termiske ytelsen til Storhamar skole i IDA ICE vil det derfor være nødvendig å definere bygningskonstruksjonen separat for hver bygningsdel.

Siden IDA ICE er et svært detaljert simuleringsprogram vil simuleringresultatene bli svært komplekse derom hele bygningen er gjenstand for simulering. Dette gjør det vanskelig å isolere resultatene som skyldes tilsiktede parameterendringer og resultater som skyldes andre faktorer. For å forenkle simuleringresultatene og øke kvaliteten på analysen begrenses derfor simuleringsmodellen til å inneholde kun én sone fra hver bygningsdel. For at sonene som simuleres skal være representative for sin respektive bygningsdel er det valgt soner som er utstyrt med temperatursensorer i virkeligheten. Ved å velge soner utstyrt med temperatursensorer sikres det at de beregnede tidskonstantene – og dermed også antakelsene om termisk masse – er gyldig for alle sonene som simuleres.

Det valgte simuleringsintervallet er 13.-14. januar. I denne perioden er utetemperaturen stabilt lav og den gjennomsnittlige temperaturen er $-13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, inkludert ekstremalpunkter ved $-7,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (maks) og $-20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (min). Perioden er dermed én av de kaldeste sammenhengende periodene i simuleringsåret.

De valgte sonene er gjengitt i Tabell 6.2 som også viser hvilken bygningsdel sonen er en del av og den funksjon rommet har i bygningen.

Rom/soner	Bygningsdel	Rommets funksjon
A 202	Bygg A (sensor 4)	Arbeidsrom
B104	Bygg B (sensor 10)	Klasserom
Rom 16	Bygg C (sensor 1)	Oppholdsrom/lekerom

Tabell 6.2: Soner valgt som gjenstand for simulering i IDA ICE.

6.3 Referansemodell

For å ha et fast utgangspunkt og noe å sammenligne simuleringresultater opp mot, er det vanlig å opprette en referansemodell av bygningen som studeres. For å oppnå realistiske og brukbare resultater er det viktig at en slik referansemodell gjenspeiler den faktiske ytelsen til bygget. I arbeidet med å simulere Storhamar skole er det derfor lagt ned betydelig innsats i å konstruere en nøyaktig modell med høyt detaljnivå.

Følgende elementer er brukt som utgangspunkt for konstruksjon av referansemodellen:

1. Teknisk inndata som ble benyttet ved energimerking av bygningen i 2012. Inkludert i Vedlegg B.
2. Plantegninger for hver etasje i de forskjellige bygningsdelene.

Energimerkingsprosessen benyttet simuleringsprogrammet SIMIEN til å beregne energiytelsen til skolebygningen. SIMIEN er et betydelig enklere program enn IDA ICE og inndataene som ble benyttet i SIMIEN har derfor et lavere detaljnivå enn det som kreves for å lage en modell av høy kvalitet i IDA ICE. I tillegg er tegningsgrunnlaget mangelfullt og geometriske spesifikasjoner for himlinghøyde, vindushøyde, takformasjon etc., er ikke inkludert i tegningene. Følgelig er den tilgjengelige tekniske informasjonen om Storhamar skole ikke tilstrekkelig til å konstruere en velfungerende modell i IDA ICE og det har derfor vært nødvendig å foreta en rekke antakelser. De mest signifikante antakelsene vil, i tillegg til innstillinger og valg tatt i forbindelse med konstruksjonen av referansemodellen, gjennomgå i de følgende underkapitlene.

6.3.1 Klima og værdata

IDA ICE benytter lokale klimafilene for at simuleringene utføres for et klima som er realistisk for bygningens geografiske posisjon. Programmet inneholder ingen klimaprofil for Hamar, derfor er det i denne oppgaven blitt opprettet en egen klimafil. Denne inneholder importerte klimadata fra Ilseng værstasjon, som er den værstasjonen i Norge som ligger nærmest Storhamar skole. Klimatiske data som var mulig å oppdrive for denne stasjonen var lufttemperatur, luftfuktighet og strålingsintensitet.

Dette er imidlertid ikke tilstrekkelig for IDA ICE, så i tillegg ble det benyttet målinger av vindhastighet fra værstasjonen på Gardermoen flyplass. Klimafilene som benyttes som grunnlag for simuleringene i denne oppgaven er dermed satt sammen av data fra to ulike værstasjoner og kan derfor ikke antas å gjenspeile de faktiske forholdene helt presist. Det forventes likevel at den konstruerte klimafilene gjenspeiler forholdene på Hamar bedre enn noen av klimafilene som er inkludert i softwaren.

6.3.2 Romgeometri

Sonene i referansemodellen er konstruert slik at de stemmer overens med plantegningene for Storhamar skole og sonenes grunnflate er derfor helt eksakt. Tegningsgrunnlaget inkluderer imidlertid ikke snitteplaner eller annen informasjon om høydeforhold og himlingshøyden er derfor satt til 3,5 m basert på øyemålsbetraktninger.

De tre sonene som simuleres tilhører hver sin bygningsdel og er derfor adskilt fra hverandre, noe som resulterer i at referansemodellen blir bestående av tre frittstående rom. IDA ICE

forutsetter imidlertid at skilleveggene i de simulerte sonene grenser mot soner som holder samme temperatur slik at det kun er varmeutveksling gjennom ytterveggene som resulterer i varmetap for sonene.

De viktigste geometriske dataene for sonene i referansemodellen er gjengitt i Tabell 6.3.

Arealdata	A202	B104	Rom 16
	Bygg A	Bygg B	Bygg C
Grunnflate, BRA (m ²)	67	56	78
Vindusareal (m ²)	11	11	25
Areal yttervegger (m ²)	36	30	26

Tabell 6.3: Viktige arealdata i referansemodellen.

6.3.3 Bygningskropp

U-verdier, kuldebroer og infiltrasjon

De benyttede inndataene for bygningskroppen er i overensstemmelse med verdiene i grunnlaget fra energimerkingsprosessen i SIMIEN. U-verdier (varmeoverføringskoeffisienter) for yttervegger, tak, gulv, vinduer og ytterdører er gjengitt i Tabell 6.4.

Teknisk spesifikasjon	Verdi
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0.31
U-verdi tak [W/m ² K]	0.18
U-verdi gulv mot grunn [W/m ² K]	0.19
U-verdi vinduer og ytterdører [W/m ² K]	1.80
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0.09
Lekkasjetall (ved 50 Pa trykkdifferanse) [luftvekslinger/time]	3.0

Tabell 6.4: Utvalgte inndata for bygningskroppen, hentet fra Vedlegg B.

I tillegg til U-verdier avhenger varmetapet gjennom bygningskroppen av kuldebroer og infiltrasjon. I IDA ICE er det mulig å definere kuldebroer for hver enkelt komponent eller å benytte en normalisert kuldebroverdi for hele bygningskroppen. Den konstruerte referansemodellen benytter den normaliserte kuldebroverdien som er gjengitt i tabellen over.

Lekkasjetallet angir infiltrasjonen og er satt lik 3 luftvekslinger per time ved en trykkdifferanse på 50 Pa. Trykkdifferanse mellom innsiden og utsiden av bygningskroppen oppstår når det er bevegelse i uteluften og infiltrasjonstap avhenger derfor av vindhastigheter. I IDA ICE blir trykkoeffisientene for bygget automatisk beregnet basert på byggets geografiske plassering og vindhastighetene i klimafilen.

Beregningen avhenger i tillegg av hvordan brukeren definerer bebyggelsen i nærområdet. Dette skyldes at bebyggelsesnivået vil påvirke graden av vindskjerming bygningen får fra sine omgivelser. I simuleringene er beregningene basert på at modellen av Storhamar skole ligger i et forstadsområde og dermed er middels utsatt for vind.

Vinduer

Vinduene som benyttes i modellen har vindusglass med U-verdi lik $1,848 \text{ W/m}^2\text{K}$ og vinduskarmer med U-verdi lik $1,80 \text{ W/m}^2\text{K}$. I IDA ICE er vinduskarmene definert til å utgjøre 10% av det totale vindusarealet og den gjennomsnittlige u-verdien til vinduene er derfor tilnærmet lik verdien oppgitt i Tabell 6.4. Øvrige tekniske spesifikasjoner av interesse for varmembalansen i modellen er oppgitt i Tabell 6.5.

Teknisk spesifisering, vinduer	
U-verdi vindusglass	1.848
U-verdi vinduskarm	1.800
Solfaktor (g)	0.469
Soltransmisjon (t)	0.401
Synlig soltransmittans (T_{vis})	0.634

Tabell 6.5: Tekniske spesifikasjoner for vinduene i simuleringsmodellen

Vinduene er plassert i 3D-modellen i overensstemmelse med plantegningene og konstruert med korrekte bredde- og høydemål dersom denne informasjonen fremgikk av tegningene. I de tilfeller der informasjon om vindusegeometrien ikke var oppgitt ble vindustørrelsen estimert på grunnlag av øyemålsbetraktninger.

Termisk masse og varmekapasitet

Formålet med de fleste energistudier er å undersøke energibruk over tid og det er da tilstrekkelig å beskrive bygningskroppen med varmetapskoeffisienter og andre parametere som beskriver varmetap. I dette studiet er derimot fokus rettet mot hvordan termisk masse og varmekapasitet kan utnyttes for å redusere kortsiktig variasjon i energibruk, og det er derfor viktig å ta hensyn til varmekapasiteten i bygningskonstruksjonen når referansemodellen konstrueres.

Det er i denne oppgaven vist at de tre bygningsdelene som danner Storhamar skole har ulik tidskonstant og dermed termisk treghet. Dette tilsier videre at bygningsdelene også har ulik varmekapasitet og varmelagringssevne, noe det må tas hensyn til når referansemodellen defineres i IDA ICE. I tegningsgrunnlaget til Storhamar skole er det imidlertid ikke inkludert hverken tverrsnitt-tegninger eller andre detaljer som gir informasjon om de faktiske veggkonstruksjonene, noe som impliserer at disse må defineres basert på antakelser.

Det antas at mengden termisk masse i de forskjellige veggkonstruksjonene er proporsjonal med veggens tidskonstant og veggene som benyttes i referansemodellen er derfor konstruert med materialer som vist i Tabell 6.6.

	Bygg A		Bygg B		Bygg C	
	Materiale	Tykkelse	Materiale	Tykkelse	Materiale	Tykkelse
Konstruksjonsjikt i yttervegger. Øverste materiale er innerst mot inneluften.	Treverk	2 cm	Betong	15 cm	Treverk	3 cm
	Betong	8 cm	Isolasjon	10,5 cm	Bindingsverk	13,5 cm
	Isolasjon	10 cm	Betong	15 cm	m/ isolasjon	
	Treverk	2 cm			Treverk	3 cm
Total tykkelse på vegg	22 cm		40,5 cm		19,5 cm	
Resulterende U-verdi	0,313 W/m ² K		0,308 W/m ² K		0,305 W/m ² K	
Utnyttbar varmekapasitet	185 kJ/m ² K		304 kJ/m ² K		36 kJ/m ² K	

Tabell 6.6: Inndata for bygningsdelenes veggkonstruksjon.

Veggene er i utgangspunktet standardiserte yttervegger som er tilgjengelig i databasen til IDA ICE, men tykkelsen på isolasjonssjiktene er tilpasset slik at veggens totale u-verdi blir tilnærmet lik 0,31 W/m²K som er u-verdien spesifisert i Tabell 6.4. Valget av konstruksjon er basert på klassifiseringen av bygningsdelenes "tunghet".

For å kontrollere at veggkonstruksjonene har forskjellig termisk masse er den utnyttbare varmekapasiteten beregnet og inkludert i tabellen. Den utnyttbare varmekapasiteten er her definert som den varmemengden som kan lagres per kvadratmeter veggflate per grad temperaturendring i veggmaterialet. Beregningene baserer seg på materialenes termiske egenskaper, som i IDA ICE er definert som vist i Tabell 6.7.

	Termisk konduktivitet (W/m·K)	Densitet (kg/m ³)	Spesifikk varme (J/kg·K)
Treverk	0,14	500	2300
Betong	1,7	2300	880
Isolasjon	0,036	20	750
Bindingsverk m/ isolasjon	0,052	92	2010

Tabell 6.7: Materialeegenskaper i IDA ICE.

Den utnyttbare varmekapasitet viser at bygg B har mye større varmekapasitet enn bygg A som igjen har mye større enn bygg C, noe som innebærer at de implementerte konstruksjonene er i overensstemmelse med de beregnede tidskonstantene og dermed kan forventes å ha lignende oppførsel. Det er imidlertid kun trenden til bygningsdelenes termisk ytelse som kan forventes å være realistisk, mens konkrete mål på ytelsen forventes å være

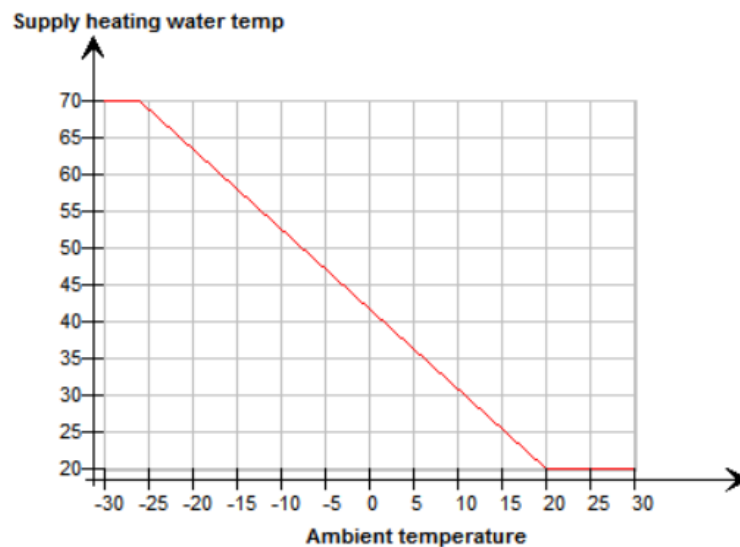
upresise. Dette er en naturlig slutning, tatt i betraktning at bygningskonstruksjonene i modellen kun er basert på antakelser. Som et resultat antas det at simuleringsmodellen er god nok til å gi veiledende resultater, men at det vil være stor usikkerhet knyttet til konkrete resultater.

6.3.4 Varmesystem

I referansemodellen er varmesystemet i kontinuerlig drift og behovet for varme er termostatregulert med settpunkt (i henhold til SIMIEN-grunnlaget) for romluftstemperatur på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Varme overføres fra det vannbårne varmesystemet til inneluften ved hjelp av radiatorer som er dimensjonert for en tur- og returtemperatur på henholdsvis $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved en lufttemperatur på $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. I henhold til spesifikasjonene i Vedlegg B er hver sone utstyrt med en radiatoreffekt som tilsvarer 185 W/m^2 . For et rom på 60 m^2 med fire radiatorer innebærer dette at hver radiator maksimalt kan avgi en effekt på 2775 W .

Temperaturen inn på varmesystemet kompenseres etter utetemperaturen.

Kompenseringskurven som benyttes i referansemodellen har et forløp som vist i Figur 6.5.



Figur 6.5: Standard kompenseringsskurve benyttet i IDA ICE .

Forbruket av varmt tappevann er antatt å være jevnt fordelt over hele året og effektbehovet for oppvarming av tappevann er derfor normalisert til å være $4,5\text{ W/m}^2$. I referansemodellen forbrukes tappevann kun når personer er tilstede i bygningen.

6.3.5 Ventilasjon

Modellens ventilasjonsanlegg er konstruert slik at det er i overensstemmelse med tekniske dataene i vedlegg B. De viktigste inndataene i referansemodellen er gjengitt i Tabell 6.8. IDA ICE krever at luftmengder oppgis i $L/(s \cdot m^2)$ og den gjennomsnittlige luftmengden

som tilføres i driftstiden er derfor omregnet som følger:

$$\frac{10,0 [m^3/(h \cdot m^2)] \cdot 1000 [l/m^3]}{3600 [s/h]} = 2,78 [l/(s \cdot m^2)] \quad (6.1)$$

Denne luftmengden tilføres sonene i modellen i perioden 07.00–17.00 på hverdager og ventilasjonsanlegget har dermed en driftstid på 10 timer per dag. I helger, ferier og helligdager er ventilasjonsanlegget ikke i drift. Settpunkttemperatur for tilluften er satt til $19\text{ }^\circ\text{C}$, noe som innebærer at den er lavere enn settpunktet for oppvarming på $21\text{ }^\circ\text{C}$. Årsaken til dette er at interne varmekilder som blant annet personer, belysning og utstyr, tilfører varme til inneluften og dermed bidrar til å heve lufttemperaturen opp på et komfortabelt nivå.

Inndata for ventilasjon	
Spesifikk viteeffekt (SFP)	4.0 kW/(m ³ /s)
Temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner	68 %
Gj.snitt. luftmengde i driftstiden	10.0 m ³ /(m ² /h)
Settpunkttemperatur	19 °C

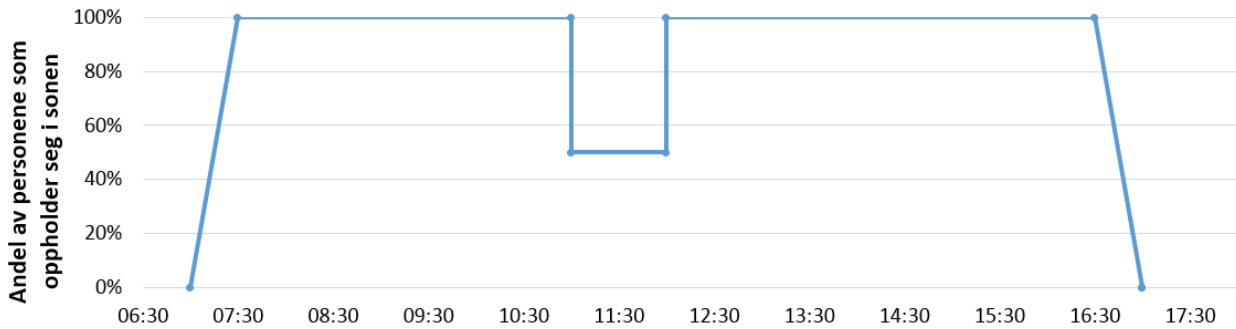
Tabell 6.8: Sentrale inndata for ventilasjonsanlegget i referansemodellen.

6.3.6 Personer

Storhamar skole har 350 elever og 50 ansatte, som til sammen gir et betydelig varmetilskudd til bygningen i skoletiden. I IDA ICE beregnes dette varmetilskuddet automatisk på grunnlag av inndata for aktivitet- og bekledningsnivå, samt tidsplaner som definerer hvor og når personene oppholder seg i bygningen.

I samsvar med kapittel 2.1 er det i referansemodellen antatt at personene har et bekledningsnivå på 1 clo i fyringssesongen og at det gjennomsnittlige aktivitetsnivået blant personene i bygningen tilsvarer sittende arbeid med metabolisme i intervallet 1,1 – 1,5 met. Ved å betrakte Figur 2.4 fremgår det at dette forholdet mellom bekledning og aktivitetsnivå tilsier at personenes optimale operative temperatur er i området $20\text{ }^\circ\text{C}$ – $23\text{ }^\circ\text{C}$. I simuleringene i IDA ICE vil følgelig innneklimaet kun betraktes som utilfredsstillende dersom personene utsettes for en romlufttemperatur som er utenfor dette området.

Personenes aktivitet- og bekledningsnivå bestemmer varmeeffekten som avgis, men det resulterende varmetilskuddet til bygningen vil avhenge av personenes oppholdstid i bygningen. I referansemodellen er den daglige oppholdstiden definert til å være kl. 08:00 til kl. 1600 på hverdager. I helger og ferier er det antatt at bygningen ikke er i bruk. For å oppnå litt variasjon i varmetilskuddet er det opprettet en timeplan for bruken av klasserommene i modellen. Figur 6.6 viser at denne timeplanen inneholder en pause midt på dagen.



Figur 6.6: Timeplan for oppholdstid i klasserommene i bygningen.

Det totale varmetilskuddet til et rom vil naturlig nok være avhengig av hvor mange personer som oppholder seg i rommet. I referansemodellen er det antatt at et klasserom huser 20 personer, noe som for et klasserom på 60 m^2 tilsvarer $0,33 \text{ personer/m}^2$.

6.3.7 Øvrige interne varmetilskudd

Belysning og teknisk utstyr gir også interne varmetilskudd til bygningen. I henhold til spesifikasjonene i Vedlegg B bidrar disse med spesifikke varmetilskudd på henholdsvis 10 W/m^2 og 6 W/m^2 . Belysning og teknisk utstyr antas å være slått på så lenge det er personer til stede i bygningen. I de resterende rommene i modellen er antallet personer definert slik at det totale antallet personer i bygningen blir 400 (350 elever + 50 ansatte).

6.4 Beskrivelse av simuleringsscenarioer

Varmetilførselen til sonene i IDA ICE reguleres av termostatventiler på radiatorene. Disse styrer varmetilførselen slik at romtemperaturen opprettholdes på en settpunktverdi som enten kan være konstant (slik som i referansemodellen) eller variabel. Når settpunkttemperaturen varierer vil også den nødvendige varmetilførselen variere, og dette kan derfor benyttes til å simulere både nattsinking og lastforskyvning. Nedenunder følger en gjennomgang av settpunktforløpene som benyttes i simuleringene.

6.4.1 Simulering av referansemodellen

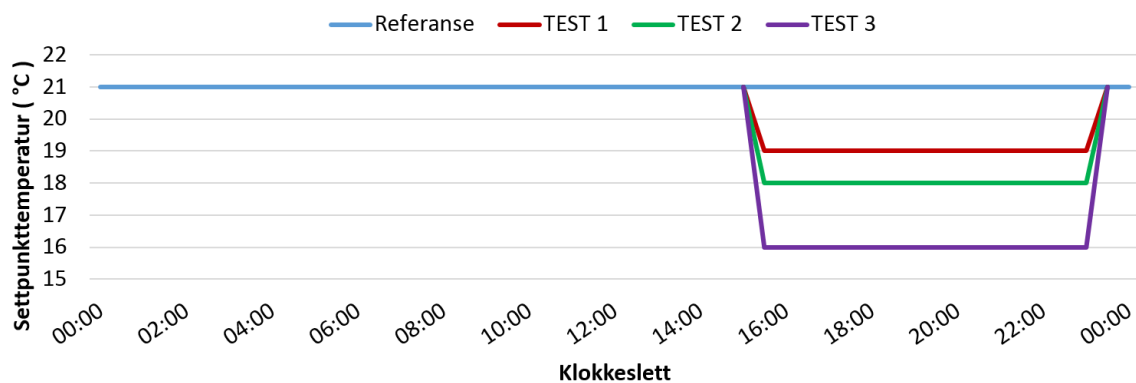
Det gjøres først en helårssimulering av referansemodellen for å se hvordan oppvarmingsbildet blir når settpunktet for romoppvarming er konstant lik $21 \text{ }^\circ\text{C}$ gjennom hele døgnet. Resultatene fra referansesimuleringen vil bli brukt til å analysere varmesituasjonen i de ulike sonene slik at det blir mulig å avgjøre i hvilke soner det er hensiktsmessig å foreta nattsinking og/eller lastforskyvning. Det er for øvrig også nyttig å foreta en referansesimulering siden resultatene kan brukes som sammenligningsgrunnlag når simuleringene av nattsinking og lastforskyvning skal analyseres.

6.4.2 Nattsinking gjennom endring av settpunkttemperatur

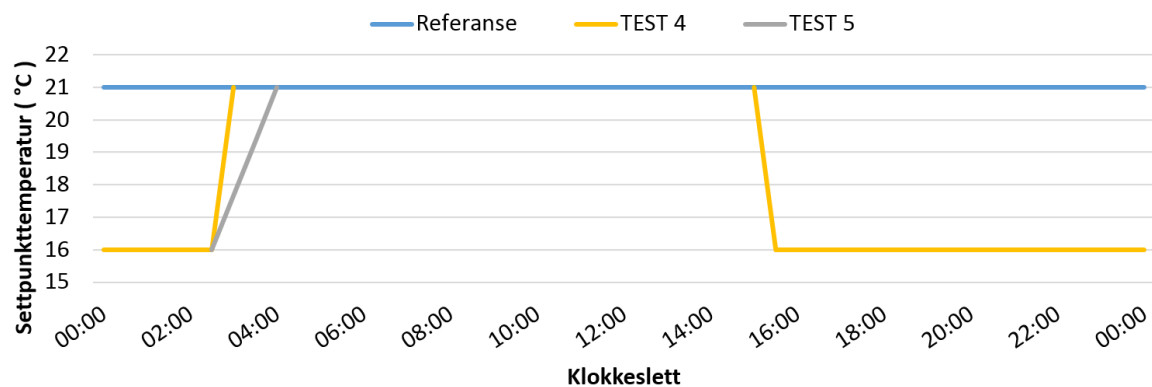
For å simulere nattsinking justeres settpunkttemperaturen ned slik at varmetilførselen om natten reduseres. I simuleringene benyttes fem ulike settpunktforløp som illustrert med linjediagrammer i Figur 6.7 og 6.8.

Det første linjediagrammet illustrerer at de tre første settpunktforløpene reduserer varmetilførselen i like lange perioder, men at reduksjonen i settpunkttemperatur er forskjellig. Formålet med dette er å analysere hvor mye det er mulig å redusere temperaturen på kveldstid, uten at det går ut over den termiske komforten neste morgen.

De to siste settpunktforløpene beholder den samme temperaturreduksjonen som TEST 3, men opprettholder den i en lenger periode. Det fremgår for øvrig at den eneste forskjellen mellom TEST 4 og TEST 5 er endringsraten på settpunktet når temperaturen skal heves tilbake til det komfortable nivået. Formålet med dette er å undersøke om varmesystemet kan levere den samme varmemengden som i TEST 4, men at effektbehovet kan reduseres ved at varmen leveres over lengre tid.



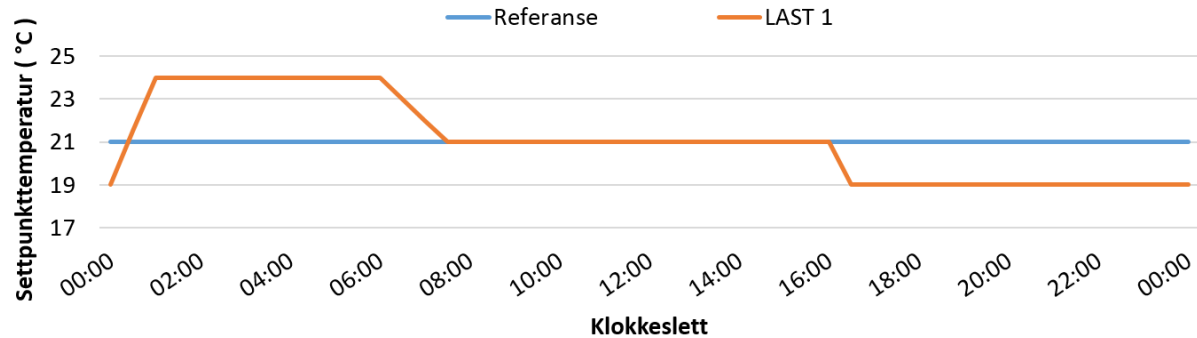
Figur 6.7: Settpunktforløp benyttet til simulering av nattsinking. Disse tre testforløpene fører til at varmetilførselen reduseres i ulik grad etter arbeidstiden og frem til kl 23:00.



Figur 6.8: Settpunktforløp benyttet til simulering av nattsinking. Disse to testforløpene fører til at varmetilførselen reduseres over en enda lenger periode.

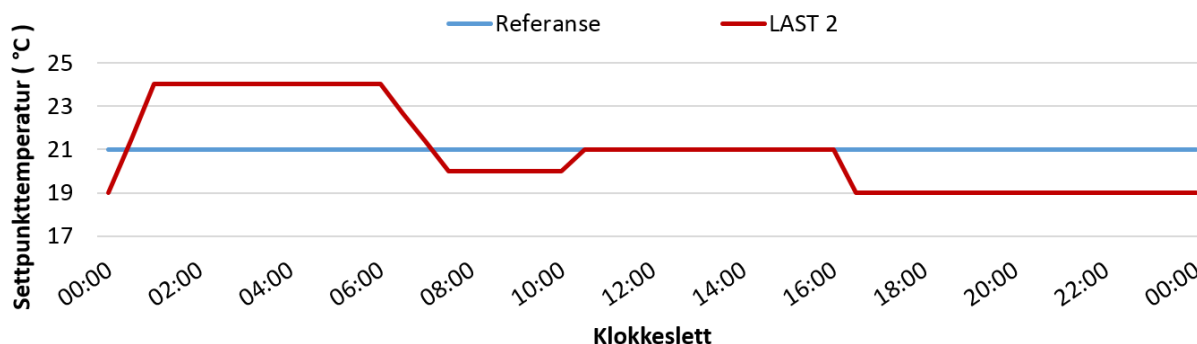
6.4.3 Lastforskyvning gjennom endring av settpunkttemperatur

For å simulere lastforskyvningen må settpunktet for romoppvarming vekselvis justeres opp og ned fra normalen. Dette vil medføre at varmesystemet leverer henholdsvis for mye eller for lite varme til sonen slik at den termiske massen lades og utlades. Settpunktforløpene som benyttes er illustrert med linjediagram i Figurene 6.9, 6.10 og 6.11.



Figur 6.9: Settpunktforløpet "LAST 1", benyttet til simulering av lastforskyvning.

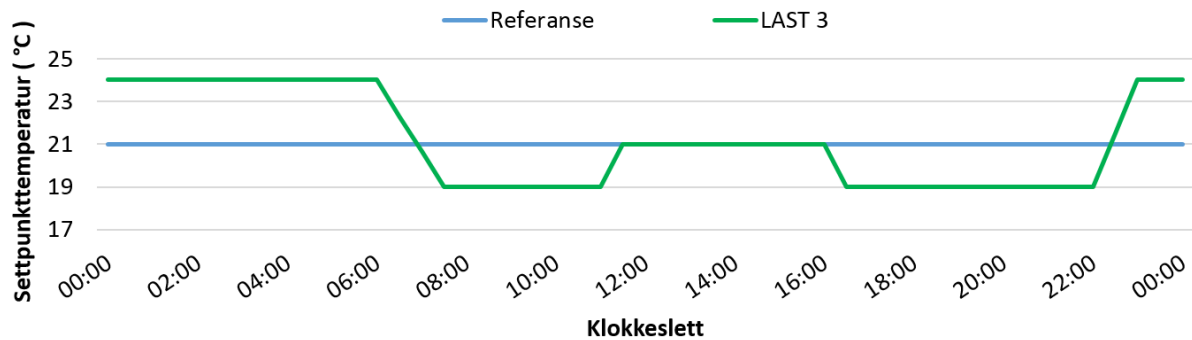
I den første settpunktforløpet ("LAST 1") er settpunktet justert ned til 19 °C om ettermiddagen og kvelden og opp til 24 °C om natten slik at effekttoppen i varmebehovet inntreffer i nattetimene. På dagtid når det er personer i bygningen er settpunktet uforandret. Selv om settpunktet ikke justeres ned i morgentimene der effekttoppene i fjernvarmenettet oppstår, er det likevel forventet at denne reguleringen bidrar med en reduksjon av effektbehovet i denne perioden siden det er tilført et overskudd av varme i forkant. Det er i tillegg forventet at det maksimale effektbehovet vil øke i og med at varmesystemet må heve temperaturen fra 19 °C til 24 °C, men siden dette vil foregå midt på natten når belastningen på fjernvarmenettet er liten er dette å anse som akseptabelt.



Figur 6.10: Settpunktforløpet "LAST 2", benyttet til simulering av lastforskyvning.

Det andre settpunktforløpet ("LAST 2") er konstruert på nesten samme måte som det første. Den eneste forskjellen er at settpunktet er justert ned 1 °C i perioden mellom kl. 07:00 og 10:00 slik at effektuttaket fra fjernvarmenettet reduseres. Det forventes at denne nedjusteringen vil resultere i en større andel misfornøyde personer i sonen, men siden det

akkumuleres varme i forkant samt at varigheten av nedjusteringen er relativt kort, så forventes ikke andelen å bli større enn at den kan betraktes som akseptabel.



Figur 6.11: Settpunktforløpet "LAST 3", benyttet til simulering av lastforskyvning.

Det tredje og siste settpunktforløpet ("LAST 3") er konstruert slik at ladeperioden blir lengre slik at det kan akkumuleres en større varmemengde i den termiske massen. I tillegg er settpunktet justert ned 2 °C i morgentimene slik at reduksjonen i effektbehov blir betydelig. Det forventes imidlertid at slik regulering av varmetilførselen vil ha stor negativ innvirkning på innklimakvaliteten.

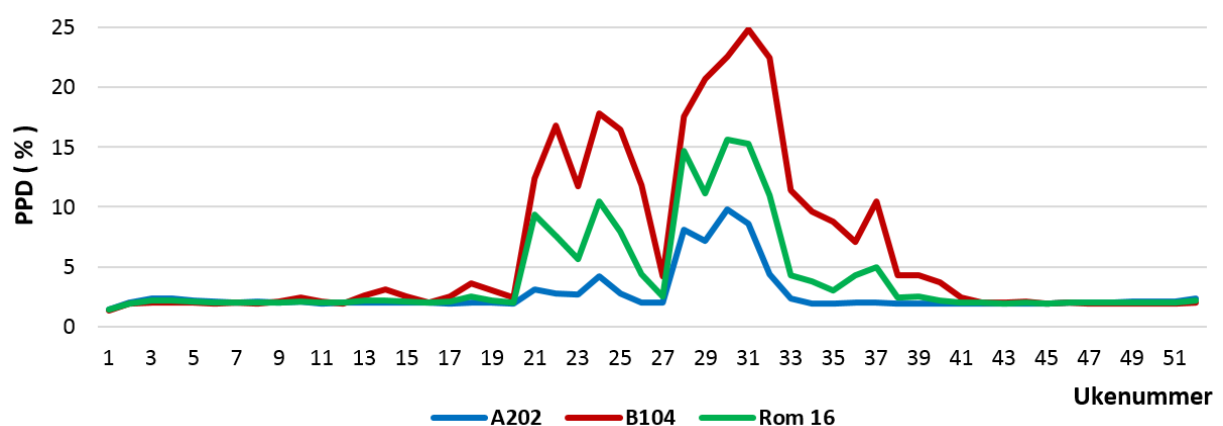
7. Simuleringsresultater

I dette kapittelet presenteres resultatene av simuleringene som er gjort for Storhamar skole. Resultatene fra referansesimuleringen presenteres først og på grunnlag av disse avgjøres det hvilke soner som er egnet for simulering av nattsenking og lastforskyvning. Resultatene fra de ulike simuleringstestene vil deretter presenteres og gjennomgås.

7.1 Helårssimulering av referansemodellen

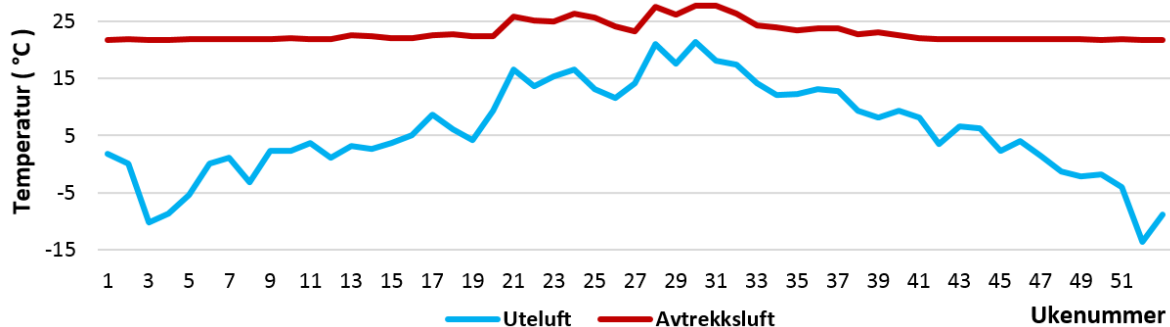
I referansesimuleringene tilfører varmesystemet varme til rommene kontinuerlig gjennom hele døgnet slik at romlufttemperaturen opprettholdes på settpunktverdien 21 °C. En enkel helårssimulering av de tre sonene i modellen viser at denne driftsstrategien resulterer i et årlig forbruk av energi på 177,6 kWh/m². Dette er noe høyere enn forbruket på 167,0 kWh/m² som ble beregnet i SIMIEN under energimerkingsprosessen i 2012 (se vedlegg B), men avviket er imidlertid akseptabelt tatt i betraktning at sonen som representerer bygg C (rom 16) har et over gjennomsnittet stort vindusareal (se Tabell 6.3) og dermed også vil ha et unormalt høyt varmetap.

Helårssimuleringen viser i tillegg at det er stor misnøye med det termiske inneklimaet i bygningen. Av Figur 7.1 fremgår det imidlertid at den beregnede PPD-verdien kun er uakseptabelt høy i sommerhalvåret. Dette viser at misnøyen ene og alene skyldes at bygningen blir overopphetet om sommeren og at inneklimaet generelt er tilfredsstillende resten av året.



Figur 7.1: Resultater fra referansesimuleringen som viser forventet antall misfornøyde (PPD) for hver uke gjennom et helt år. Merk at PPD-verdiene som fremstilles her er beregnet på grunnlag av alle timene i en uke. PPD blir null når det ikke er personer til stede i bygningen og siden oppholdstiden er begrenset til omlag 1/3 av døgnet så er PPD-verdien i snitt 3 ganger høyere enn det som fremgår av snittverdiene.

Temperaturforløpene i Figur 7.2 viser at misnøyen oppstår i de periodene der utetemperaturen er høyere enn det ønskede settpunktet for tilluftstemperatur i ventilasjonssystemet. Siden det ikke er installert noe kjølebatteri i ventilasjonsaggregatet er det ikke mulig å kjøle tilluften til ønsket temperatur og systemet er derfor nødt til å ventilere bygningen med for varm luft. Romtemperaturen blir dermed høyere enn det som er komfortabelt for personene i bygningen, derav misnøyen. Temperaturforløpene og misnøyekurvene viser dermed at Storhamar skole har behov for kjøling i perioden Mai-September, men tatt i betraktning at en skolebygning ikke er i bruk over sommeren er det i praksis bare i periodene Mai-Juni og August-September at det er et reelt behov for kjøling.



Figur 7.2: Resultater fra referansesimuleringen som viser temperaturforløp for uteluft og avtrekkluft fra Storhamar skole. Forløpene er satt sammen av snittemperaturer for hver uke.

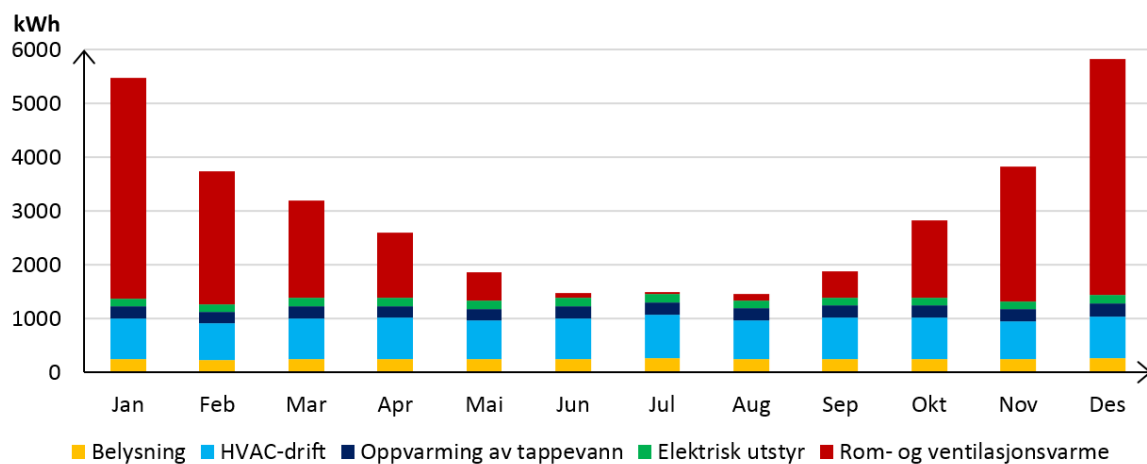
Simuleringsresultatene viser videre at energibruken til Storhamar skole som forventet er svært sesongavhengig. Figur 7.3 illustrerer at variasjonen oppstår som følge av at behovet for oppvarming er omvendt proporsjonalt med utetemperaturen. Dermed blir varmebehovet stort når temperaturen er lav i vinterhalvåret, mens det blir lite eller nærmest ikke-eksisterende i de varme sommermånedene. Som stolpediagrammet viser er den resterende energibruken (belysning, utstyr, drift av HVAC-anlegg og oppvarming av tappevann) fordelt jevnt utover året slik at den blir konstant hver måned og dermed ikke bidrar til variasjonen. Varmebehovet til Storhamar skole og den resulterende lasten det utgjør i fjernvarmenettet har dermed et variasjonsmønster som er i overenstemmelse med den sesongvarierende lastprofilen som er typisk for fjernvarmesystemer i nordiske klimaer (normal sesongvariasjon i svenske fjernvarmesystemer er illustrert Figur 3.1).

En mer nærgående analyse av energien som går til romoppvarming viser at de tre sonene har svært ulikt varmebehov. Ved å illustrere sonenes forbruk av energi til romoppvarming per kvadratmeter som vist i Figur 7.4 fremgår det tydelig at sone B104 i Bygg B skiller seg fra de to andre ved at den krever vesentlig mindre tilførsel av varme for å opprettholde en romtemperatur på 21 °C. Årsaken til at denne sonen har så lavt varmebehov sammenlignet med de andre må betraktes som et resultat av tre faktorer. For det første er Bygg B den tyngste bygningsdelen og den har derfor større termisk treghet enn de to andre.

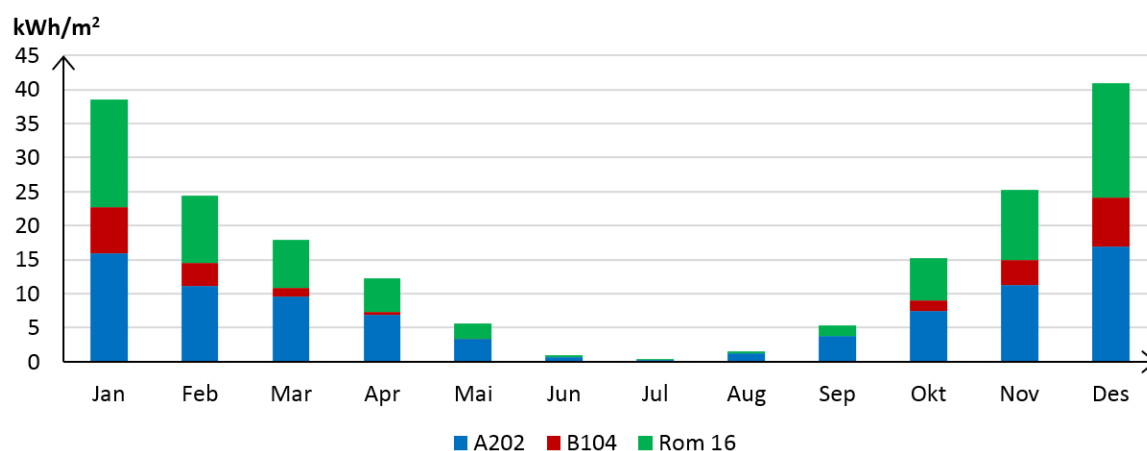
Avkjølingsforløpene som er brukt til å beregne bygningsdelenes tidskonstanter viser at større termisk treghet fører til at romtemperaturen faller tregere i Bygg B og som et resultat av dette er det følgelig ikke nødvendig for varmesystemet å tilføre like store varmeeffekt her som i de to andre bygningsdelene.

For det andre er sone B104 et klasserom som er antatt å være i bruk hele skoledagen noe som innebærer at sonen får et stort internt varmetilskudd fra personer. I modellen er dette den sonen med flest personer per kvadratmeter og det spesifikke varmetilskuddet fra personer er derfor større i denne sonen enn i de andre. Personbelastningen er dermed en faktor som bidrar til å redusere varmebehovet til B104 ytterligere, noe som igjen fører til at det blir enda større differanse i sonenes behov for aktiv oppvarming.

For det tredje har B104 kun to vinduer og det totale vindusarealet er dermed lite i forhold til i de andre sonene (spesielt i forhold til Rom 16 i Bygg C). Mindre vindusareal fører naturlig nok til mindre varmetap til omgivelsene og dermed tilsvarende mindre oppvarmingsbehov.



Figur 7.3: Oversikt over månedlig levert energi ved simulering av referansemodellen.



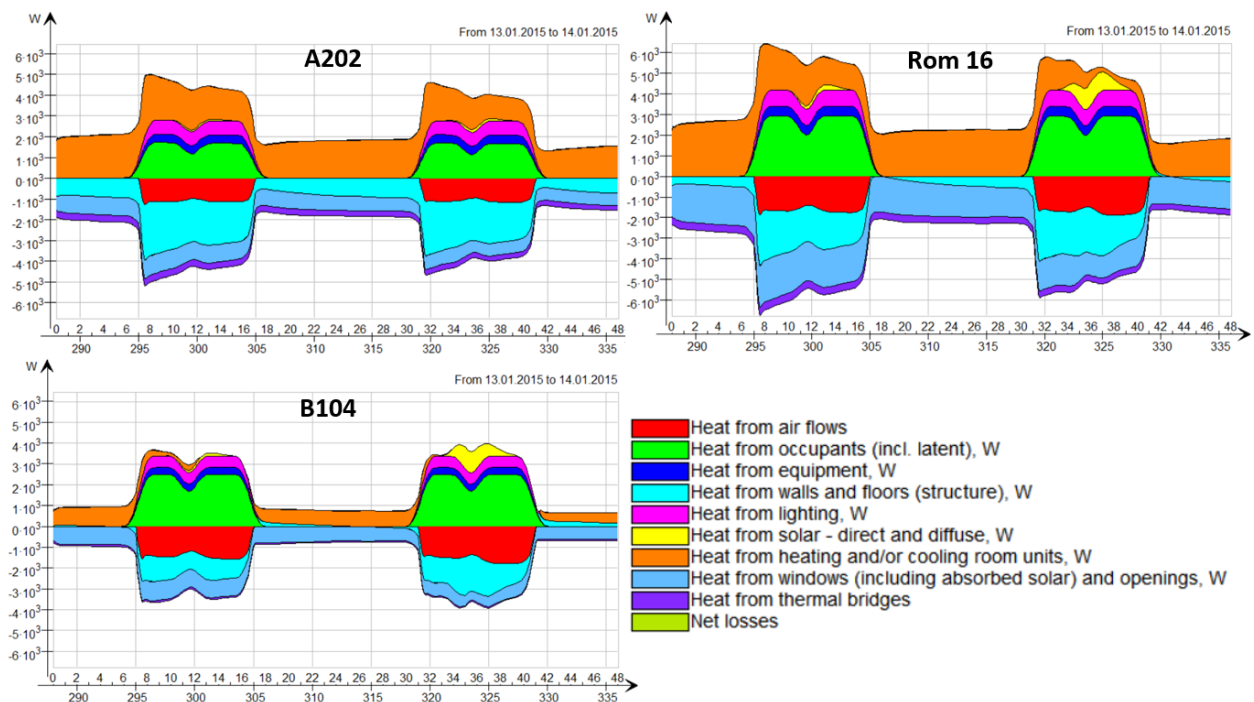
Figur 7.4: Oversikt over sonenes månedlige energibruk til romoppvarming per kvadratmeter.

7.2 Vinterdagssimulering av referansemodellen

I forrige avsnitt ble varmebehovet over et år illustrert i stolpediagram slik at sesongvariasjonen skulle komme tydelig frem. En slik månedlig fremstilling gir imidlertid ikke noe godt bilde av den dynamiske oppvarmingsbildet og det er derfor nødvendig å studere varmembalansen i bygningen over et kortere intervall. Dette avsnittet studerer derfor resultater fra simuleringer av referansemodellen over det to dager lange tidsintervallet som ble definert i kapittel 6.2.

7.2.1 Analyse av varmembalansen i sonene

IDA ICE genererer automatisk diagrammer som viser den dynamiske varmembalansen for hver sone. Disse diagrammene viser hvordan summen av varme strømmer til og fra sonen over tid og hvordan summen av varmetap og interne varmetilskudd bestemmer hvor stor effekt varmesystemet må levere for å opprettholde varmembalansen. Figur 7.5 viser hvordan varmembalansediagrammene ser ut for vinterdagsintervallet med lav utetemperatur.



Figur 7.5: Dynamisk varmembalanse for de tre simulerte sonene i referansemodellen. Diagrammene er forminskert og sidestilt slik at differansen mellom de tre sonene skal komme tydelig frem. Enheten på x-aksen er timer i simuleringsintervallet (totalt 48 timer), mens y-aksen viser varmeeffekt (W) som tilføres eller tapes fra sonen (akseintervallet går fra -6 kW til $+6$ kW).

Diagrammene viser at varmemengden som leveres til hver sone (arealet av de oransje feltene) varierer både med tiden og fra sone til sone, men klasserommet B104 er helt tydelig den sonen som krever minst varme. På dagtid, når det er aktivitet i dette rommet, er

faktisk summen av varmetilskuddene fra personene (grønt felt), utstyr (mørkeblått felt) og belysning (rosa felt) tilstrekkelig til å dekke hele varmebehovet i sonen. Dette er ikke tilfelle for sonene i de to andre bygningsdelene der varmesystemet er nødt til å tilføre varme kontinuerlig gjennom hele døgnet. Tatt i betraktning at 48-timers perioden som er simulert her er unormalt kald, så forklarer dette resultatet den store differansen i forbruk av energi til romoppvarming som ble vist i Figur 7.4.

Årsaken til at oppvarmingsbildet blir såpass ulikt i de tre sonene skyldes forskjeller i både termisk treghet og varmetap gjennom vinduer. Varmetapene gjennom vinduer kan på samme måte som for varmetilskuddene leses direkte av diagrammene (lyseblåe felt). Det fremgår at disse er betydelig større i Rom 16 enn i A202 og B104, men tatt i betraktning at det samlede vindusarealet i denne sonen er om lag dobbelt så stort som i de to andre er ikke dette spesielt bemerkelsesverdig.

Når det gjelder bygningsdelenes termiske treghet er det ikke mulig å lese denne direkte av de dynamiske varmebalansene. Det er imidlertid mulig å studere tregheten indirekte ved å betrakte varmestrømmene til og fra den termiske massen i de respektive bygningskonstruksjonene (turkisfargede felt). En slik betraktning viser tydelig at disse varmestrømmene (nesten) uten unntak utgjør et negativt bidrag til varmebalansen. At det er negativt innebærer at varmeenergi overføres fra rommet til den termiske massen som et resultat av at den termiske massen har lavere temperatur enn romluften.

For Rom 16 og A202 viser varmebalansediagrammene at varmeoverføringen går denne veien gjennom hele simuleringsintervallet. Dette skyldes at den stabilt lave utetemperaturen forårsaker en kontinuerlig kjøleeffekt på ytterveggene i disse sonene som er stor nok til at en kuldefront forplanter seg gjennom veggen og kjøler ned de innvendige veggflatene slik at de konstant blir kjøligere enn romluften. Nettopp det at kjøleeffekten når inn gjennom veggen og påvirker den innvendige overflatetemperaturen viser at bygningskonstruksjonene til disse sonene har en termisk treghet som er for lav til at veggene blir i stand til å motvirke langvarige perioder med lave temperaturer. I slike perioder er varmesystemet nødt til å kompensere for denne ekstra kjøleeffekten og dette er en av årsakene til at disse to sonene har større varmebehov enn B104.

For sone B104 som tilhører bygningsdelen med størst tidskonstant er imidlertid situasjonen en annen. Her viser varmebalansediagrammet at den termiske tregheten til bygningskonstruksjonen er stor nok til at den utvendige kjøleeffekten ikke rekker å forplante seg gjennom konstruksjonen og kjøle ned overflaten som er i kontakt med inneluften. Dette fører til at det ikke blir noen temperaturdifferanse til å drive varmeoverføringsprosessen mellom romluften og konstruksjonen, noe som er grunnen til at den termiske massen ikke har noe bidrag til varmebalansen i periodene der varmesystemet er den eneste varmekilden. Varmebehovet til B104 i disse periodene er derfor kun et resultat av kompensering for

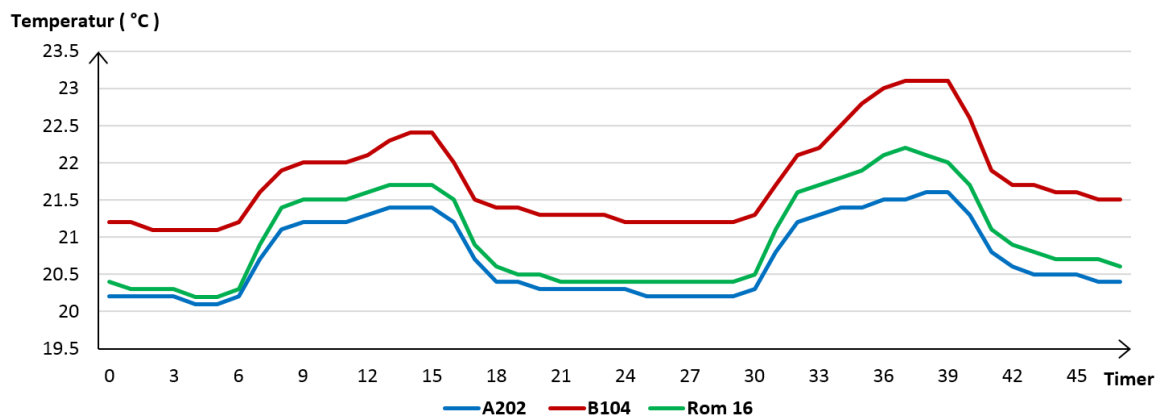
varmetap gjennom vinduene og varmetap knyttet til kuldebroer (lilla felt). Dette resultatet viser dermed at stor termisk treghet i en bygningskonstruksjon bidrar til å redusere behovet for oppvarming i langvarige perioder med lave utetemperaturer.

I tillegg til at den termiske massens treghet bidrar til å redusere varmebehovet til B104 er også en av de andre fordelene ved termisk masse synlig i varmebalansediagrammet til denne sonen. På dagtid, når det er store interne varmetilskudd, fremgår det at den tar til seg og dermed fjerner deler av overskuddsvarmen som tilføres i disse periodene. Det fremgår også at deler av denne varmen lagres og avgis tilbake til sonen i de første timene etter at aktiviteten i sonen avsluttes. Den termiske massen i B104 er dermed naturlig med på å flytte overskuddsvarme fra en periode slik at den kan utnyttes til å dekke deler av varmebehovet i en annen periode. Dette viser at bygningsdel B har termiske egenskaper som gjør det mulig å foreta bevisst forskyvning av varmebehovet.

Som nevnt tidligere er det imidlertid tydelig at varmetilskuddet fra personer, utstyr og belysning er tilstrekkelig til å dekke så godt som hele varmebehovet til B104 i oppholdstiden. På grunn av dette bidrar ikke varmebehovet i denne sonen til å øke effektuttaket fra fjernvarmenettet i periodene hvor det forventes å være effekttopper og hensikten med å foreta lastforskyvning blir følgelig borte. I bygningsdel A og C er det på den annen side store varmebehov i periodene med effekttopper i fjernvarmenettet og her er det derfor fremdeles hensiktsmessig å simulere hvorvidt det er mulig å foreta lastforskyvning.

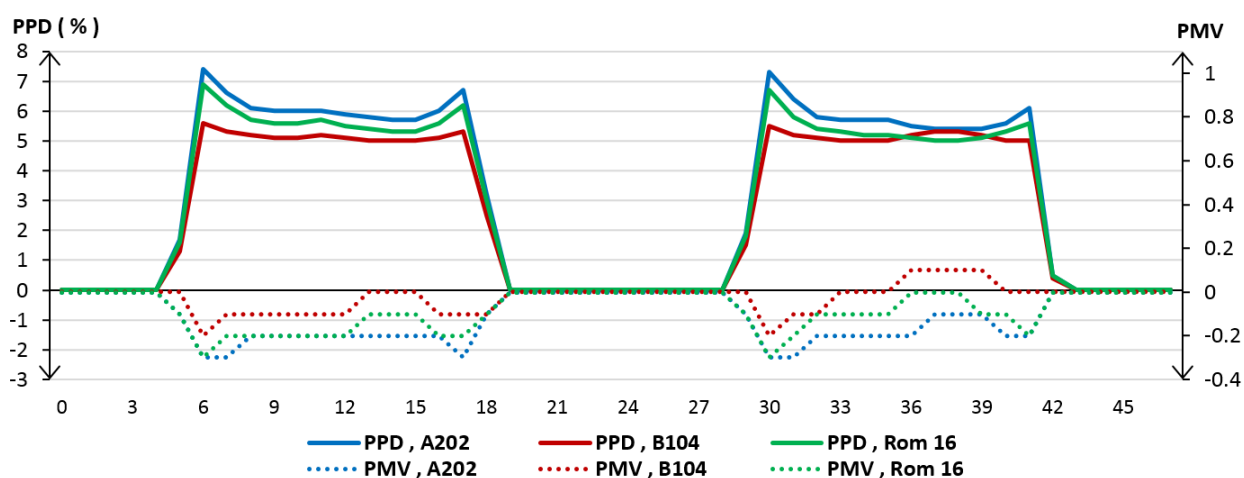
7.2.2 Romtemperatur og komfortbedømming

Simuleringsresultatene for vinterdagssimuleringen inneholder også data som kan benyttes til å studere inneklimatestanden og den resulterende komfortopplevelsen i de tre sonene. Som beskrevet tidligere er den operative temperaturen i en sone et godt mål på det opplevde inneklimate og som vist i linjediagrammene nedenfor er det en klar sammenheng mellom disse temperaturforløpene og komfortindikatorene PPD og PMV.



Figur 7.6: Temperaturforløp for den operative temperaturen i hver enkelt sone.

Figur 7.6 viser tydelig at den operative temperaturen i sonene følger samme profil som de dynamiske varmebalansene. På dagtid fører de interne varmetilskuddene til at temperaturen øker, men om nettene når det kun er varmesystemet som regulerer temperaturen forblir den mer stabil. Denne dynamikken resulterer i at den operative sonetemperaturer varierer mellom $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i B104 og mellom $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ i A202 og Rom 16. Det må imidlertid anses som unødvendig at det tilføres varme for å opprettholde komfortable temperaturer om natten når det ikke er personer til stede i bygningen. Dersom det i stedet tillates at varmetilførselen reduseres om kvelden/natten vil bygningen også kunne redusere energibruken til oppvarming. For at dette skal lønne seg sett fra et energibruksperspektiv må det imidlertid forutsettes at bygningen avkjøles såpass tregt at varmesystemet ikke er nødt til å tilføre unormalt stor varmeeffekt for å heve temperaturen tilbake til settpunktet neste morgen. Den beregnede tidskonstanten til bygningsdel B samt betraktningene om termisk treghet som ble diskutert i forrige kapittel viser at varmetilførselen til B104 er egnet for slik regulering (nattsenkning). I bygningsdel A og C er det på grunn av de kontinuerlig store varmebehovene usikkert hvorvidt et temperaturfall kan tillates. Dette skyldes at et temperaturfall om natten vil resultere i enda større effektbehov om morgenen enn det som allerede er tilfelle, noe varmesystemet ikke er dimensjonert for å takle. Dette er imidlertid bare tilfelle i ekstra kalde perioder slik som i dette simuleringsintervallet.



Figur 7.7: Komfortopplevelsen i vinterdagssimuleringene illustrert med dynamiske verdier for PPD og PMV.

En enkel analyse av komfortindeksene PPD og PMV viser at temperaturvariasjonene som ble illustrert over er såpass moderate at de ikke påvirker komfortopplevelsen i nevneverdig grad. Dette fremgår av Figur 7.7 som viser at det ventede antall misfornøyde er omtrentlig det samme gjennom hele oppholdstiden. En misfornøyd andel som på det høyeste utgjør 7,5 % er godt innenfor rammene til hva som er akseptabel og dette resultatet viser dermed at inneklimate til Storhamar skole er av god kvalitet om vinteren.

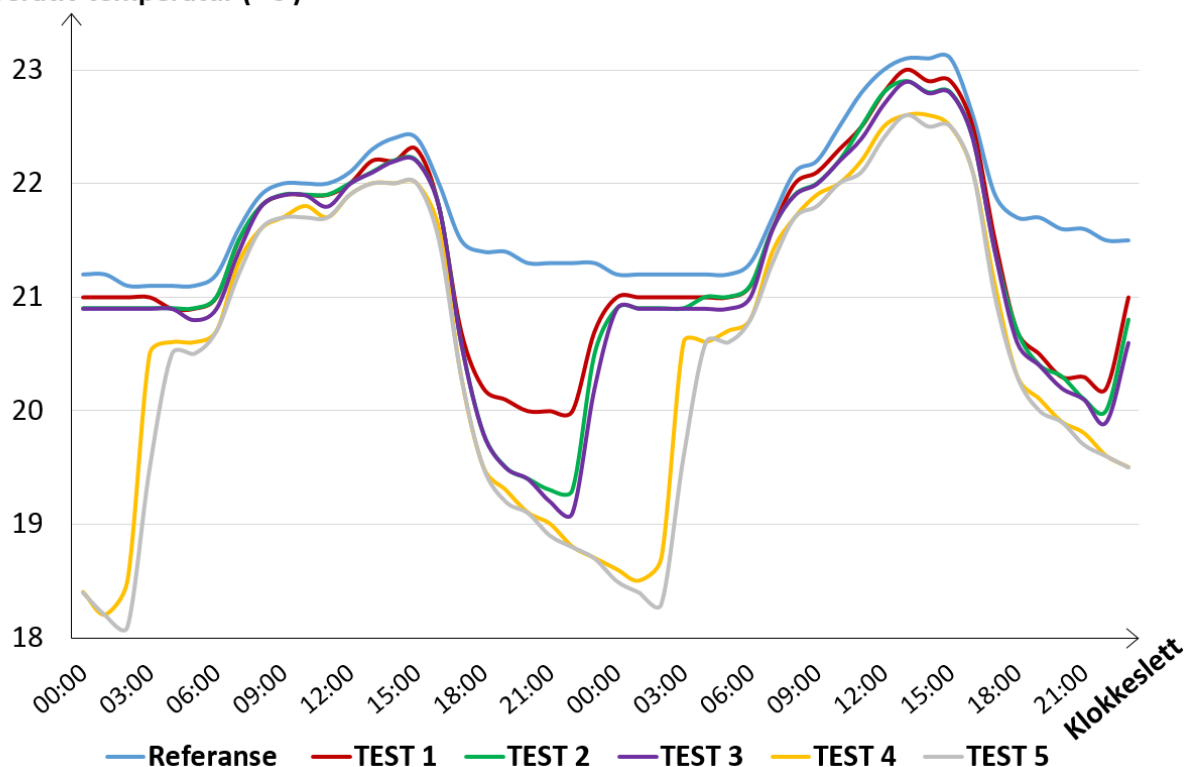
7.3 Nattsenking i B104

Siden resultatene fra referansesimuleringen viser at forskyvning av varmebehovet til B104 ikke vil bidra til å redusere effektuttaket fra fjernvarmenettet, har det ingen hensikt å simulere lastforskyvning for denne sonen. Resultatanalysen foretatt over viser imidlertid at det meste av romoppvarmingen som tilføres B104 går til å opprettholde innnetemperaturen over natten, noe som må anses som unødvendig bruk av energi. For B104 har det derfor blitt foretatt simuleringer av nattsenking for å undersøke muligheten for å redusere det unødvendige forbruket.

7.3.1 Temperaturer

Effekten på den operative romtemperaturen når settpunkttemperaturen reduseres om natten er illustrert i Figur 7.8. Det fremgår at samtlige av de testede settpunktforløpene gir innnetemperaturer som jevnt over er både lavere og mer variable enn temperaturen i referansesimuleringen (blå linje). I perioden når det er mennesker til stede i sonen (oppholdstiden er kl. 07:00-17:00) er imidlertid differansen mellom referanseverdien og testverdiene aldri større enn om lag $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette resultatet viser at samtlige av nattsenkingstestene kun har moderat innvirkning på temperaturen i oppholdstiden.

Operativ temperatur (°C)



Figur 7.8: Operative temperaturforløp i B104 forårsaket av de ulike settpunktforløpene benyttet til simulering av nattsenking.

Det fremgår dog at den operative temperaturen i testsimuleringene avviker kraftig fra

referansesimuleringen i perioden umiddelbart etter at aktiviteten i sonen opphører. Dette er en naturlig følge av at settpunktet for romoppvarming reduseres kl. 16:00 i alle testsimuleringene. Det reduserte settpunktet fører til at varmesystemet slår av varmetilførselen slik at sonen avkjøles. Når temperaturfallet har pågått så lenge at romlufttemperaturen er lik det nye settpunktet slås varmesystemet på igjen slik at denne temperaturen opprettholdes i perioden frem til det originale settpunktet igjen blir gjeldende. Forløpene i temperaturdiagrammet viser at reduksjonen og varigheten av de endrede settpunktene påvirker romtemperaturen i ulik grad.

Ved simulering av settpunktforløpet *"TEST 1"* justeres settpunktverdien ned til $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ kl. 16. Den røde linjen i figuren viser at dette umiddelbart fører til en hurtig temperaturendring i sonen fordi varmesystemet kutter varmetilførselen. Etter omtrent 3 timer begynner det imidlertid igjen å tilføre en liten varmeeffekt for å hindre at temperaturen faller under settpunktet. Rundt kl. 23 endres settpunktet for romoppvarming tilbake og som figuren illustrerer tilfører varmesystemet da en større effekt slik at temperaturen raskt heves opp igjen til det komfortable nivået. Settpunktet på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ oppnås allerede etter rundt én time, noe som innebærer at sonen oppnår komforttemperaturen hele sju timer før det er nødvendig. Dette viser med andre ord at *"TEST 1"* ikke gir en optimal reduksjon i energibruk.

Simuleringene av settpunktforløpene *"TEST 2"* og *"TEST 3"* er foretatt for å undersøke effekten som oppnås ved å redusere settpunktverdien ytterligere. I disse forløpene benyttes derfor et settpunkt for nattsenking på henholdsvis $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Som de resulterende temperaturforløpene viser (grønn og lilla linje) fører dette til at temperaturfallet i begynnelsen av nattsenkingsintervallet blir enda større, men at varmesystemet likevel har kapasitet nok til å heve temperaturen opp igjen til $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av en times tid.

Til sist er formålet med simulering av *"TEST 4"* og *"TEST 5"* å undersøke effekten som oppnås ved å forlenge perioden med redusert settpunkt på $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. I disse to simuleringene reduseres settpunktet som før kl. 16, men det forblir på dette nivået i 10,5 timer, altså helt til kl. 02.30. De resulterende temperaturforløpene (gul og grå linje) viser at avkjølingsprosessen som et resultat av dette får foregå over en lengre periode slik at den operative temperaturen mot slutten har sunket nesten ned til $18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

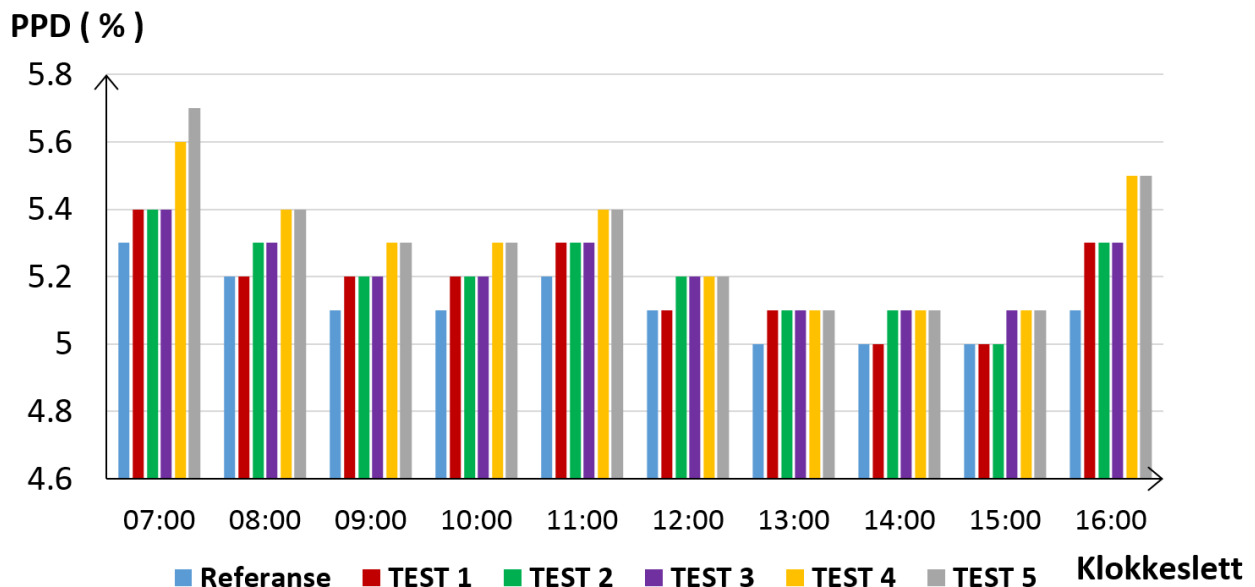
Fra tidspunktet der settpunktet justeres opp igjen til normalen er settpunktforløpene *"TEST 4"* og *"TEST 5"* forskjellige. I førstnevnte endres settpunktverdien fra 16 til $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av 30 minutter slik som i de andre simuleringstestene, men i *"TEST 5"* foregår endringen over en periode på 1 time og 30 minutter. Formålet med dette er å redusere effektbehovet til oppvarming ved at varmemengden som behøves for å heve temperaturen kan leveres over lengre tid. Dette er gunstig for driften av varmesystemet, men som linjediagrammet i temperaturfiguren viser fører det til at temperaturøkningen i sonen tar

noe lengre tid. Denne tidsforskjellen er imidlertid ikke av betydning siden den operative temperaturen fremdeles når den ønskede settpunktverdien innen sonen tas i bruk om morgenen.

7.3.2 Komfortpåvirkning

Som bemerket i forrige kapittel er det ikke betydelig differanse mellom temperaturforløpene i testsimuleringene og referansesimuleringen i løpet av oppholdstiden. Testsimuleringen med det mest avvikende forløpet er "TEST 5" og her er det i perioden 07–17 aldri en differanse på mer enn $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette er å betrakte som en moderat temperaturforskjell og i henhold til teorien i kapittel 2 vil den derfor ikke påvirke komfortopplevelsen i B104.

Simuleringsresultatene i Figur 7.9 bekrefter denne påstanden ved å illustrere at den maksimale differansen i PPD-verdi som oppstår mellom referansesimuleringen og "TEST 5" er på 0,4 %.

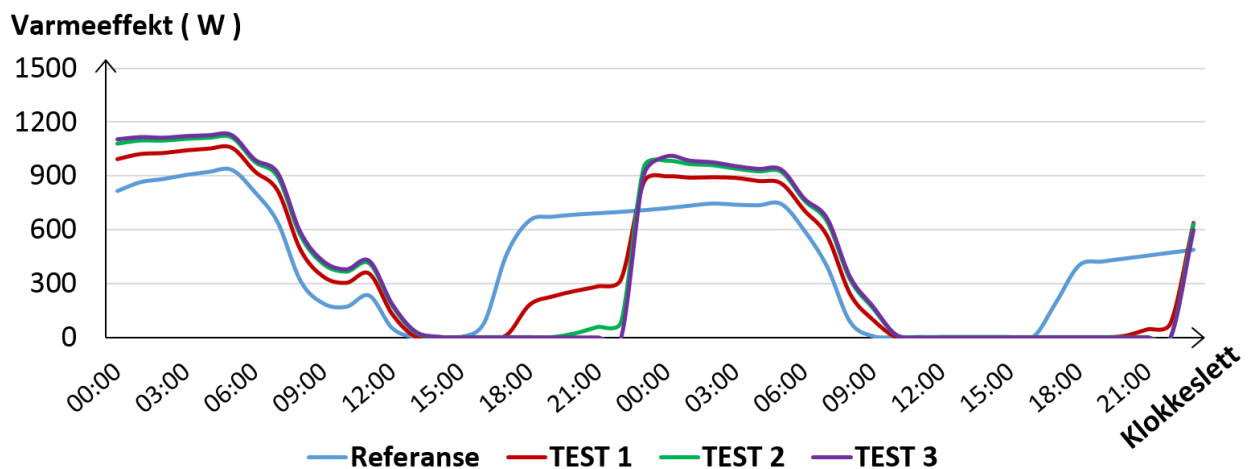


Figur 7.9: Resultater som viser hvordan komfortopplevelsen i testsimuleringene er i forhold til referansesimuleringen. Merk at stolpediagrammet kun illustrerer PPD-verdiene for det første simuleringsdøgnet. Inneklimaet oppleves imidlertid som omtrentlik like komfortabelt gjennom hele simuleringsintervallet og dette første døgnet kan derfor anses som representativt for hele perioden.

En slik differanse i PPD-verdi er å betrakte som ubetydelig og inneklimaet er derfor av mer eller mindre like god kvalitet i alle simuleringene. Dette resultatet er imidlertid ikke spesielt overraskende tatt i betraktning at nattsenkingen i simuleringstestene er foretatt på en slik måte at den ikke påvirker romtemperaturen i oppholdstiden. Så lenge nattsenkingsstrategier utføres med dette som forutsetning vil det altså ikke ha innvirkning på inneklimakvaliteten.

7.3.3 Resulterende effektbehov og varmeleveranse

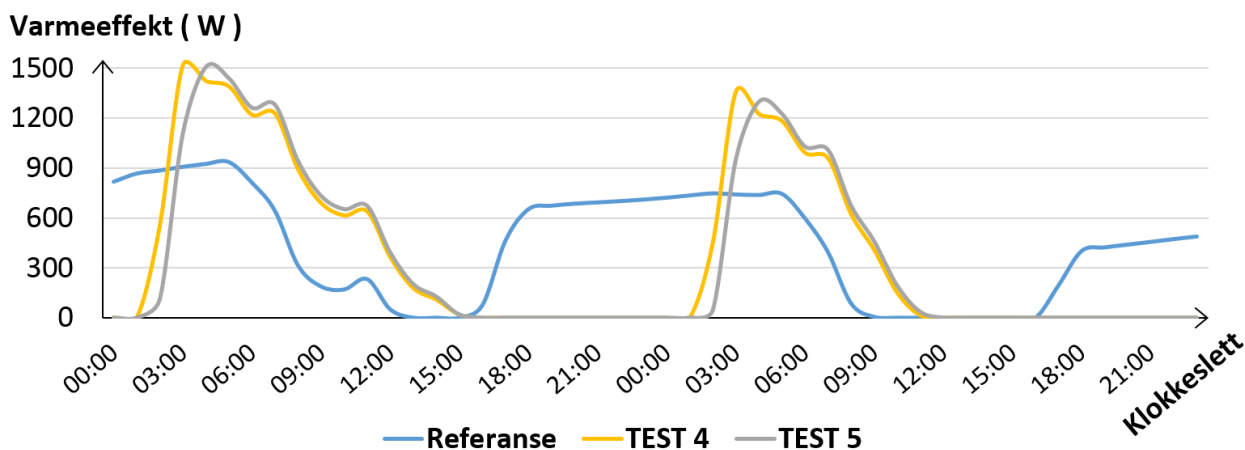
Ved nattsenking reguleres romoppvarmingen i sonen etter en variabel settpunkttemperatur og dette har naturligvis innvirkning på driften av varmesystemet. Når settpunktet for oppvarming justeres ned kan varmesystemet slås av mens sonen kjøles ned og dessuten kreves det mindre effekt for å opprettholde en lavere temperatur. Når settpunktet senere justeres opp igjen kreves det imidlertid en større effekt enn normalt siden temperaturen nå ikke bare skal opprettholdes, men heves opp til et høyere nivå. Figurene 6.7 og 6.8 illustrerer hvordan reguleringen av varmetilførselen i nattsenkingstestene har påvirket effektbehovet for romoppvarming i B104.



Figur 7.10: Fremstilling av levert varmeeffekt til romoppvarming for TEST 1, TEST 2 og TEST 3 i forhold til referansesimuleringen.

Effektkurvene for romoppvarming i alle de tre første testsimuleringene viser tydelig at nattsenkingsstrategien fører til en økning i effektbehovet i perioden mellom kl. 00:00 og 10:00, men at det i tillegg også fører til at varmetilførselen kan reduseres betydelig eller slås fullstendig av i perioden mellom kl. 16:00 og 23:00. Det fremgår at varmetilførselen er slått av i en kortere periode i "TEST 1" enn i de to andre. Årsaken til dette er at avkjølingen av sonen skjer hurtig rett etter at varmesystemet slås av og det tar derfor ikke lang tid før romtemperaturen har falt ned mot $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ (settpunktverdien i denne simuleringen) slik at varmetilførselen må gjenopptas.

Når settpunktet justeres ytterligere ned slik som i "TEST 2" og "TEST 3" fremgår det imidlertid at det (nesten) ikke er behov for varmetilførsel så lenge settpunktet er endret, noe som skyldes at avkjølingsprosessen treges ned etter hvert slik at det tar lengre tid å nå de lave settpunkttemperaturene i disse simuleringene (henholdsvis $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $16\text{ }^{\circ}\text{C}$). Effektkurvene illustrerer dog tydelig at med økende temperaturfall så kreves det også større tilført varmeeffekt for å heve temperaturen tilbake til originalsettpunktet når dette igjen blir gjeldende.



Figur 7.11: Fremstilling av levert varmeeffekt til romoppvarming for TEST 4 og TEST 5 i forhold til referansesimuleringen.

Økningen i effektbehov som følge av nattsenking fremgår enda tydeligere av resultatene fra simuleringene av settpunktforløpene "TEST 4" og "TEST 5". Som vist tidligere er her settpunktet nedjustert i en lengre periode slik at avkjølingsprosessen rekke å bringe temperaturen helt ned til 18 °C før det justeres opp igjen. Som resultat av dette er det ikke bare betydelig økte behov for varmeeffekt som vist i Tabell 7.1, men disse økte behovene inntreffer også samtidig som "morgentoppene" i fjernvarmenettet. Det er nettopp disse toppene som er forsøkt redusert ved å forskyve varmebehovene til sone A202 og Rom 16 og det er derfor lite hensiktsmessig å foreta nattsenking i B104 som bidrar til å øke dem.

Når det gjelder effekten nattsenking har på energibruken i B104 kan dette analyseres ved å beregne arealet av området under de ulike effektkurvene. Som vist i Tabellen under er alle forsøkene på nattsenking vellykket i den forstand at det er oppnådd en reduksjon i energibruk uten at det har påvirket komfortopplevelsen i sonen.

Oppvarming i B104	Referanse	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Energibruk i perioden (kWh)	20.761	19.427	19.811	19.955	18.2	17.4
Endring i perioden	-	-6.43 %	-4.57 %	-3.88 %	-12.35 %	-16.37 %
Maks effekt (W)	934.8	1057.9	1115.7	1128.7	1516.6	1506.8
Endring i maks effekt	-	13.17 %	19.35 %	20.74 %	62.24 %	61.19 %

Tabell 7.1: Oversikt over oppnådd reduksjon i energibruk og økning i maksimalt effektbehov som resultat av de forskjellige nattsenkingstestene.

Det må imidlertid bemerkes at reduksjonen i energibruk må sees i sammenheng med resultatene fra helårssimuleringen som ble fremstilt i Figur 7.4 som viser at dreier seg om svært moderate energimengder. Behovet for romoppvarming i B104 er lavt fordi termisk treghet tillater god utnytting av interne varmetilskudd og selv store reduksjonsprosenten som de som ble oppnådd gjennom "TEST 4" og "TEST 5" vil derfor kun føre til en

moderat reduksjon i forbruket av energi. I tillegg må det tas i betraktning at utetemperaturen er lavere enn normalt gjennom hele vinterdagsintervallet som er simulert her og varmebehovet er derfor større i denne perioden enn det det gjennomsnittlig er i resten av fyringssesongen. I perioder med høyere utetemperaturer vil derfor reduksjonspotensialet ved nattsinking være lavere og reduksjonsprosentene som er oppnådd her er derfor å betrakte som en øvre grense for hva som er mulig å oppnå.

At det dreier seg om moderate energimengder bekreftes med resultatene fra en enkel helårssimulering av bygningen der settpunktet for varmetilførselen til B104 reguleres i henhold til "TEST 5". Tabell 7.2 viser at energibruken til romoppvarming er redusert med nesten 14 % i B104, men at dette bare utgjør i underkant av 1 % besparelse når de tre simulerte sonene sees under ett.

Energi til romvarme (kWh/m ²)	B104	Totalt
Referanse	24.4	95.8
Test 5	21.0	94.9
Endring i prosent	-13.91 %	-0.94 %

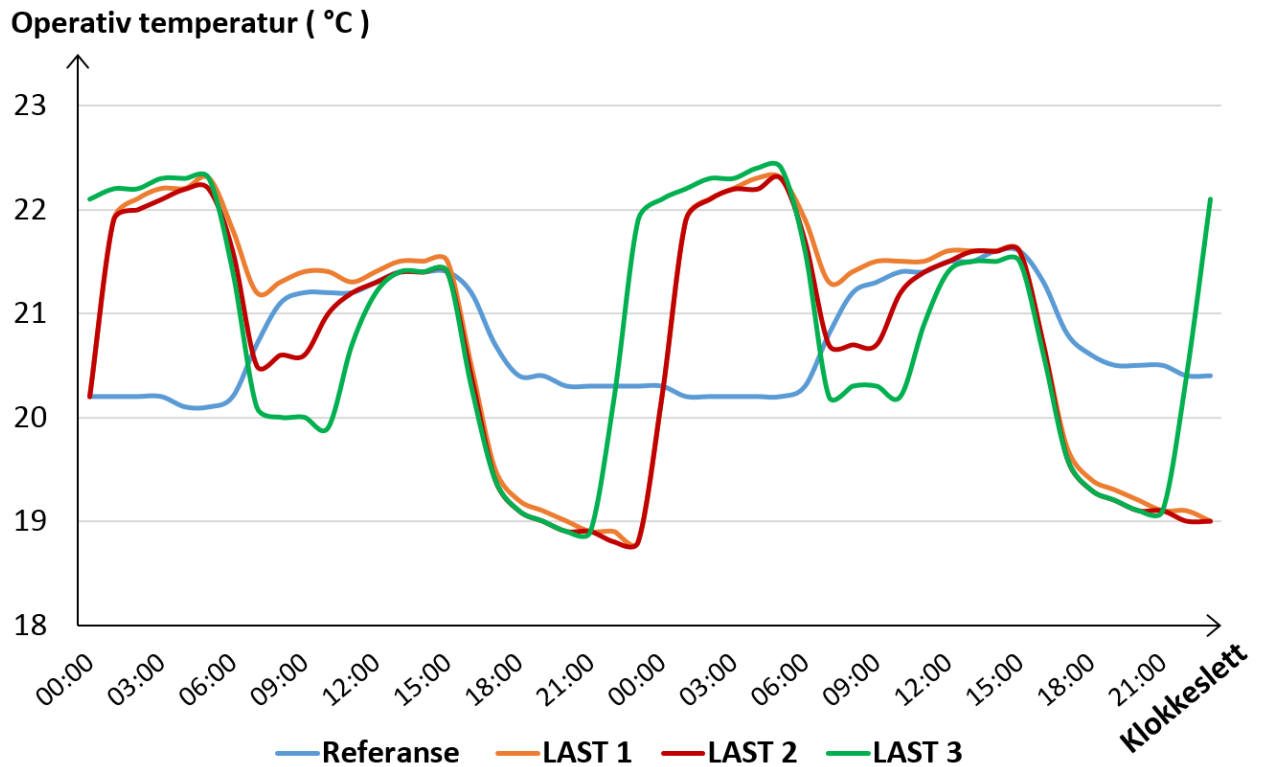
Tabell 7.2: Sammenligning av resultater fra helårssimulering av referansemodellen og helårssimulering der varmetilførselen til B104 styres av "TEST 5".

7.4 Lastforskyvning i A202 og Rom 16

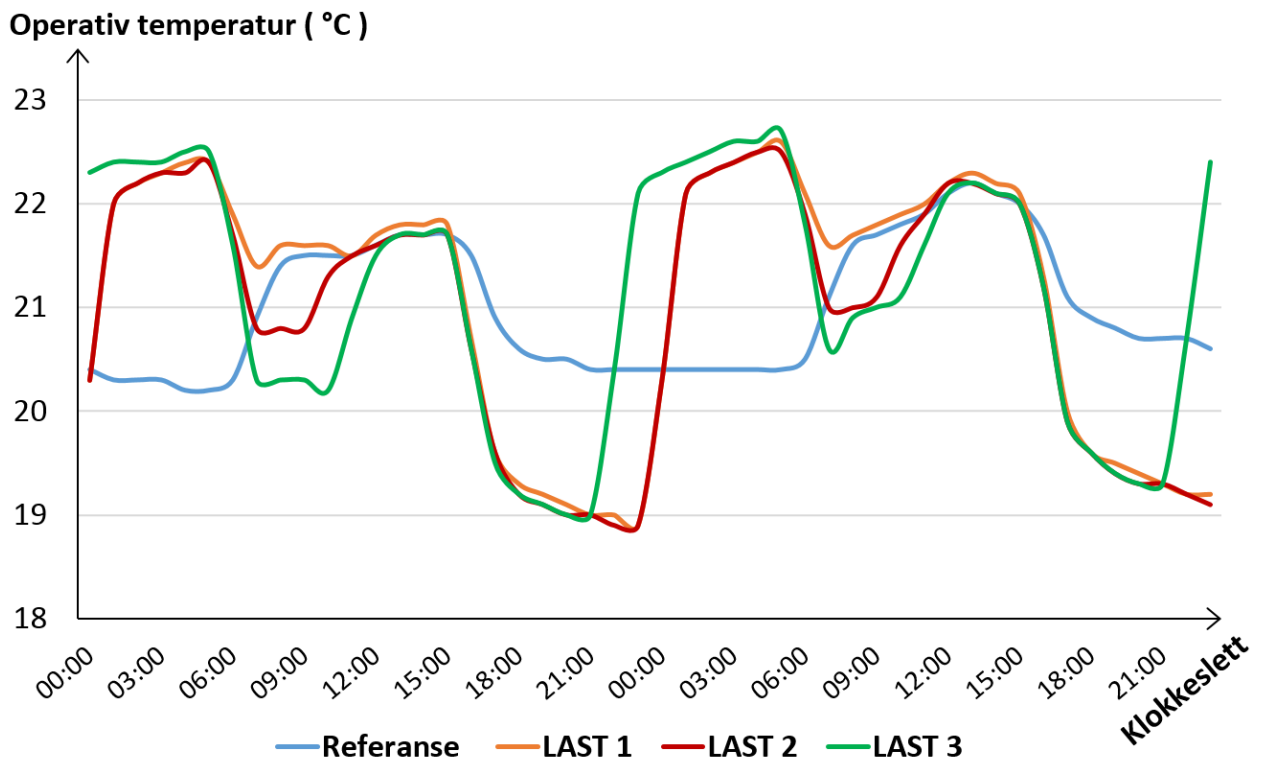
Resultatene fra vinterdagssimuleringen av referansemodellen viser at sonene i bygningsdel A og C har store varmebehov gjennom hele døgnet når utetemperaturen er lav. Dette inkluderer også perioden 06:00-10:00 på morgenen som er den perioden der de største effekttoppene i systemlasten til fjernvarmesystemet oppstår. Med bakgrunn i dette ble det derfor ansett som hensiktsmessig å simulere lastforskyvning i sonene A202 og Rom 16 for å undersøke hvorvidt det er mulig å forskyve varmebehovet deres uten at det påvirker inneklimatekvaliteten.

7.4.1 Temperaturer

For å simulere lastforskyvning er det i de ulike simuleringstestene anvendt variable settpunktverdier for romoppvarming. Formålet med en slik regulering er å fremtvinge temperatursvingninger i romluften slik at varme kan overføres mellom luften og den termiske massen i sonen. Effekten dette har på den operative romtemperaturen i A202 og Rom 16 er illustrert med linjediagram i Figurene 7.12 og 7.13 på neste side. For å illustrere at de fremtvungne temperatursvingningene er mye større enn temperatursvingninger som oppstår naturlig er temperaturforløpene fra referansesimuleringen tegnet inn i diagrammet. Svingningene i disse kurvene skyldes kun interne varmetilskudd og de blir derfor moderate i forhold til de fremtvungne svingningene i testsimuleringene.



Figur 7.12: Sammenligning av simuleringsresultater for operativ temperatur i A202.



Figur 7.13: Sammenligning av simuleringsresultater for operativ temperatur i Rom 16.

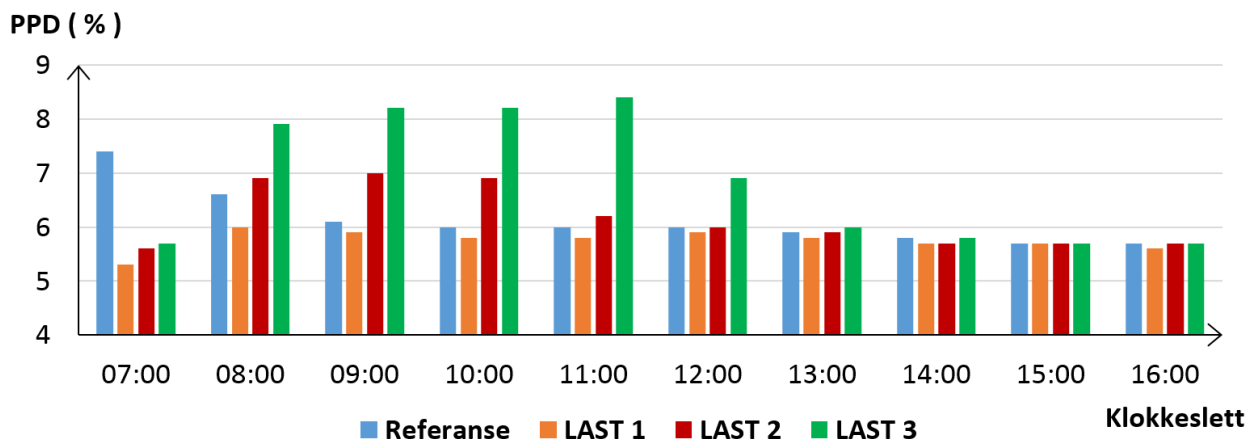
Ved å betrakte figurene fremgår det umiddelbart at de to sonene har svært like temperaturprofiler. Den eneste markante forskjellen inntreffer i det andre døgnet rundt kl. 10:00 og denne skyldes et varmetilskudd fra solinnstråling (se gult felt i Figur 7.5) som bidrar til å heve temperaturen i Rom 16, men ikke i A202. Dette skyldes at førstnevnte har et stort sydvendt vindusareal, mens A202 kun har vinduer på den nordvendte fasaden og dermed ikke får med seg morgensolen. Det må imidlertid bemerkes at selv om temperaturprofilene i de to sonene er like, så er temperaturen jevnt over noe høyere i C-sonen enn i A-sonen. Temperaturdifferansen mellom sonene er mest fremtredende i oppholdstiden noe som tyder på at det er forskjellen i interne varmetilskudd, spesielt fra personer, som er årsaken til differansen (se grønne felt i Figur 7.5).

Videre fremgår det av diagrammene at settpunktforløpene "LAST 2" og "LAST 3" resulterer i at den operative temperaturen faller under $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ i oppholdstiden, men at dette ikke er tilfelle for "LAST 1". Dette resultatet var imidlertid forventet, men det var også antatt at de forskjellige bygningskonstruksjonene og den tilhørende differansen i termisk treghet skulle gjøre seg synlig ved at temperaturen skulle falle tregere i A202 enn i Rom 16. Siden temperaturen tilsynelatende faller like hurtig i begge sonene er det naturlig å anta at det ikke er oppnådd god nok termisk kobling mellom romluften og den termiske massen i sonene, slik at det termiske lagringspotensialet ikke blir utnyttet optimalt.

7.4.2 Komfortpåvirkning

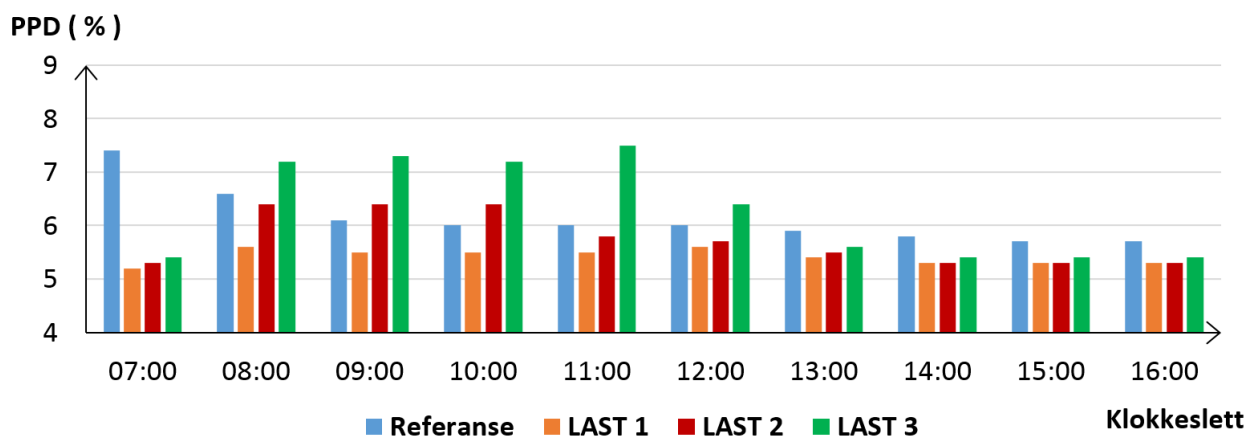
Når det kommer til hvordan de forskjellige temperaturkurvene påvirker komfortopplevelsen i de to sonene kan dette undersøkes ved å analysere de beregnede PPD-verdiene. Disse er fremstilt i stolpediagrammene i Figur 7.14 og 7.15 på neste side. Som ved simulering av nattsinking i B104 er det også i lastforskyvningssimuleringene liten forskjell i komfortopplevelse mellom de to døgnene i simuleringsintervallet og det er derfor kun PPD-verdien for det første døgnet som analyseres.

I referansesimuleringen er det størst misnøye med inneklimate på begynnelsen av dagen. Dette skyldes at den operative temperaturen er lavere enn lufttemperaturen etter at bygningen har stått tom hele natten. I testsimuleringene er imidlertid settpunktet nettopp justert ned på dette tidspunktet og den operative temperaturen er derfor høyere i disse enn det den er i referansesimuleringen, noe som resulterer i en bedre komfortopplevelse. I simuleringene av "LAST 2" og "LAST 3" øker dog andelen misfornøyde i takt med at den operative temperaturen fortsetter å falle. Som figurene viser fører settpunktet på $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ i "LAST 3" til at komfortopplevelsen i sonene blir dårligere enn i referansesimuleringen i fem sammenhengende timer. Verst er situasjonen i A202 der den ventede andelen misfornøyde er på rundt 8 % i fire av disse timene. Selv om en så høy andel ikke er optimalt er den likevel akseptabel siden et inneklimate ikke betraktes som utilfredsstillende dårlig med mindre den ventede andelen misfornøyde er høyere enn 10 %.



Figur 7.14: PPD-verdier beregnet i IDA ICE som viser de forskjellige lastforskyvningens innvirkning på komfortopplevelsen i A202.

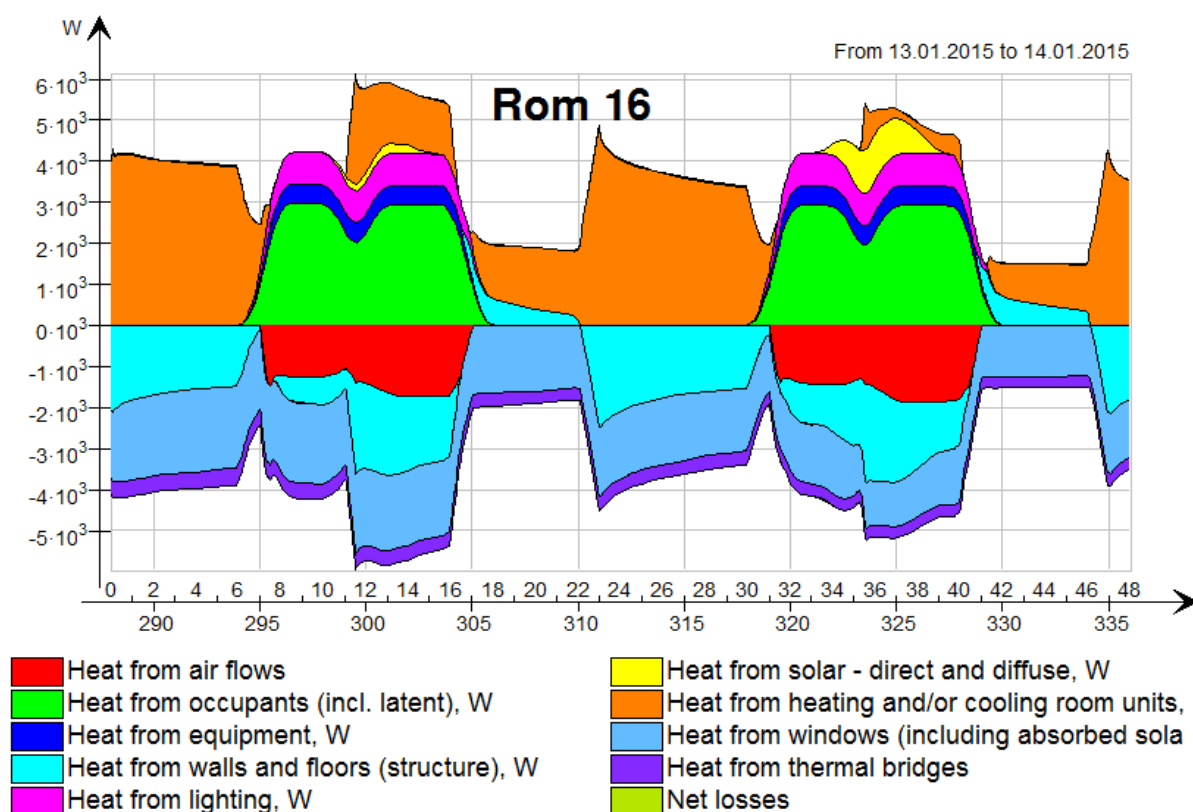
Det viktigste resultatet som fremgår av forholdet mellom stolpene i komfortdiagrammene er imidlertid ikke at "LAST 3" resulterer i stor misnøye, men at settpunktforløpene i de to andre testsimuleringene resulterer i lav misnøye. Ved å betrakte de oransje stolpene i fremgår det at "LAST 1" faktisk resulterer i en lavere andel misfornøyde (gjennom hele oppholdstiden) enn når det benyttes en konstant settpunktverdi på 21 °C slik som i referansesimuleringen. Når det gjelder "LAST 2" viser de røde stolpene at komfortopplevelsen er noe dårligere, men det er likevel ikke stor differanse mellom PPD-verdiene i denne simuleringen og de i referansen. Disse resultatene viser at det er mulig å justere varmetilførselen i henhold til disse settpunktforløpene uten at det har negativ innvirkning på inneklimatekvaliteten.



Figur 7.15: PPD-verdier beregnet i IDA ICE som viser de forskjellige lastforskyvningens innvirkning på komfortopplevelsen i Rom 16.

7.4.3 Resulterende effektbehov og varmeleveranse

For å oppnå lastforskyvning i fjernvarmenettet er det nødvendig å endre tidspunktet for når bygningene i systemet har behov for varme. For å forskyve varmebehovet, eller mer korrekt forskyve tidspunktet for når varmebehovet dekkes i en bygning må det leveres større varmeeffekt enn nødvendig i én periode og mindre enn nødvendig i en annen. I IDA ICE er dette simulert ved å variere settpunktet for romoppvarming slik at varmetilførselen automatisk reguleres deretter. Denne metodens innvirkning på effektbehovet og den dynamiske varmebalansen fremgår av Figur 7.16.



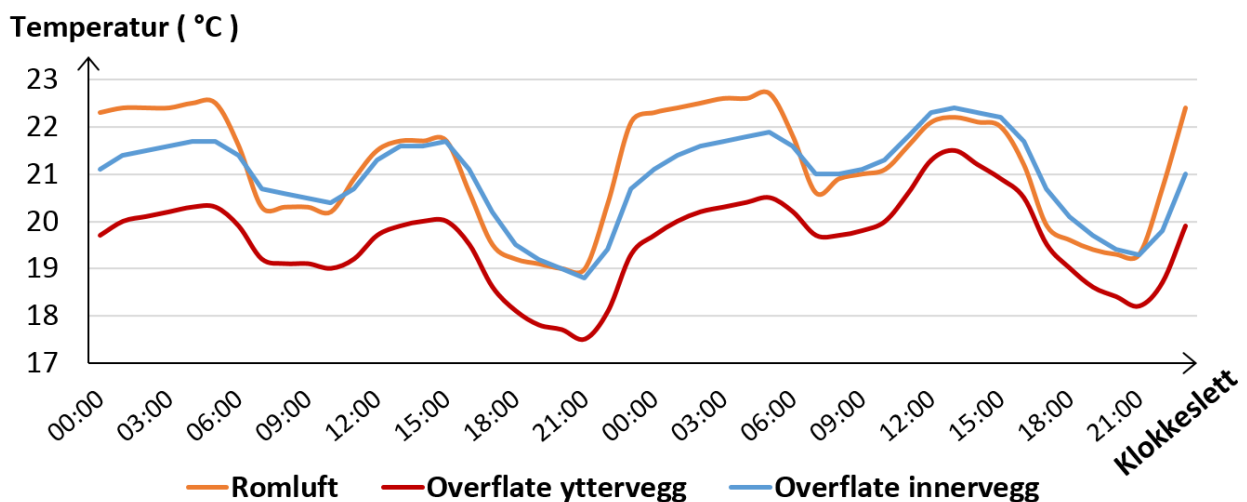
Figur 7.16: Den dynamiske varmebalansen ved simulering av "LAST 3" som er det settpunktforløpet som gir størst ladeeffekt. Varmebalansediagrammet illustrerer kun oppvarmingsbildet i Rom 16, men siden oppvarmingsbildet i A202 er tilnærmet likt anses det å gjelde for begge sonene.

Diagrammet viser at det er en direkte sammenheng mellom svingningene i romtemperatur (se kapittel 7.4.1) og variasjonen i tilført varmeeffekt (oransje felt i diagrammet). I periodene der det avgis stor varmeeffekt leveres en større mengde sensibel varme til sonen enn det som kreves for å kompensere for varmetapene. Som resultat av dette blir det et netto tilskudd av varme til sonens varmebalanse og dermed øker temperaturen fortløpende helt til det oppnås en ny balansetemperatur der det igjen er balanse mellom varmetapene og varmetilskuddene til sonen.

Når balansetemperaturen endres på denne måten oppstår det temperaturdifferanse mellom

romluften og overflatene til den termiske massen i sonen og som et resultat av dette overføres varmeenergi fra luften til massen (turkise felt i diagrammet). Varmen som overføres er sensibel slik at temperaturen i massen med tiden heves opp på samme nivå som den nye balansetemperaturen til luften. Sett fra et TEL-perspektiv innebærer denne økningen i temperatur at energilageret -altså den termiske massen - blir ladet, og periodene hvor det tilføres stor varmeeffekt kan derfor betraktes som lade-perioder. På tilsvarende måte kan periodene med redusert eller ingen tilførsel av varme betraktes som utladings-perioder. I disse periodene faller temperaturen i sonen noe som resulterer i at varme overføres fra den termiske massen tilbake til romluften og dermed bidrar til å dekke deler av det varmebehovet som ikke dekkes av varmesystemet i disse periodene.

Varmebalansediagrammet viser imidlertid at det ikke er oppnådd noen utladingseffekt fra den termiske massen i tidsrommet mellom kl. 06:00 og 10:00 på morgenen, men at massen i stedet fortsetter å absorbere ytterligere mer varme. Dette resultatet er svært uventet tatt i betraktning at dette tidsrommet inntreffer rett etter en lengre lade-periode samt det faktum at varmesystemet er slått av slik at de interne varmekildene står for den eneste varmetilførselen i disse timene. Årsaken til at den termiske massen fortsetter å absorbere varme i stedet for å friggi den slik som forventet lar seg imidlertid forklare ved å betrakte overflatetemperaturen til ytterveggene i forhold til romtemperaturen som vist i Figur 7.17. Disse temperaturforløpene viser tydelig at ytterveggene aldri oppnår en like høy temperatur som romluften og derfor heller aldri er i en tilstand som tillater avgivelse av varme tilbake til rommet. Innerveggene har derimot tidvis temperaturer som gjør dem i stand til å avgi varme i korte perioder noe som er synlig i varmebalansediagrammet i tidsrommet mellom kl. 16:00 og 19:00.



Figur 7.17: Forholdet mellom overflatetemperaturen på veggene og romluftstemperaturen i Rom 16 ved simulering av "LAST 3".

Det at overflaten til ytterveggene ikke oppnår en høy temperatur i løpet av ladeperioden om natten kan sees på som et resultat av to faktorer. Den første faktoren er den lave

utetemperaturen. Simuleringsintervallet finner sted i en kuldeperiode og som påpekt i resultatene fra referansesimuleringen så indikerer de hurtige temperaturfallene (som det av figuren over fremgår at også inkluderer overflatetemperaturene) at den termiske tregheten til bygningskonstruksjonen er for lav til å forhindre at den utvendige kjøleeffekten når inn gjennom ytterveggene og påvirker innetemperaturene. I henhold til de beregnede tidskonstantene er den termiske tregheten i virkeligheten stor nok til å forhindre en slik gjennomtrengning og det er derfor grunn til å tro at konstruksjonen i simuleringsmodellen ikke har like mye termisk masse og/eller like god termisk kobling mot inneluften som det den har i virkeligheten.

Den andre faktoren er tidspunktet for den andre utladingsperioden –den som finner sted på ettermiddagen og kvelden. Det nedjusterte settpunktet som forårsaker denne utladingen fører til at overflatetemperaturen faller helt ned mot og forbi $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ før det justeres opp slik at ladeperioden begynner. Til tross for at det i ladeperioden oppnås en balansetemperatur for romluften på oppunder $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ så rekker ikke den termiske massen å absorbere nok varme til å oppnå den samme temperaturen. Det fremgår imidlertid av figuren at ladeperioden resulterer i en temperaturøkning på om lag $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ i veggene noe som gir grunn til å tro at dersom det ikke hadde vært for utladingsperioden på ettermiddagen/kvelden så ville veggene vært i stand til å oppnå en temperatur godt over $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av natten slik at de ville hatt varme å avgi i utladingsperioden på morgenen.

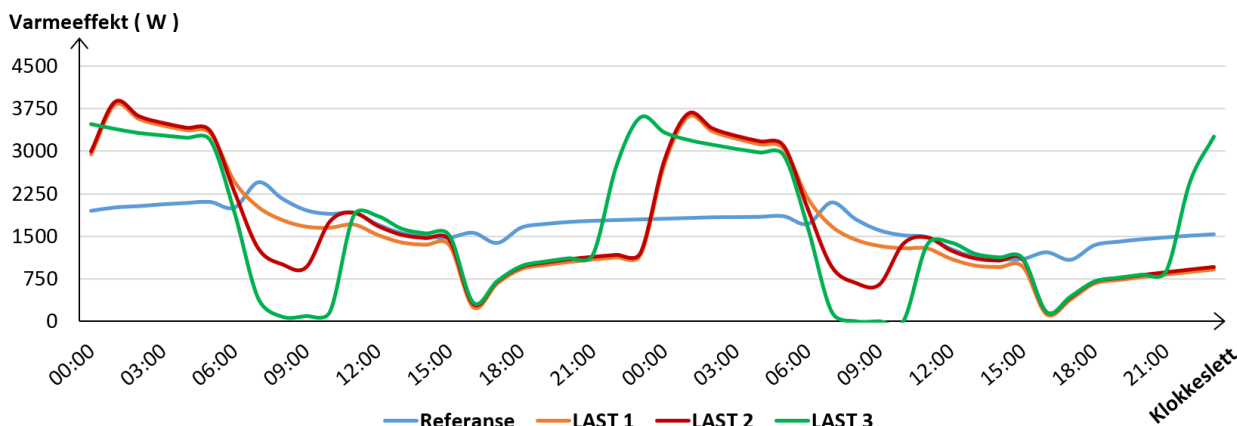
Levert varmeeffekt til A202

For å undersøke om de simulerte settpunktforløpene har bidratt til å endre tidspunktet for når varmeeffekt tas fra fjernvarmenettet er effekten som leveres til A202 i hver av testsimuleringene samt i referansesimuleringen tegnet inn i et linjediagram som vist i Figur 7.18. I tillegg er nøkkeldata fra resultatene fremstilt i Tabell 7.3 slik at endringen i både levert effekt og total bruk av varmeenergi kommer tydelig frem.

Linjediagrammet viser at uttaket av varmeeffekt i perioden 06:00-10:00 er størst i referansesimuleringen og deretter gradvis lavere i de tre testsimuleringene. Dette resultatet bekrefter at samtlige av de simulerte settpunktforløpene bidrar til å redusere systemlasten i fjernvarmenettet i den perioden ”morgentoppen” i lasten er forventet å inntreffe. Reduksjonen fører imidlertid til at det maksimale behovet for varmeeffekt øker betydelig, men siden tidspunktet for dette behovet er forskjøvet til midt på natten vil denne økningen ikke bidra til å skape effekttopper i nettet.

Resultattabellen viser at varmeregulering i henhold til settpunktforløpet ”LAST 1” fører til at det leveres i snitt 8 % lavere varmeeffekt i tidsrommet mellom kl. 06:00 og 10:00. Dette medfører dog at den totale energibruken i simuleringsintervallet øker med 1,15 %, men tatt i betraktning at PPD-verdiene viser at den gjennomsnittlige komfortopplevelsen også blir bedre enn i referansesimuleringen er den økte energibruken akseptabel.

I simuleringene der settpunktforløpene 2 og 3 er benyttet oppnås det betydelige større lastreduksjoner. "LAST 2" fører til at effektuttaket reduseres med 31 % i utladingsperioden og selv om denne "tapte" effekten kun er forskjøvet til et annet tidspunkt på døgnet fremgår det likevel at dette fører til at forbruket av varme går ned med 1,26 %. "LAST 3" gir imidlertid enda større reduksjon for som den grønne effektkurven viser så tilføres den det nesten ikke varme til A202 i tidsrommet mellom kl. 07:00 og 10:00 når oppvarmingen reguleres i henhold til dette settpunktforløpet. Dette fører til at effektuttaket i utladingsperioden her blir redusert med 75 %, altså til en fjerdedel av effektuttaket i referansesimuleringen. I tillegg blir også det totale forbruket av varme redusert med nesten 3 % noe som vil utgjøre en betydelig energimengde over et år. Som vist tidligere medfører imidlertid "LAST 3" at en høyere andel av personene i sonen blir misfornøyde med innklimaet og det er derfor tydelig at reduksjonen i energibruk går på bekostning av den termiske komforten i sonen.



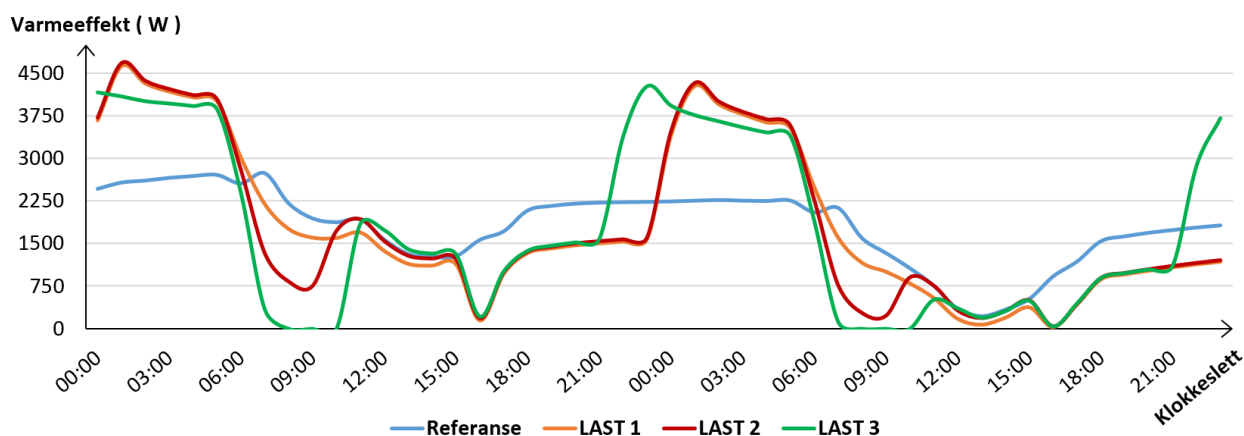
Figur 7.18: Levert varmeeffekt ved simulering av forskyvning av varmebehovet til A202.

Oppvarming i A202	Referanse	LAST 1	LAST 2	LAST 3
Energibruk i perioden (kWh)	81.3	82.2	80.2	78.8
Endring i perioden	-	1.15 %	-1.26 %	-2.98 %
Maks effekt (W)	2450	3814	3869	3602
Endring i maks effekt	-	56 %	58 %	47 %
Perioden 06:00-10:00	Referanse	LAST 1	LAST 2	LAST 3
Gj.snittlig T_{op} (°C)	20.9	21.4	20.9	20.3
Gj.snittlig PPD-verdi (%)	6.5	5.8	6.6	7.5
Gj.snittlig effektbehov (W)	2095	1917	1455	533.7
Levert varme (kWh)	10.5	9.6	7.3	2.7
Reduksjon i levert varmeeffekt	-	-8 %	-31 %	-75 %

Tabell 7.3: Lastforskyvningenes innvirkning på energibruk og effektbehov i A202.

Levert varmeeffekt til Rom 16

Resultatene for effektbehov og energibruk i Rom 16 er fremstilt i Figur 7.19 og Tabell 7.4. Som for temperatur- og komfortdiagrammene fremgår det at det også er liten forskjell mellom profilen til effektkurvene i de to sonene. Dette betyr imidlertid ikke at behovet for varmeeffekt er det samme og ved å betrakte effektdiagrammene fremgår det at det leveres høyere varmeeffekt til Rom 16 enn til A202 i alle simuleringene. Dette skyldes at luftvolumet er større i Rom 16 og at det derfor kreves større varmemengder for å opprettholde romlufttemperaturen. I testsimuleringene der det tvinges frem temperatursvingninger medfører denne forskjellen at det maksimale effektbehovet øker mer i Rom 16 enn i A202, men siden behovet nå er forskjøvet til midt på natten bidrar ikke denne økningen til å skape noen effekttopp i systemlasten i nettet. Videre fremgår det også at reduksjonen i effektuttak under utladingsperioden blir større, men at dette ikke resulterer i en tilsvarende reduksjon i forbruket av varme. Forskjellen mellom sonene er imidlertid ikke betydelig og resultattrenden er derfor den samme i Rom 16 som i A202.



Figur 7.19: Levert varmeeffekt ved simulering av forskyvning av varmebehovet til Rom 16.

Oppvarming i Rom 16	Referanse	LAST 1	LAST 2	LAST 3
Energibruk i perioden (kWh)	87.2	89.2	86.3	85.8
Endring i perioden	-	2.29 %	-0.96 %	-1.56 %
Maks effekt (W)	2742	4626	4676	4263
Endring i maks effekt	-	69 %	71 %	55 %
Perioden 06:00-10:00	Referanse	LAST 1	LAST 2	LAST 3
Gj.snittlig PPD-verdi (%)	6.1	5.5	6.1	6.8
Gj.snittlig T_{op} (°C)	21.1	21.6	21.1	20.5
Gj.snittlig effektbehov (W)	2268	2034	1486	544.1
Levert varme (kWh)	11.3	10.2	7.4	2.7
Reduksjon i levert varmeeffekt	-	-10 %	-34 %	-76 %

Tabell 7.4: Lastforskyvningenes innvirkning på energibruk og effektbehov i Rom 16.

Siden resultattrenden er den samme i Rom 16 som i A202 anses det ikke som nødvendig å forklare resultatene på nytt og det gis her derfor kun en kort oppsummering av de ulike settpunktforløpenes innvirkning på varme- og effektbehovet i Rom 16.

- **"LAST 1"** fører til at uttaket av varmeeffekt fra nettet reduseres med 10 % i tidsrommet mellom kl. 06:00 og 10:00. Dette resulterer i at ladeperioden får et maksimalt effektbehov som er 69 % høyere enn det maksimale effektbehovet i referansesimuleringen og at det totalt sett blir en økning på 2,29 % i forbruket av varme. Som i A202 oppnås det imidlertid bedre komfort enn i referansesimuleringen gjennom hele simuleringsintervallet og det økte forbruket kan derfor anses som akseptabelt.
- **"LAST 2"** fører til at uttaket av varmeeffekt fra nettet reduseres med 34 % og at det maksimale effektbehovet i ladeperioden øker med 71 %. Det totale forbruket av varme går ned med under 1 % og er dermed relativt uforandret. Antallet misfornøyde er tidvis høyere enn i referansesimuleringen, men forskjellen er så liten at det gjennomsnittlige antallet misfornøyde ikke påvirkes og endringen i komfortopplevelse kan derfor neglisjeres.
- **"LAST 3"** er det settpunktforløpet som fører til størst reduksjon i uttaket av varmeeffekt (76 %) noe som gir en reduksjon i energibruk på 1,56 %, men som som går på bekostning av komfortopplevelsen i sonen. Det er også forløpet som fører til minst økning i maksimalt effektbehov (55 %). Dette skyldes at varigheten av utladingsperioden på ettermiddagen og kvelden er kortere her enn i de andre testsimuleringene slik at temperaturfallet avbrytes på et tidligere tidspunkt. Dermed blir det mindre differanse opp til settpunkttemperaturen og varmesystemet trenger følgelig ikke å tilføre like stor effekt.

8. Diskusjon

8.1 Litteraturstudiet

Resultatene fra litteraturstudiet er i denne oppgaven fordelt og presentert i hvert sitt teorigapittel. Litteraturen som er studert og benyttet som teoretisk grunnlag omfatter vitenskapelige rapporter, masteroppgaver, doktorgradsavhandlinger og konferanseforedrag og artikler fra relevante webområder. Dette er alle pålitelige kilder til informasjon og teorien som er lagt frem i oppgaven har derfor dekning i solide referanser.

Den korte introduksjonen til termisk komfort som er gitt i kapittel 2 utgjør grunnlaget for tolkningen av simuleringsresultatene for komfortopplevelse og inneklima i Storhamar skole og artiklene og lærebøkene det refereres til i dette kapittelet var således en nyttig del av litteraturstudiet.

I kapittel 3 er det i henhold til oppgaveteksten gitt et overblikk over fjernvarmesystemer. Dette inkluderer blant annet en gjennomgang av fjernvarmesystemers oppbygning, varmeproduksjon og -distribusjon, typiske lastprofiler, reguleringsprinsipper og varmeakkumulering i nettet. Fremleggingen av teori på denne måten har bidratt til å gi god oversikt over hvordan systemlasten i fjernvarmesystemer påvirkes av varierende varmebehov hos kundene og hvordan denne variasjonen innvirker på driften av systemet.

Kapittel 4 og 5 må anses som de viktigste resultatene fra litteraturstudiet. Her er varmelagringsprosessen i bygninger undersøkt og behandlet med den hensikt å avdekke hvordan termisk treghet i bygningsmasse kan utnyttes som et varmelager for å optimalisere driften av et fjernvarmeanlegg og bidra til å minimere energibruken til dette systemet. En avdekket løsning er å foreta lastforskyvning i systemlasten i nettet ved å regulere varmetilførselen til bygningene i systemet slik at uttaket av varmeeffekt reduseres i perioder med store effektbehov og økes i perioder med lave effektbehov. Denne driftsstrategien er relevant for oppgavens mål fordi den forutsetter at den termiske massen i bygningene er tilgjengelig for midlertidig lagring av varmeenergi slik at varme tilført i en periode kan utnyttes i en annen. Siden lastforskyvning er en strategi som er fullt mulig å implementere i eksisterende bygninger, utmerket den seg også som en strategi som kunne være interessant å teste på Storhamar skole. På denne måten bidro litteraturstudiet til å identifisere et mål for simuleringsdelen av oppgaven.

I retrospekt kan det virke noe tynt at det hovedsakelig er fokusert på én metode for å redusere energibruken i fjernvarmesystemer, men tatt i betraktning at litteraturstudiet i tillegg omfatter det generelle overblikket over fjernvarme og om termisk inneklima kan disse kapitlene samlet sett anses å dekke målet for denne delen av oppgaven.

8.2 Tidskonstantberegningen

Underveis i arbeidet med litteraturstudiet ble den termiske tidskonstanten identifisert som en størrelse som beskriver den termiske tregheten til et rom eller til en hel bygning. Termisk treghet er en egenskap som er direkte avhengig av varmelagringssevnen til termisk masse og med den hensikt å få en indikasjon på hvor stor termisk lagringskapasitet som er tilgjengelig i Storhamar skole var det derfor nødvendig å beregne tidskonstantene til de forskjellige bygningsdelene. Årsaken til at dette ble ansett som nødvendig er at tidskonstantene kunne benyttes som grunnlag for å anslå mengden termisk masse i bygningen og dermed gjøre det mulig å foreta antakelser om bygningskonstruksjonen som kunne brukes som inndata i simuleringsarbeidet. Siden det ikke var mulig å oppdrive noe annen informasjon om veggkonstruksjonene i bygningen (hverken fra plantegninger eller fra simuleringsgrunnlaget i Vedlegg B) var beregning av tidskonstanter det eneste gyldige alternativet.

Beregningen som er gjennomført i denne oppgaven baserer seg på temperaturmålinger rundt om i bygningen som er foretatt i en periode der varmesystemet var slått av. Formålet med dette var å registrere hvor hurtig temperaturen falt når det ikke var noen varmekilde som kompenserte for varmetap. Figur 6.3 viste imidlertid at temperaturene tydelig ble påvirket av interne varmetilskudd og det var derfor nødvendig å konstruere en funksjon som kunne beregne hvordan avkjølingsforløpet ville vært dersom ingen varme ble tilført luften.

Den utviklede funksjonen (se Vedlegg C) tar inn det målte temperaturforløpet som argument og bruker dette som grunnlag for å beregne et idealisert temperaturfall som går eksponentielt mot en stasjonær balansetemperatur som er lik den gjennomsnittlige utetemperaturen i måleperioden. Antakelsen om eksponentielt temperaturfall er foretatt for å få idealiserte forløp som ligner på avkjølingsforløpet i Figur 4.5 hentet fra [13] og denne antakelsen er derfor ansett som gyldig. Det er derimot usikkerhet knyttet til antakelsen om at balansetemperaturen som oppnås etter lang tid er lik den gjennomsnittlige utetemperaturen og de beregnede tidskonstantene kan derfor ikke garanteres å være 100 % korrekte.

8.3 Simuleringsmodellen

8.3.1 Valget av soner og simuleringsintervall

I simuleringene av Storhamar skole i IDA ICE er det kun én sone fra hver bygningsdel som simuleres. Det er to grunner til at det er valgt å gjennomføre simuleringene på en slik forenklet måte. For det første er Storhamar skole en svært stor bygning som innebærer at det i IDA ICE ville vært nødvendig å dele den inn i flere titalls unike soner. Dette ville medført at resultatanalysen hadde blitt svært uoversiktlig og mye vanskeligere å gjennomføre. For det andre foretar IDA ICE dynamiske beregninger for både

inneklimatestilstand og energibruk i hver enkelt sone og tiden det tar å foreta en simulering øker derfor eksponentielt med antallet soner. Ved å velge kun tre soner begrenses dermed kompleksiteten i simuleringen slik at den blir mindre tidkrevende.

De tre sonene som er gjenstand for simulering (A202, B104 og Rom 16) er lokalisert i hver sin bygningsdel. Dette gjør det mulig å undersøke hvordan de ulike bygningskonstruksjonene responderer på endringer i settpunkttemperaturen og om de resulterende lade- og utladingsperiodene fører til at lagringspotensialet i den termiske massen utnyttes optimalt. For at simuleringsresultatene skal kunne generaliseres er det valgt soner som anses som representative for sin bygningsdel, både når det gjelder geometri og plassering i bygningsdelen, men også med hensyn på bruksmønster og romfunksjon. Det må imidlertid bemerkes at det store vindusarealet i sonen som representerer bygningsdel C fører til at varmetapet og det resulterende oppvarmingsbehovet som oppstår i denne sonen er større enn det som er gjennomsnittlig for bygningen.

Vinterdagsperioden som er valgt som simuleringsintervall er del av en lengre kuldeperiode med unormalt lave utetemperaturer. Hensikten med å velge denne kuldeperioden var at varmebehovet var antatt å på sitt maksimale og at en simulering derfor ville indikere det største oppnåelige reduksjonspotensialet i fjernvarmenettets systemlast.

8.3.2 Inndataene i modellen

De fleste inndataene som er benyttet i IDA ICE er hentet direkte fra enten tegningsgrunnlaget til bygningen eller fra listen med tekniske spesifikasjoner og simuleringsverdier (se Vedlegg B). Dette er i utgangspunktet pålitelige kilder og denne andelen av inndataene burde derfor være av høy kvalitet, men det er to viktige unntak. Det første unntaket gjelder mangelen på snittegninger av bygningen i tegningsgrunnlaget som har ført til at himlingshøyde, vindushøyde, takgeometri etc. måtte defineres kun på grunnlag av visuell inspeksjon av bygningen. Dette har antakelig resultert i at sonene har fått et volum som avviker fra virkeligheten noe som kan ha påvirket sonenes varmebehov. Det andre unntaket er at en stor andel av inndataene som er hentet fra Vedlegg B også kun er basert på visuelle inspeksjoner av bygningen. Verdiene dette gjelder kan derfor ikke garanteres å være korrekte i forhold til virkeligheten, men siden inspeksjonen er foretatt av kompetent personell antas det at disse verdiene ikke påvirker påliteligheten til simuleringsmodellen.

Når det gjelder hvordan bygningskonstruksjonene er definert i modellen så er disse ikke basert på egenvalgte inndata, men i stedet valgt ut fra en database med standardkonstruksjoner som er tilgjengelig gjennom IDA ICE. Det ble valgt forskjellige konstruksjoner for hver av bygningsdelene og det ble i utvelgingsprosessen lagt vekt på at den termiske tyngden til konstruksjonen skulle være i overensstemmelse med

tidskonstanten til bygningsdelen. Dermed ble bygningsdel B satt til å være en tung betongkonstruksjon, mens bygningsdelene A og C henholdsvis ble satt til å være en tung og mellomtung trekonstruksjon. Det kan imidlertid ikke forventes at konstruksjonene som er benyttet i simuleringsmodellen er identiske med de som er benyttet i virkeligheten noe som medfører at simuleringsresultatene ikke vil gjenspeile den faktiske termiske ytelsen til bygningen, men heller bare gi en indikasjon på ytelsen som kan forventes.

Til sist må det også bemerkes at det kun er ytterveggene i sonene som er implementert med forskjellig konstruksjon. Inneveggkonstruksjonen er dermed den samme i alle sonene, noe som forøvrig også stemmer dårlig overens med virkeligheten og som derfor må antas å påvirke simuleringsresultatene ytterligere.

8.4 Simuleringsresultatene

Simuleringsresultatene viser at nattsinking i B104 vil føre til en stor reduksjon i forbruket av energi i denne bygningsdelen og at det kan foretas en forskyvning av varmebehovet til A202 og Rom 16 for å oppnå lastforskyvning i systemlasten i fjernvarmenettet i perioder med effekttopper. De oppnådde reduksjonsprosentene er oppgitt i resultatkapittelet, men tatt i betraktning diskusjonen i avsnittet over må det vedgås at det kun er fortegnet og ikke tallverdien til disse prosentene som med sikkerhet kan antas å være korrekt. Selv om bygningskonstruksjonen ikke er gjengitt korrekt i simuleringsmodellen er det imidlertid ingen grunn til å tro at de valgte konstruksjonene er så forskjellige fra de virkelige at resultattrenden ville blitt en annen dersom ytterveggene hadde blitt implementert på korrekt vis. Simuleringsresultatene betraktes derfor som pålitelige i den forstand at de gir en god indikasjon på hvordan Storhamar skole vil respondere på de simulerte driftsstrategiene.

At nattsinking fører til en reduksjon i varmebehovet og at et ned-justert settpunkt fører til mindre varmetilførsel og lastreduksjon i nettet er forventede resultater. Det var imidlertid også forventet at den termiske massen skulle være mer delaktig i oppvarmingsbildet. I henhold til teorien i den studerte litteraturen burde de simulerte ladeperiodene resultert i akkumulering av så store varmemengder i den termiske massen at den ville oppnådd en høyere temperatur enn romluften og dermed blitt i stand til å frigi varme i utladingsperioden. I stedet viser resultatene at den termiske massen nesten ikke har overført noe varme tilbake til sonen i løpet av simuleringsintervallet og at varmen som er tatt opp i stedet har gått tapt til omgivelsene. Av dette kan det sluttet at de benyttede bygningskonstruksjonene har lavere termisk treghet enn det som var intensjonen og at dette er årsaken til at den ønskede lagringsfunksjonaliteten ikke er oppnådd.

At det ikke er oppnådd riktig termisk treghet bekreftes i tillegg også av to andre forhold. For det første burde det vært større forskjell mellom oppvarmingsbildet i A202 og Rom 16

enn det som er tilfelle. Siden resultatene viser at disse to sonene oppfører seg omtrent identisk er det grunn til å tro at den termiske tyngden til trekonstruksjonene som er benyttet i disse sonene er for like til at det oppnås en differanse i termisk tregghet som er i samsvar med differansen i tidskonstantverdi.

For det andre kan de hurtige temperaturfallene som har funnet sted i samtlige av simuleringene også anses som et resultat som er forårsaket av for lav termisk tregghet. Denne betraktningen innebærer at økningen i andelen misfornøyde (PPD) som forårsakes av temperaturfallene ikke er et pålitelig resultat, men kun en følge av "feilen" i referansemodellen.

8.5 Resultatene betydning for varmedistribusjonen i fjernvarmesystemer

Selv om det er usikkerhet knyttet til bygningskonstruksjonen benyttet i simuleringsmodellen fremgår det likevel av simuleringsresultatene at det er mulig å foreta lastforskyvning i fjernvarmenettet uten at dette påvirker komfortnivået til bygningene i systemet. Dette resultatet viser dermed at periodevis opp- og ned-justeringer av settpunktet for romoppvarming i bygninger kan benyttes til å redusere variasjonen i lastprofilen i fjernvarmesystemet. I teorien som er lagt frem i denne oppgaven er det vist at fordelene med en slik lastutjevning inkluderer blant annet muligheten for å distribuere varme ved lavere temperaturer noe som reduserer varmetapet til grunnen og at varmeproduksjonen i økt grad kan foregå med grunnlastkjeler noe som både er billigere og mer miljøvennlig enn varmeproduksjon i spisslastkjeler.

For å utløse disse fordelene er det imidlertid ikke tilstrekkelig at kun én bygning reduserer sitt uttak av varmeeffekt fra nettet. For at lastreduksjonen skal bli stor nok til at det oppnås en reduksjon i effekttoppene i systemlasten må driftsstrategier tilsvarende den simulert for A202 og Rom 16 styre varmetilførselen i en betydelig andel av bygningene i fjernvarmesystemet slik at de til sammen blir i stand til å kunne påvirke systemlasten. I et system der mange bygninger forskyver sine varmebehov vil det imidlertid være behov for et intelligent styringssystem som sørger for at bygningene ikke benytter sammenfallende lade- og utladings intervaller da dette kun vil forskyve effekttoppen i nettet til et annet tidspunkt på døgnet.

Dersom styringssystemet i stedet regulerer varmetilførselen i bygningene slik at ladeperiodene maksimale effektbehov inntreffer på forskjellig tidspunkt i hver bygning kan dette potensielt bidra til å redusere, eller ideelt sett å eliminere effekttoppene i systemlasten slik at varmedistribusjonen konstant kan foregå ved en lavere temperatur. Dette vil ikke bare minimere tapene i systemet og øke systemvirkningsgraden, men potensielt også bidra

til å gjøre overgangen til fjerde generasjons fjernvarme lettere. Det fremgår med andre ord at lastforskyvning er en driftsstrategi for fremtidens fjernvarmesystemer som forutsetter bruk av intelligente styringssystemer slik at fjernvarmenettet blir et smart varmenett.

9. Konklusjon

Resultatene fra litteraturstudiet i denne oppgaven viser at lastforskyvning er en driftsstrategi som kan bidra til å gjøre driften av fjernvarmesystemer mer energieffektiv. Lastforskyvning går ut på å benytte bygningsmassen i systemet som et termisk energilager for midlertid lagring av varme slik at det blir mulig å separere tidspunktet for når varme produseres i varmesentralen og når den utnyttes i bygningene. Hensikten med dette er å gi fjernvarmeleverandøren muligheten til å produsere varme mer strategisk slik at størrelsen på ”morgentoppene” i systemlasten og den resulterende bruken av spisslast varmekilder kan reduseres. Mindre effekttopper leder til en reduksjon i døgnvariasjon i systemlasten samt lavere maksimale effektbehov i nettet. Disse endringene i lastprofilen gjør det mulig å produsere varmen ved et lavere effektnivå og å senke temperaturnivåene i nettet, noe som gir økt virkningsgrad i produksjonen og lavere varmetap i distribusjonen.

Resultatene fra simuleringen av Storhamar skole viser at settpunkttemperaturen for romoppvarming kan brukes til å regulere varmetilførselen til to av bygningsdelene på en slik måte at det maksimale uttaket av varmeeffekt fra nettet forskyves fra tidsrommet mellom kl. 06:00 og kl. 10:00 til midt på natten. Et settpunkt på 24 °C over en periode på seks timer om natten gjør det mulig å redusere settpunktet til 19 °C i morgentimene uten at dette gir merkbare utslag på den termiske komforten til personene i bygningen. Med dette oppnås en gjennomsnittlig reduksjon i effektbehov på om lag 30 %. Resultatene viser i tillegg at det er mulig å oppnå en effektreduksjon på inntil 75 % ved å justere settpunktet ned til 18 °C, men at dette vil gå på bekostning av inneklimakvaliteten. På grunn av usikkerhet knyttet til om bygningskonstruksjonen benyttet i simuleringsmodellen er korrekt i forhold til virkeligheten så gir simuleringsresultatene kun en indikasjon på hvilken effekt som kan forventes når settpunktene justeres som i simuleringen. Dette innebærer at prosentverdiene over ikke kan garanteres og at de øvrige simuleringsresultatene presentert i denne oppgaven kun kan betraktes som veiledende.

Det at resultatene ikke gjenspeiler effekten som kan forventes i Storhamar skole betyr imidlertid ikke at den gjennomgående resultattrenden er feil. Reduksjonen i effektuttak som er oppnådd i simuleringene viser dermed at lastforskyvningsstrategien fungerer som forventet. Dersom varmetilførselen i mange nok bygninger i et fjernvarmesystem driftes på tilsvarende måte som i simuleringen vil det derfor være mulig å kraftig redusere, eller fullstendig å eliminere variasjonen i systemlasten. Dette forutsetter dog at fjernvarmesystemet reguleres av et intelligent styringssystem som sørger for at forskyvningen av effektuttak utføres forskjellig i alle bygningene slik at lasten jevnes mest mulig ut og energiutnyttelsen i systemet optimaliseres. Implementering av intelligent lastforskyvning er med andre ord en løsning som kan bidra til å øke fjernvarmens konkurranseevne i fremtidens energimarkeder.

Referanser

- [1] I. H. Magnussen, D. Spilde, and M. Killingland, *Energibruk - Energibruk i Fastlands-Norge*, Energibruksseksjonen, Ed. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), 2011.
- [2] *Fakta 2015 - Energi- og vannressurser i Norge*. Olje- og Energidepartementet, 2014.
- [3] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, and B. V. Mathiesen, “4th generation district heating (4gdh) - integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, no. 68, pp. 1–11, 2014.
- [4] H. Lund, B. Möller, B. V. Mathiesen, and A. Dyrelund, “The role of district heating in future renewable energy systems,” *Energy*, no. 35, pp. 1381–1390, 2010.
- [5] P. Acre, M. Medrano, A. Gil, E. Oró, and L. F. Cabeza, “Overview of thermal energy storage (tes) potential energy saving and climate change mitigation in Spain and Europe,” *Applied Energy*, no. 88, pp. 2764–2774, 2011.
- [6] (2015) Energi- og klimapolitikk. Byggenæringens landsforening (BNL). Lastet ned 03.04.16 fra <http://www.bnl.no/politikk-og-analyse/bnl-mener/>.
- [7] Enova, “Potensial- og barrierestudie, energieffektivisering i norske bygg,” 2012.
- [8] L. C. O. Ingvarson and S. Werner, “Building mass used as short term heat storage,” *The 11th International Symposium on District Heating and Cooling*, 2008.
- [9] V. Novakovic, S. Hanssen, J. V. Thue, I. Wangensteen, F. Gjerstad, and et al., *Energy Management in Buildings*. Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2012, (English version) Chapter 4: Indoor environment, pp. 113–156.
- [10] SINTEF Byggforsk, “421.501 temperaturforhold og lufthastighet. betingelser for termisk komfort,” *Byggforskserien*, 1999, lastet ned 20.05.16 fra <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=193>.
- [11] *NS-EN ISO 7730 Ergonomi i termisk miljø, Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort*, Standard Norge Std., 2006.
- [12] H. Gadd and S. Werner, “Daily heat load variations in Swedish district heating systems,” *Applied Energy*, no. 106, pp. 47–55, 2013.
- [13] V. Novakovic, S. O. Hanssen, J. V. Thue, I. Wangensteen, and F. O. Gjerstad, *Enøk i bygninger - Effektiv energibruk*. Gyldendal Norsk Forlag AS, 2007.

- [14] H. Gadd and S. Werner, "Heat load patterns in district heating substations," *Applied Energy*, no. 108, pp. 176–183, 2013.
- [15] Fornybar.no. (2016) Overføring og lagring av energi - varmedistribusjon. Fornybar.no. Lastet ned 10.03.16 fra <http://www.fornybar.no/overforing-og-lagring-av-energi/varmedistribusjon>.
- [16] Norsk Energi and Thermal Consulting Group, *Fjernvarens rolle i det norske energisystemet*. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), 2014.
- [17] Fjernvarme.no. (2015) Fjernvarme er miljøvennlig. Norsk Fjernvarme. Lastet ned 03.04.16 fra <http://fjernvarme.no/index.php?pageID=108&openLevel=11>.
- [18] M. Münster and P. Meibom, "Optimization of use of waste in the future energy system," *Energy*, no. 36, pp. 1612–1622, 2011.
- [19] (2016) Energikilder i fjernvarme. Norsk Fjernvarme. [Online]. Available: <http://fjernvarme.no/index.php?pageID=100&openLevel=34>
- [20] K. Difs and L. Trygg, "Pricing district heating by marginal cost," *Energy Policy*, no. 37, 2009.
- [21] Norsk Fjernvarme (NFV), "Nasjonal tall, energikilder for fjernvarme brukt i 2015," 2015, lastet ned 15.04.16 fra <http://www.fjernkontrollen.no/>.
- [22] V. Verda and F. Colella, "Primary energy saving through thermal storage in district heating networks," *Energy*, no. 36, pp. 4278–4286, 2011.
- [23] J. Kensby, A. Trüschel, and J.-O. Dalenbäck, "Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems - result from a pilot test," *Applied Energy*, no. 137, pp. 773–781, 2014.
- [24] J. Kensby, "Buildings as thermal energy storage - pilot test and large-scale implementation for district heating systems," Masters thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2015.
- [25] S. Frederiksen and S. Werner, *District Heating and Cooling*. Studentlitteratur AB, 2014, ch. Chapter 6.15 - Heat and cold storage, pp. 249–260.
- [26] N. Nord, "Lecture 8: Customer substation installations," Lecture presentation, Autumn 2015.
- [27] M. E. Ingebretsen, "Muligheter for konvertering av eksisterende bygninger til lavtemperatur fjernvarme," Master i energi- og miljø, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU), 2014.

- [28] I. S. Tryggestad, "Optimalisering av fjernvarme ved bruk av spillvarme fra industri og varmpumpe til fjernvarme," Master i energi- og miljø, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU), 2015.
- [29] Statistisk sentralbyrå (SSB), "Fjernvarme, 2015," 2015, lastet ned 15.05.16 fra <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/fjernvarme/aar/2016-05-13>.
- [30] A. Meeg, "Optimal drift av fjernvarmesystem," *Tidsskriftet Norsk energi*, no. 3, pp. 6–10, 2015.
- [31] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (pcms) in building applications," *Applied Energy*, no. 92, pp. 593–605, 2012.
- [32] L. F. Cabeza, Martorell, L. Miro, A. I. Fernández, and C. Barreneche, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier, 2015, ch. 1. Introduction to thermal energy storage (TES) systems, pp. 1–28.
- [33] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, ch. Basic thermodynamics of thermal energy storage, pp. 1–10. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9_1
- [34] I. Dincer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and applications*. John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [35] J. Karlsson, "Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort," Licentiate thesis, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2012.
- [36] European Concrete Platform ASBL, "Concrete for energy efficient buildings - the benefits of thermal mass," 2007, lastet ned 19.02.16 fra http://www.termodeck.com/Filer/Concrete_for_Energy_efficiency_brochure_.pdf.
- [37] TermoDeck, "The termodeck principle," webområde, 2016. [Online]. Available: <http://www.termodeck.com/home.html>
- [38] (2007) Termisk masse og klimatisering av bygninger - en oversikt tilrettelagt for byggherrer, arkitekter og rådgivende ingeniører. Byggutengrenser. Lastet ned 04.05.16 fra http://www.byggutengrenser.no/filer/nedlasting/Termisk_masse.pdf.
- [39] K. W. Østreng, *Betongelementboken - Bind E - Isolasjon*. Byggnæringens Forlag AS, 2008, ch. E2 - Varmelagring, pp. 17–24. [Online]. Available: <http://www.informaticsnet.no/>

-
- [40] J. Heier, “Energy efficiency through thermal energy storage - possibilities for the swedish building stock,” Licentiate Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, 2013.
- [41] H. Gadd and S. Werner, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. Elsevier, 2015, ch. 18. Thermal energy storage systems for district heating and cooling, pp. 467–478.
- [42] I. Dincer, “On thermal energy storage systems and applications in buildings,” *Energy and buildings*, no. 34, pp. 377–388, 2002.
- [43] J. Eynard, S. Grieu, and M. Polit, “Presystems control and thermal energy storage for optimizing a multi-energy district boiler,” *Journal of Process Control*, no. 22, pp. 1246–1255, 2012.
- [44] S. Sajjadi, S. Shamshirband, M. Alizamir, P. L. Yee, Z. Mansor, A. A. Manaf, T. A. Altameem, and A. Mostafaeipour, “Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems,” *Energy and Buildings*, no. 122, pp. 222–227, 2016.
- [45] S. Shamshirband, D. Petkovic, R. Enayatifar, A. H. Abdullah, D. Markovic, M. Lee, and R. Ahmad, “Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method,” no. 48, pp. 760–767, 2015.
- [46] M. Protic, S. Shamshirband, D. Petkovic, A. Abbasi, M. L. M. Kiah, J. A. Unar, L. Zivkovic, and M. Raos, “Forecasting of consumers heat load in district heating systems using the support vector machine with a discrete wavelet transform algorithm,” no. 87, pp. 343–351, 2015.
- [47] D. J. Vikström, “Tillfälliga effekttoppar i fjärrvärmern - kan man med hjälp av lagrad värme undvika att de uppstår i betonghus?” Examensarbete i byggnadsteknikk, Högskolan i Gävle, 2013.

Vedlegg

Utkast til vitenskapelig rapport

Dette vedlegget inneholder et utkast til en vitenskapelig rapport, skrevet på engelsk. Den er i henhold til oppgaveteksten satt sammen av de viktigste elementene i denne oppgaven. Merk imidlertid at kun resultater fra én av de simulerte sonene er inkludert. De øvrige resultatene er utelatt med hensikt for å holde rapporten kortfattet.

Reduction of energy consumption in district heating systems by active use of thermal mass in buildings to level out variations in system load

Iver-Torstein Skari

Norwegian university of science and technology (NTNU), Dept. of energy and process engineering, Trondheim.

Disclaimer

This is only a draft proposal for a scientific paper. It serves to illustrate how the main results of the work conducted on the master's thesis should be presented in such a paper.

Keywords: District heating, load control, peak shaving, thermal energy storage, thermal mass

Abstract

Peak loads in district heating networks increase the heat generation cost due to the need for auxiliary heat generation from more expensive and less environmental friendly fuels. The thermal inertia of building mass can however be used as a short-term heat storage to accumulate heat in advance of anticipated peak loads, making it possible to reduce the heat demand when the peak occurs. Utilization of the buildings mass as a thermal energy storage (TES) system requires use of an intelligent control system that deliberately increase or decrease the building's heat supply so that the thermal mass is charged and discharged purposefully. Optimal timing of these intervals can reduce the building heat demand in periods where the DH system load is high, hence contributing to a reduction in the system peak load. Simulation results presented in this paper show that it is possible to reduce a school building's heat demand by 30 % during peak hours without affecting the quality of the indoor climate.

1. Introduction

In recent years, the Norwegian building stock has had an annual energy consumption of about 80 TWh, an amount that equals nearly 40% of the total energy consumption on the Norwegian mainland. The high usage has resulted in a number of political incentives to reduce the energy demand in new buildings, but according to statistics on national energy consumption [1], these incentives have had very little effect on the total energy consumption. Hence, to achieve the aim of reducing the consumption, it is clearly necessary to focus also on the buildings that already exist. The Federation of Norwegian Construction Industries (BNL) predicts that 75% of today's buildings will still be in use 30 years from now and that at least 80% of the reduction potential may be found in these buildings [2].

To fulfill as large a part as possible of this potential it is necessary to introduce strategies and innovative technology that can contribute in improving the energy efficiency of these buildings. This paper aim to investigate and present an overview of one such strategy as well as to present simulation results that illustrate how the strategy affects the heat supply and the resulting indoor climate of a school building.

The strategy is a load control strategy for heat supply systems in buildings connected to district heating (DH) networks. It involves using the thermal inertia of buildings as a short-term heat storage so that surplus heat supplied in one period can be stored and utilized at a time where there is a heat deficit.

2. Heat storage in buildings

A district heating system consist not only of a production plant, a distribution network and consumer substations, but also of all the connected buildings. The construction materials of these buildings constitutes a large thermal capacity that holds the ability to absorb thermal energy and store it as sensible heat. The sensible heat storage capability of a material is determined by the relationship between several material properties, amongst which the *specific heat capacity*, c ($J/kg\cdot K$), *density*, ρ (kg/m^3), and *thermal conductivity*, λ ($W/m\cdot K$), are the ones that influence the storage function the most [3]. Formula (1) shows that amount of heat that is possible to store by increasing the room temperature by 1 K, is determined by the mass of the material and its heat capacity. Note that the temperature difference between the room air and the surfaces of the storage material is the driving force of the heat exchange, which means that no heat will be transferred if the two media have the same temperature.

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V\Delta T \quad (1)$$

The thermal conductivity determines the rate at which heat is transferred across the material. For a storage material, a high thermal conductivity implies that absorbed heat quickly will conduct through the material and be lost to the surroundings, whereas a very low conductivity will make the heat exchange process so low that the storage will operate too slowly. Hence, desirable properties for a storage material is high density and specific heat capacity and moderately low thermal conductivity [3]. The only conventional building materials that fulfill this specification is heavy construction materials such as brick and concrete. These are however quite common materials, which implies that a large number of buildings are equipped with a large thermal storage capacity. These buildings are commonly referred to as “heavy buildings”, whereas the opposite is a “light building”. The portion of the building mass that are functional for storing purposes are accordingly referred to as “thermal mass”.

The heat storage process is a passive process that require no external energy input. The driving force is the room air temperature, which is determined by the transient conditions of the heat balance in the building. The heat balance is the dynamic net sum of the heat flows to and from the building, which can be divided into four categories:

1. Transportation of heat through the building envelope due to conduction and infiltration (heat loss).
2. Internal generation of heat from heat sources such as people, lighting and equipment (heat gain).
3. Heat supplied by the heating system (heat gain).
4. Heat flows created as heat is absorbed or released by the thermal mass of the building (both gain and loss).

If the sum of the heat flows in the first two categories is positive, then the heat gains are bigger than the heat losses, which will result in a rise in air temperature that will last until the balance between gains and losses is restored. The temperature level at which this balance is found is hence called the balance temperature. The temperature of the thermal mass will however not rise as quickly due its thermal inertia, and therefore heat will flow from the air to the mass until the mass reaches the new balance temperature. In storage terms, this is referred to as *charging* the storage. Likewise, if the balance becomes negative the room air temperature will drop quickly, while the thermal mass slowly *discharges* its stored heat back to the occupant zone.

The heat storage process is hence a passive process that is activated by naturally occurring temperature fluctuations. There is however possible to control the nature of the process by using the heat supply system to deliberately supply a heat surplus or a heat deficit that will force the temperature to change accordingly. When such deliberate control is applied the interaction between the heat supply and the thermal mass can be regarded as a thermal energy storage (TES) system [4].

3. The load shifting strategy

The purpose of utilizing building mass as storage medium in a TES-system is to provide flexible operating conditions for heat generation in the plant(s) that supplies the DH-grid. With access to a storage system, it becomes possible to separate the time of when heat is generated and when it is utilized for useful purposes, meaning that the heat supplier is granted the opportunity to generate heat when it is most favorable – both in economic and environmental terms.

Additionally, the storage function could be of great use in reducing daily variations in the system load. According to [5], a deliberate charging of the storage in advance of anticipated peak loads might lead to a reduction in the need for auxiliary heat production since parts of the load could be met by heat discharged from the storage. Such a peak reduction is equivalent with less demand for heat during peak hours, which enable distribution of heat at a lower temperature. Lower temperature levels in both supply- and return pipe reduces the distribution heat loss, which makes the system more energy efficient. The authors of [5] admits that these benefits also could be achieved by introducing large hot water accumulators, but argues that utilization of thermal mass possibly seems like a more cost efficient alternative since its already an integrated part of the system.

The desired storage functionality can be achieved by using an intelligent control system to schedule the time and duration of charge- and discharge periods. In the hours prior to the anticipated peak demand, the heating system should deliver a surplus of heat to the building so that the air temperature rises and the thermal mass consequently is charged with sensible heat. When the peak arrives, the heat supply should be reduced or entirely cut off so that the room air is forced to experience a temperature drop. The change in temperature will then activate the storage discharge process so that the accumulated heat transfers back to

the air and hence serves to cover the portion of the heat demand that is not covered by the heating system.

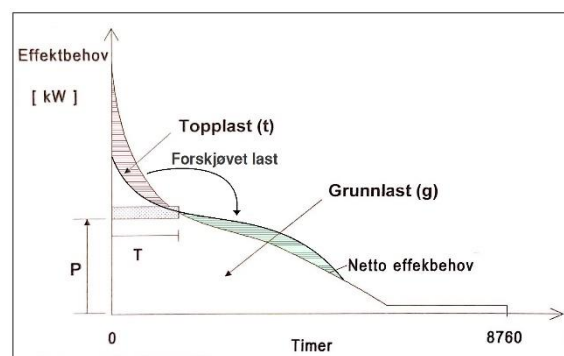


Figure 3.1: When the heat supply of buildings are controlled in accordance with a load shifting strategy the aim is to reduce the amount of peak load heat generation and replace with cheaper and more environmental friendly base load heat generation.

As illustrated by the duration curve in Figure 3.1 this control strategy leads to a longer utilization time for the base load units in the district heating plant and consequently also to fewer hour of peak load heat generation. Since the strategy result in elimination of parts of the peak load being and an increase in base load, the strategy is called *load shifting*, or more commonly; *peak shaving*, since the peak loads are more or less “shaved” away.

3.1. Different strategies

Figure 3.2 illustrates that there are three different strategies for load shifting. The first one is called *load levelling* since the thermal storage is used to cover parts of the total load during peak hours. Using this strategy, heat generation is allowed to run at optimal power at all times, maximizing the efficiency of heat production.

If optimal utilization of the thermal storage is favored over optimal heat production the strategy is called *demand limiting*. The thermal storage now cover a larger part of the peak load, but in return, the power demand of the heat-generating unit is larger. *Full storage* is when the thermal storage is used to cover the entire peak load. This strategy requires access to both large storage capacity and installed power for heat generation.

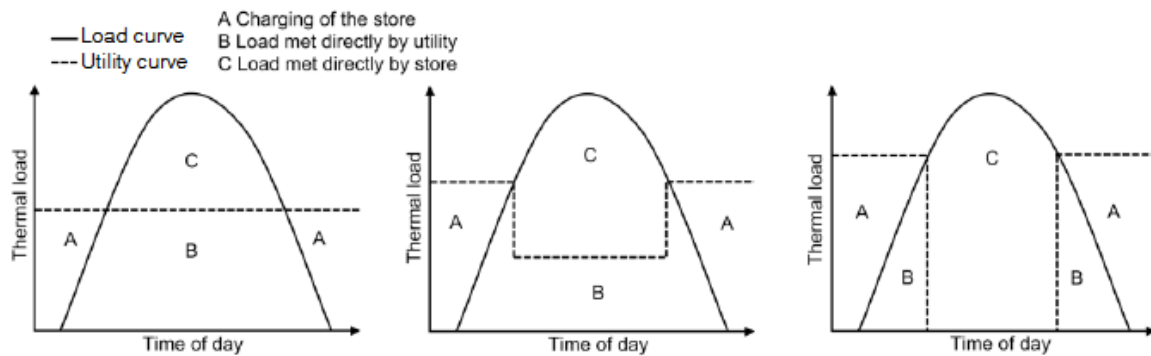


Figure 3.2: Strategies for load shifting. From the left: load levelling, demand limiting and full storage.

3.2. Impact on thermal comfort

It might seem like load shifting could cause a decrease in the quality of the indoor climate, but several earlier studies ([5], [6]) have concluded that it is possible to control the heat supply in such a way without significantly influencing the indoor climate. It should however be mentioned that the indoor climate generally is of higher quality in heavy buildings than in light buildings. This is due to thermal inertia of the building mass that naturally contribute to even out indoor temperature fluctuations that occur due to changes in the heat balance of the building. The simulation results in Figure 3.3 illustrate this effect.

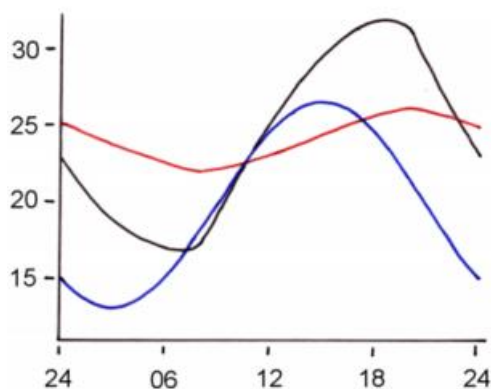


Figure 3.3: Results from a simulation test performed by SINTEF that illustrate temperature variation in a standard light construction (black line) and a heavy construction with exposed thermal mass (red line) when the outdoor temperature (blue line) fluctuates. The figure is retrieved from [8].

3.3. Summary of benefits

Thermal energy storage is according to [7] an advanced energy technology that could potentially provide several benefits. In the following, a complete summary of the most important benefits are included.

- **Environmental benefit** - The environmental impact reduces when environmental energy supply is used to cover a large share of the energy demand. In addition, the potential for free heating and cooling in the building increases ([8], [9]).
- **Extending existing systems capacity** - When installing thermal energy storage the capacity of existing equipment can be increased and therefore it might be used for a longer period than without access to the storage [10].
- **Increased efficiency in heat generation** - Base load units that run on solid fuels respond slowly to rapid load changes. With a storage, the load variation can be reduced and hence the operation of the units become more stable, which yields for better efficiency [11].
- **Less distribution losses** - A reduction in heat demand allow heat distribution at lower temperature levels, which result in a reduced heat loss to the ground [3].
- **Less need for active cooling** - A building with large thermal mass has less need for active cooling during summer since the mass absorbed the surplus heat during the day. This effect is enhanced in buildings where the ventilation system provides night cooling such that the absorbed heat are discharged during the night [8].
- **Less need for maintenance** - Smooth and more stable operation of the generating units reduce the equipment wear, resulting in low cost due to maintenance.

4. Simulation of load shifting

The simulation tool IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) was used to create a model of a school building and to simulate a load shift in its heat supply. The aim of the simulation was to investigate how different charge- and discharge schedules for the heat supply would affect the heat demand during the morning hours (06:00-10:00) where DH-systems typically experience peaks in the system load.

4.1. Construction of the model

The simulation model was created mainly on basis of blueprint drawings and technical data that were used as input in an earlier project were the building's energy usage were analyzed. In addition, a number of parameters such as occupant behavior, electricity usage, hot tap water usage etc., were assumed to be equal to what is average for the building category.

It was also necessary to perform assumptions about one of the most important parameters in the model, namely the composition of the building construction. Since this parameter influence the amount of thermal mass and hence the storage properties of the model, it would directly influence the results of the load shifting simulation and it was hence essential to make an accurate assumption. Consequently, the thermal time constant of the different parts of the building were calculated. These served as a measure of the thermal inertia of the construction and could hence be used as a foundation to base the assumptions on. The calculated time constants led to the following construction assumptions:

- Building part A: 135 hours – heavy wooden construction
- Building part B: 170 hours – heavy concrete construction
- Building part C: 85 hours – lighter, but still heavy wooden construction

4.2. Method

In the performed simulations load shifting was simulated by introducing series of variable temperature set-points for heat supply. Since

thermostatic valves on the water radiator control the heat supply to the building, an upward adjustment in set-point temperature lead to an increase in heat supply and hence creates a charging period, while a downward adjustment lead to a decreased supply which result in a discharging period. Consequently, this method was regarded as suitable for simulating a load shifting strategy.

The performed simulations included testing of the three set-point series depicted in Figure 4.1. Note that both the temperature level and the duration of the adjusted set-points are different in each series, and also that the reference simulation utilizes a constant set-point value of 21 °C.

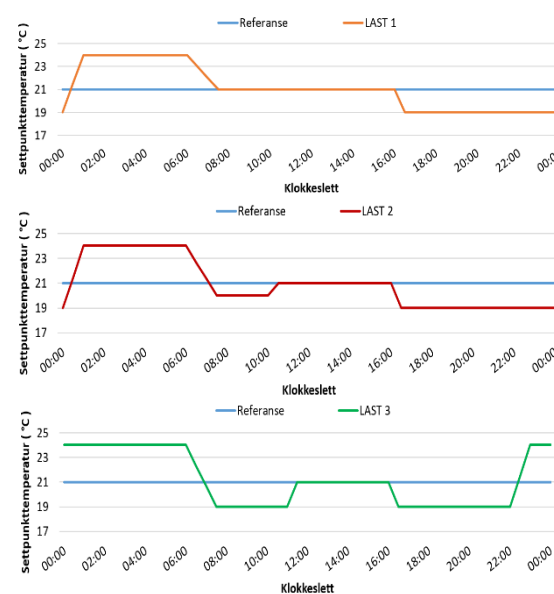


Figure 4.4.1: The different set-point series used to control the heat supply in the different simulations.

Since IDA ICE is a complex simulation software that provides very detailed simulation results, two simplifications were made:

- The simulated model was limited to consist of only one thermal zone from each part of the school building.
- The simulation interval was limited to only a short period consisting of two consecutive winter days.

These simplifications were necessary in order to simplify the simulation process and make the result analysis manageable.

5. Results

Even though load shifting was simulated in two of the three zones in the simulation model, only results from one of these is presented here. The thermal performance of the two zones are however very similar and the result analysis presented in this paper is therefore valid for both zones.

5.1. Operative temperature

The line chart in Figure 5.1 illustrate how the operative temperature is forced to increase and decrease during the charge- and discharge periods. It is evident that these enforced temperature variations are greater than the natural temperature variation in the reference simulation.

The chart show that the set-points of "LAST 1" resulted in a slightly higher temperature during the day when people is present in the building. Those of "LAST 2" and "LAST 3" did on the other hand clearly create discharge periods that make the temperature drop below the desired level of 21 °C. "LAST 3" is the one that creates the most significant

drop. Here the set-point adjustment from 24 °C to 19 °C over a period of 1,5 hours result in a drop of about 2,5 °C. However, only half of this drop takes place while the building is in use.

5.2. Thermal comfort

The bar chart in Figure 5.2 illustrate how the temperature variation influence the people's satisfaction with the indoor climate. The predicted percentage of dissatisfied (PPD) is as expected largest in the "LAST 3"-simulation due to the large temperature drop. A PPD-value of 8% for four consecutive hours is not optimal but it is nevertheless acceptable since an indoor climate only is regarded as unsatisfying when PPD > 10 %.

One surprising result that is evident from the bar chart is that there is a smaller number of dissatisfied people in the "LAST 1"-simulation than in the reference simulation. This result indicate that the slight increase in operative temperature has brought the room air closer to the desirable comfort temperature.

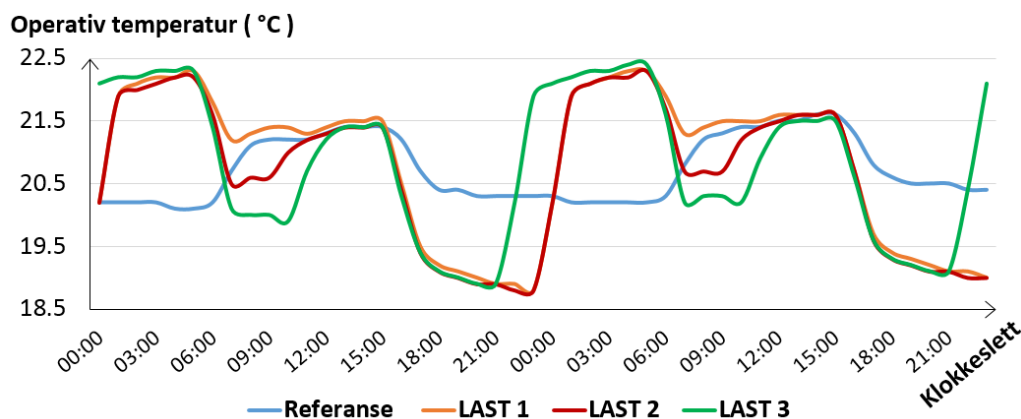


Figure 5.1: Temperature variations caused by the variable set-points for heat supply to the building.

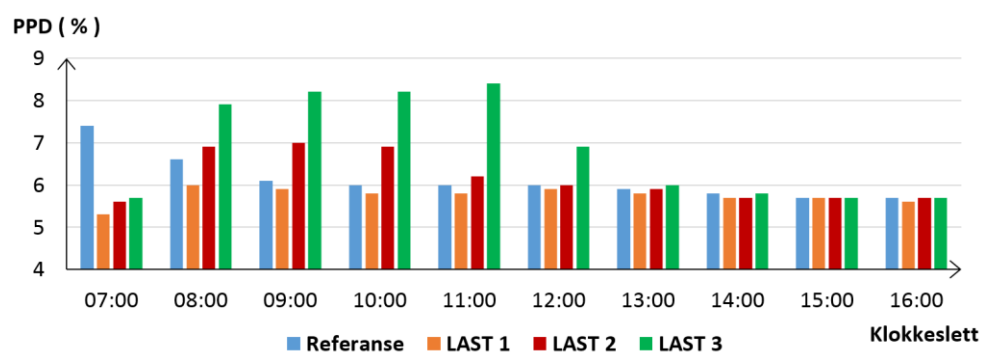


Figure 5.2: Predicted percentage of dissatisfied (PPD) in the different simulations.

5.3. Supplied heat

The line chart in Figure 5.3 make clearly illustrate that all three test simulations resulted in a heat demand reduction during the morning hours (06:00-10:00) when there is a peak in DH system load. Compared to the reference simulation the set-points of "LAST 1" caused a small reduction in the mean heat demand of the period of about 8 %, whereas those of "LAST 2" and "LAST 3" caused large reductions of respectively 31 % and 75 %.

"LAST 1" also resulted in a larger heat consumption during the simulated interval of about 1 %. This minor increase in energy usage may however be justified since it contributed to improve the quality of the indoor climate (indicated by a lower percentage of dissatisfied). The large heat demand reductions caused by "LAST 2" and "LAST 3" did on the other hand result in the heat consumption to be lowered of respectively 1,3 % and 3,0 %, but as illustrated by Figure 5.2 these reductions were achieved at the expense of the thermal comfort of the occupants.

All conditions taken into account, the most effective load shifting strategy was achieved by controlling the set-points for heat supply in accordance with "LAST 2". This simulation did result in a decrease in both heat demand during peak hours and total heat consumption over the simulated period. This was achieved

with only a minor reduction in thermal comfort that for practical purposes can be regarded as so small that it is barely noticeable.

5.4. Effect on the DH system load

The load shifting simulations presented in this paper did not test the effect the heat demand reductions may have on the operation of the heat distribution in the DH-grid. The theory presented does however indicate that reductions in buildings heat demand during peak hours could lead to less variation in the system load. The paper has shown that less variation provides better efficiency in base load heat generation due to more stabilized operation of the generation units.

By reducing the heat load of a building by 30 % during peak hours, which is the case for the "LAST 2" simulation, the total system load in the DH network are lowered and the system peak reduced. If such load shifting can be applied to a large number of the system's buildings this could potentially eliminate the system peak load, making it unnecessary to increase the temperature level in the grid during peak hours when the load is high. Load shifting could hence contribute to a reduction in distribution heat losses, which would result in higher system efficiencies for district heating networks.

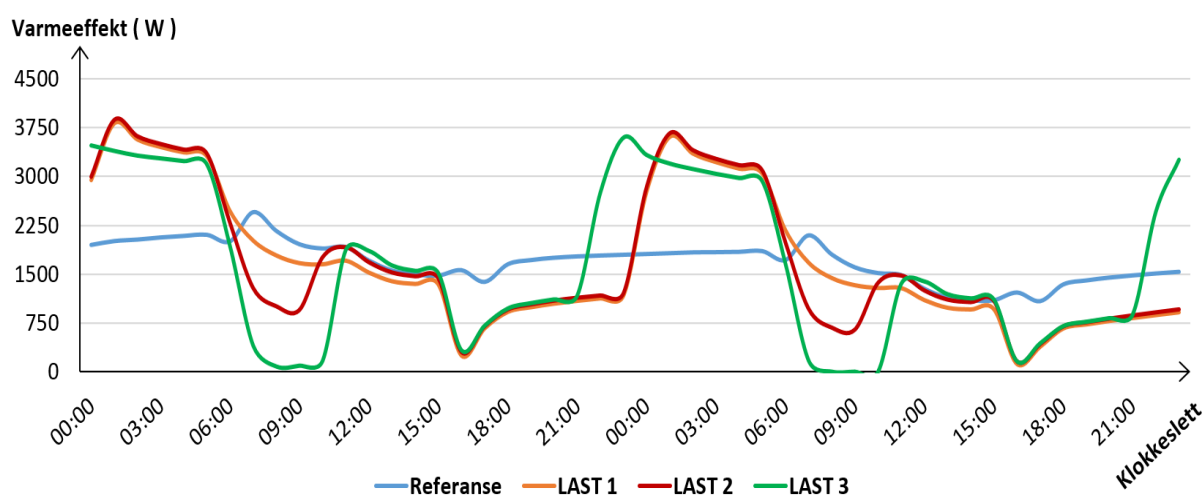


Figure 5.3: Heat supplied in the different simulation tests.

6. Conclusion

The load shifting control strategy that is presented in this paper can contribute to a reduction in both heat losses in the distribution grid and heat consumption in the buildings where the strategy is applied. The strategy utilizes the thermal inertia of building mass as a short-term heat storage so that the time of heat generation in the DH-plant and the time of heat utilization in the buildings can be separated. By doing so heat can be generated more flexibly, allowing the heat supplier to plan the operation of the generation units so that the variation in system load can be reduced.

References

- [1] I. H. Magnussen, D. Spilde and M. Killingland, *Energibruk - Energibruk i Fastlands-Norge, Energibruksseksjonen*, Ed., Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), 2011.
- [2] Byggenæringens landsforening (BNL), *Energi- og klimapolitikk*, 2015.
- [3] V. Novakovic, S. O. Hanssen, J. V. Thue, I. Wangensteen and F. O. Gjerstad, *Enøk i bygninger - Effektiv energibruk*, Gyldendal Norsk Forlag AS, 2007.
- [4] L. F. Cabeza, Martorell, L. Miro, A. I. Fernández and C. Barreneche, "Advances in Thermal Energy Storage Systems," L. F. Cabeza, Ed., Elsevier, 2015, pp. 1-28.
- [5] L. C. O. Ingvarson and S. Werner, "Building mass used as short term heat storage," *The 11th International Symposium on District Heating and Cooling*, 2008.
- [6] J. Kensby, A. Trüschel and J.-O. Dalenbäck, "Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems - Result from a pilot test," *Applied Energy*, no. 137, pp. 773-781, 2014.
- [7] I. Dincer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and applications*, John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [8] *Termisk masse og klimatisering av bygninger - en oversikt tilrettelagt for bygghebygg, arkitekter og rådgivende ingeniører*, 2007.
- [9] P. Acre, M. Medrano, A. Gil, E. Oró and L. F. Cabeza, "Overview of thermal energy storage (TES) potential energy saving and climate change mitigation in Spain and Europe," *Applied Energy*, no. 88, pp. 2764-2774, 2011.
- [10] I. Dincer, "On thermal energy storage systems and applications in buildings," *Energy and buildings*, no. 34, pp. 377-388, 2002.
- [11] H. Gadd and S. Werner, "Advances in Thermal Energy Storage Systems," L. F. Cabeza, Ed., Elsevier, 2015, pp. 467-478.

Inndata fra SIMIEN

Dette vedlegget inneholder simuleringsgrunnlaget fra SIMIEN som ble benyttet da Storhamar skole ble energimerket i 2012. Vedlegget er inkludert fordi inndataene listet her også er benyttet i IDA ICE simuleringene som er foretatt i denne oppgaven.

Bygningsdata: Vedlegg til energiattesten**Attesten gjelder for følgende eiendom (Vedlegg 1)**

Adresse: Fredrik Monsens gate 52
 Postnr/Sted: 2315 HAMAR
 Dato: 27.11.2012 15:20:40
 Energimerkenummer: A2012-274839

Gnr: 1
 Bnr: 877
 Seksjonsnr:
 Festenr:
 Bygnnr: 13773017

Ansvarlig for energiattesten: HAMAR KOMMUNE
 Energimerking er utført av: Rejlers v/ Stian Sjøli

Enhet	Inngangsverdi
Dato for måling av lekkasjetall (en forutsetning for å kunne få karakter A)	
Eventuell varmekilde for varmepumpe og fordeling	
Henvisning til dokumentasjon for inndata eller begrunnelse for avvik fra normative tillegg til NS 3031 eller andre forhold vedr. beregningene.	
Bygningskategori	SKOLEBYGG
Bygningskategori-Id (NVE-Id)	5
Bygningstype	UNDERVISNINGSLOKALER
Byggeår	1914
Areal yttervegger	1519 m ²
Areal tak	1431 m ²
Areal gulv	1434 m ²
Areal vinduer, dører og glassfelt	584 m ²
Oppvarmet BRA	3896 m ²
Totalt BRA	3896 m ²
Oppvarmet luftvolum	13749 m ³
U-verdi for yttervegger	0,31 W/(m ² ·K)
U-verdi for tak	0,18 W/(m ² ·K)
U-verdi for gulv	0,19 W/(m ² ·K)
U-verdi for vinduer, dører og glassfelt	1,80 W/(m ² ·K)
Arealandel for vinduer, dører og glassfelt	15,0 %
Normalisert kuldebroverdi	0,09 W/(m ² ·K)
Normalisert varmekapasitet	38,3 Wh/(m ² ·K)
Lekkasjetall	3,00 1/h
Temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner	68 %
Estimert årgjennomsnittlig temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner pga. frostsikring	68 %
Spesifikk vifteeffekt (SFP) relatert til luftmengder i driftstiden	4,00 kW/(m ³ /s)
Spesifikk vifteeffekt (SFP) relatert til luftmengder utenfor driftstiden	0,37 kW/(m ³ /s)
Gjennomsnittlig spesifikk ventilasjonsluftmengde i driftstiden	10,0 m ³ /(m ² ·h)
Årgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for oppvarmingssystemet	84 %
Installert effekt for romoppvarming og ventilasjonsvarme (varmebatteri)	185 W/m ²
Settpunkt-temperatur for oppvarming i driftstiden	21,0 °C
Årgjennomsnittlig kjølefaktor for kjølesystemet	250 %
Settpunkt-temperatur for kjøling	22,0 °C

Bygningsdata: Vedlegg til energiattesten

Installert effekt for romkjøling og ventilasjonskjøling	0 W/m ²
Spesifikk pumpeeffekt oppvarming (SPP)	0,50 kW/(l/s)
Driftstider, antall timer i døgn med drift	
Driftstid ventilasjon	10 h
Driftstid oppvarming	10 h
Driftstid kjøling	24 h
Driftstid lys	10 h
Driftstid utstyr	10 h
Driftstid varmtvann	10 h
Driftstid personer	10 h
Spesifikt effektbehov for belysning i driftstiden	10,00 W/m ²
Spesifikt varmetilskudd fra belysning i driftstiden	10,00 W/m ²
Spesifikt effektbehov for utstyr i driftstiden	6,00 W/m ²
Spesifikt varmetilskudd fra utstyr i driftstiden	6,00 W/m ²
Spesifikt effektbehov for varmtvann i driftstiden	4,50 W/m ²
Spesifikt varmetilskudd fra varmtvann i driftstiden	0,00 W/m ²
Spesifikt varmetilskudd fra personer i driftstiden	12,00 W/m ²
Total solfaktor for vindu og solskjerming (Ø/S/V/N)	0,52
Gjennomsnittlig karmfaktor	0,17
Solskjermingsfaktor pga. horisont, nærliggende bygninger, vegetasjon og eventuelle bygningsutspring	0,95
Oppvarmingssystem(er)	Fjernvarme;
Varmefordelingssystem	Punktoppvarming;
Manuell eller automatisk solskjerming	MANUELL
Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert elektrisitet	
Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av elektrisk varmesystem (er)	0,00
Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av varmepumpe	0,00
Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av solfangeranlegg	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av elektrisk varmesystem(er)	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av elektrisk varmepumpe	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av solfangeranlegg	0,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for elektrisk varmesystem	0,90
Årsgjennomsnittlig effektfaktor for varmepumpeanlegg	2,10
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for termisk solfangeranlegg (termisk)	9,00
Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert olje	

Bygningsdata: Vedlegg til energiattesten

Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av et oljebasert varmesystem	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av et oljebasert varmesystem	0,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for det oljebaserte varmesystemet.	0,80

Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert gass

Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av et gassbasert varmesystem	0,000
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av et gassbasert varmesystem	0,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for det gassbaserte varmesystemet.	0,85

Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert fjernvarme

Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av fjernvarmebasert varmesystem	1,000
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av fjernvarmebasert varmesystem	1,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for det fjernvarmebaserte varmesystemet.	0,84

Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert biobrensel

Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av biobrenselbasert varmesystem	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av biobrenselbasert varmesystem	0,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for det biobrenselbaserte varmesystemet.	0,77

Andeler og årsgjennomsnittlige systemvirkningsgrader for beregning av levert annen energivare

Andel av netto energibehov for romoppvarming og ventilasjonsvarme som dekkes av varmesystem basert på andre energivarer	0,00
Andel av netto energibehov for oppvarming av tappevann som dekkes av varmesystem basert på andre energivarer	0,00
Årsgjennomsnittlig systemvirkningsgrad for varmesystem for andre energibærere	0,98

Klimastasjon / kilde	Gardermoen (MeteoNorm)
Dato for beregning	21.11.2012

Beregningsprogram

Navn programvare	SIMIEN
Versjon	5,014
Produsent / leverandør	ProgramByggerne
Beskrivelse: Månedsberegning / timesberegning / dynamisk	Dynamisk timesberegning

Energirådgiver

Firma	Rejlers
Navn person	Stian Sjøli

Bygningsdata: Vedlegg til energiattesten**Beregningsresultater som er input til attestgenerator i EMS**

Beregnet levert energi ved normalisert klima	651596 kWh/år
Beregnet spesifikk levert energi ved normalisert klima	167,0 kWh/(m ² ·år)
Beregnet levert energi til oppvarming og varmtvann ved normalisert klima	390318 kWh/år
Beregnet spesifikk levert energi ved lokalt klima	174,0 kWh/(m ² ·år)
Beregnet levert energi ved lokalt klima	678031 kWh/år

Målt energibruk (levert energi) pr. år, gjennomsnitt for siste tre år.

Elektrisitet	0 kWh/år
Olje	0 liter/år
Gass	0,0 Sm ³ /år
Fjernvarme	0 kWh/år
Biobrensel	0 kg/år
Annen energivare	0 kWh/år
Totalt	0 kWh/år

Beregnet levert energi ved normalklima

Elektrisitet	261277 kWh/år
Olje	0 kWh/år
Gass	0 kWh/år
Fjernvarme	390318 kWh/år
Biobrensel	0 kWh/år
Annen energivare	0 kWh/år
Totalt	651596 kWh/år

Sum andel elektrisitet, olje og gass	30 %
--------------------------------------	------

Script for beregning av tidskonstanter

Dette vedlegget inneholder de MATLAB-script og funksjoner som er benyttet til beregning og plotting av tidskonstantene til de tre bygningsdelene som utgjør Storhamar skole.

MATLAB-script og funksjon benyttet i oppgaven

```
%=====
% Dette scriptet leser temperaturdataene fra Excel og konverterer
% informasjonen slik at den blir leselig i MATLAB. I tillegg kalles
% funksjonen som beregner tidskonstantene fra dette scriptet.
%=====

% Henting av målerdata
[numB,txtB,rawB] = xlsread('beregning av tidskonstant','ByggB');
[numA,txtA,rawA] = xlsread('beregning av tidskonstant','ByggA');
[numL,txtL,rawL] = xlsread('beregning av tidskonstant','Lillebjorn');
[numM,txtM,rawM] = xlsread('beregning av tidskonstant','Main');

% Konvertering av tidsaksene
raweditB = cell2mat(rawB(2:2450,3));
timestampB = datestr(raweditB,13);
timestepB = cell2mat(rawB(2:2449,1));

raweditA = cell2mat(rawA(2:2450,3));
timestampA = datestr(raweditA,13);
timestepA = cell2mat(rawA(2:2449,1));

raweditL = cell2mat(rawL(2:2450,3));
timestampL = datestr(raweditL,13);
timestepL = cell2mat(rawL(2:2449,1));
% Konvertering av temperaturdataene
% Main
FT_M = cell2mat(rawM(2:2822,4));
RT_M = cell2mat(rawM(2:2822,5));
outdoor = cell2mat(rawM(2:2822,6));

% Lillebjørn
sensor1 = cell2mat(rawL(2:2813,4));
sensor2 = cell2mat(rawL(2:2813,5));

% Bygg A
sensor3 = cell2mat(rawA(2:2808,4));
sensor4 = cell2mat(rawA(2:2808,5));
sensor5 = cell2mat(rawA(2:2808,6));
sensor6 = cell2mat(rawA(2:2808,7));
sensor7 = cell2mat(rawA(2:2808,8));
FT_A = cell2mat(rawA(2:2808,9));
RT_A = cell2mat(rawA(2:2808,10));

% Bygg B
sensor10 = cell2mat(rawB(2:2449,4));
sensor11 = cell2mat(rawB(2:2449,5));
sensor12 = cell2mat(rawB(2:2449,6));
FT_B = cell2mat(rawB(2:2449,7));
RT_B = cell2mat(rawB(2:2449,8));

%-----
% LILLEBJØRN
tidskonstant1 = find_constant(timestepL,outdoor,rawL,sensor1,...
    'Temperatursensor 1',1250,1310,'L')
```

```
tidskonstant2 = find_constant(timestepL,outdoor,rawL,sensor2,...
    'Temperatursensor 2',1250,1310,'L')

% BYGG A
tidskonstant3 = find_constant(timestepA,outdoor,rawA,sensor3,...
    'Temperatursensor 3',1200,1276,'A')

tidskonstant4 = find_constant(timestepA,outdoor,rawA,sensor4,...
    'Temperatursensor 4',1200,1276,'A')

tidskonstant6 = find_constant(timestepA,outdoor,rawA,sensor6,...
    'Temperatursensor 6',1200,1276,'A')

tidskonstant7 = find_constant(timestepA,outdoor,rawA,sensor7,...
    'Temperatursensor 7',1200,1276,'A')

% BYGG B
tidskonstant10 = find_constant(timestepB,outdoor,rawB,sensor10,...
    'Temperatursensor 10',850,941,'B')

tidskonstant11 = find_constant(timestepB,outdoor,rawB,sensor11,...
    'Temperatursensor 11',850,941,'B')

tidskonstant12 = find_constant(timestepB,outdoor,rawB,sensor12,...
    'Temperatursensor 12',850,941,'B')

function [time_constant] = find_constant(timestep,outdoortemp,...
rawdata,sensor,plottitle,startplot,startpos,kurveid)
%=====
% Denne funksjonen plottet temperaturmålingene til en gitt sensor, beregner
% hvordan temperaturforløpet ville sett ut videre og finner tidskonstanten.
%=====

% Hoy er punktet hvor all varmetilførsel slås av
% Stop posisjon gis av koordinatene til laveste målte temperatur, altså
% temperaturen rett før varmen ble slått på igjen.
hoy = sensor(startpos);
[realmintemp,stopplot] = min(sensor);

%-----
% Utetemperaturen brukes til å bestemme hvilken temperatur bygningen vil
% oppnå etter lang tid
Tout = outdoortemp(startpos:stopplot); % utetemperaturen
lav = mean(Tout); % gjennomsnittlig utetemp.
ylimlow = lav-2;
ylimhigh = hoy+2; % y-aksensens grenser for plotting

%-----
% Beregning av tidskonstantpunktet der 63,2% av endringen har skjedd
value = ((hoy-lav)*(1-0.632))+lav;
```

```
%-----  
% Definerer funksjonene som skal plottes, gitt av grensene over  
x = timestep(startpos:stopplot);           % tidsaksen  
xx = startplot:(stopplot+4000);           % forlenget tidsakse  
y1 = smooth(sensor(startpos:stopplot));    % målte temperaturer  
y2 = (0*xx + value);                       % 63,2% verdien  
  
%-----  
% Forlenging av temperaturforløpet ved å generere en funksjon på  
% basis av bunnpunktene i det målte temperaturforløpet  
% Denne delen er spesielt tilpasset hver måleserie fordi kvaliteten på  
% målingene er varierende  
y1_inv=-y1;  
[~,minima_pos] = findpeaks(y1_inv,'MinPeakDistance',180);  
switch kurveid  
    case 'A'  
        minima_pos = minima_pos(2:3); % De to neste bunnpunktene  
        xdata = x(50:180);  
        ydata = y1(50:180);  
        minima_real=minima_pos+startpos; % korrigering pga inversering  
    case 'B'  
        minima_pos = minima_pos(2:4); % De tre neste bunnpunktene  
        xdata = x(1:200);  
        ydata = y1(1:200);  
        minima_real=minima_pos+startpos; % korrigering pga inversering  
    case 'L'  
        minima_pos = minima_pos(2:4); % De tre neste bunnpunktene  
        xdata = x(1:200);  
        ydata = y1(1:200);  
        minima_real=minima_pos+startpos; % korrigering pga inversering  
end  
  
%-----  
%Generering av temperaturer langt frem i tid = lav = mean(Tout)  
switch kurveid  
    case 'A'  
        for i=1:1:2  
            xdata(130+i) = minima_real(i);  
            ydata(130+i) = y1(minima_pos(i));  
        end  
        % Legger til antatt temperatur etter lang tid  
        for i=1:1:20  
            xdata(132+i) = (i+4)*1000;  
            ydata(132+i) = lav;  
        end  
    case 'B'  
        %Generering av temperaturer langt frem i tid = lav = mean(Tout)  
        for i=1:1:3  
            xdata(200+i) = minima_real(i);  
            ydata(200+i) = y1(minima_pos(i));  
        end  
        % Legger til antatt temperatur etter lang tid  
        for i=1:1:20  
            xdata(203+i) = (i+4)*1000;  
            ydata(203+i) = lav;  
        end  
    case 'L'  
        %Generering av temperaturer langt frem i tid = lav = mean(Tout)  
        for i=1:1:3  
            xdata(200+i) = minima_real(i);  
            ydata(200+i) = y1(minima_pos(i));
```

```

end
% Legger til antatt temperatur etter lang tid
for i=1:1:20
    xdata(203+i) = (i+1)*1000;
    ydata(203+i) = lav;
end
end
%-----
% Bruk av fit-funksjon for å finne en kurve som passer til dataene
fittedcurve = fit(xdata,ydata,'exp2'); % Eksponentiell 2. grad

%-----
% Beregning av skjæringspunktet = punktet hvor man finner tidskonstanten
[x0, y0] = intersections(xx,fittedcurve(xx),xx,y2);
% intersections er en funksjon som finner skjæringspunktet mellom to
% linjer. Den er tilgjengelig fra:
% http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/
% 11837-fast-and-robust-curve-intersections/content/intersections.m

%-----
% Plotting
figure
hold on
set(gca,'xlim',[startplot stopplot+4000],'ylim',[ylimlow,ylimhigh]);

%plot(minima_real,y1(minima_pos),'ro') % Bunnpunktene i målingene
plot(xx,fittedcurve(xx),'r') % Den tilpassede kurven
plot(x,y1,'linewidth',2); % De ekte målingene
plot(xx,y2,'g--','linewidth',1); % Skjæringslinja ved 63,2%
plot(x0(1),y0(1),'ro','markersize',12); % Selve skjæringspunktet

%-----
% Punktene på x-aksen som lar oss beregne tidsintervallet
startpoint = startpos;
endpoint = round(x0);
plot(startpoint,ylimlow,'ro','markersize',12);
plot(endpoint,ylimlow,'ro','markersize',12);
plot([startpoint startpoint],[ylimlow hoy],':k')
plot([endpoint endpoint],[ylimlow value],':k')

%-----
% Beregning og konvertering av tidskonstantverdien til h,m,s
% Verdien beregnes på grunnlag av at 1 enhet på x-aksen er ~5 min

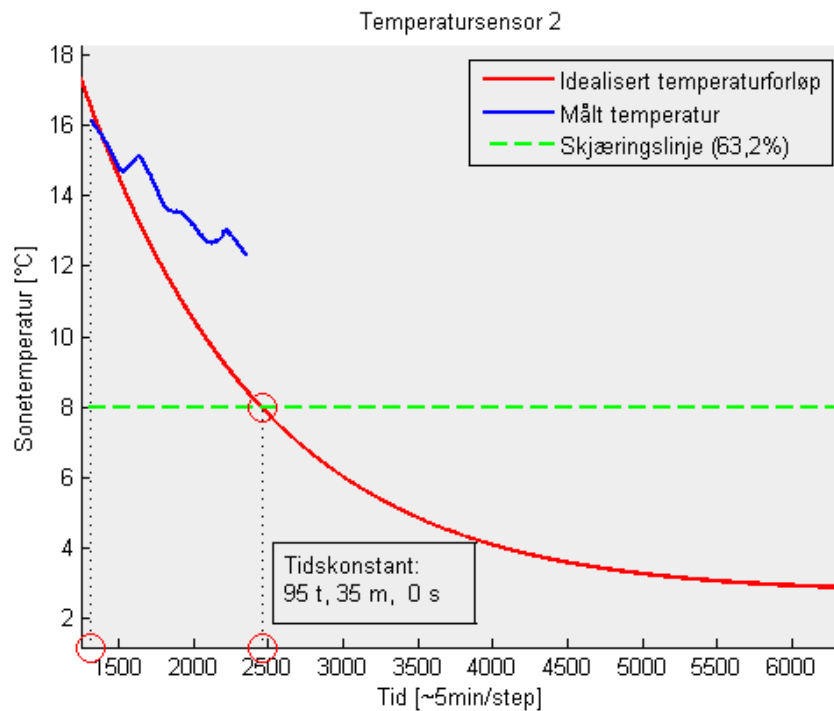
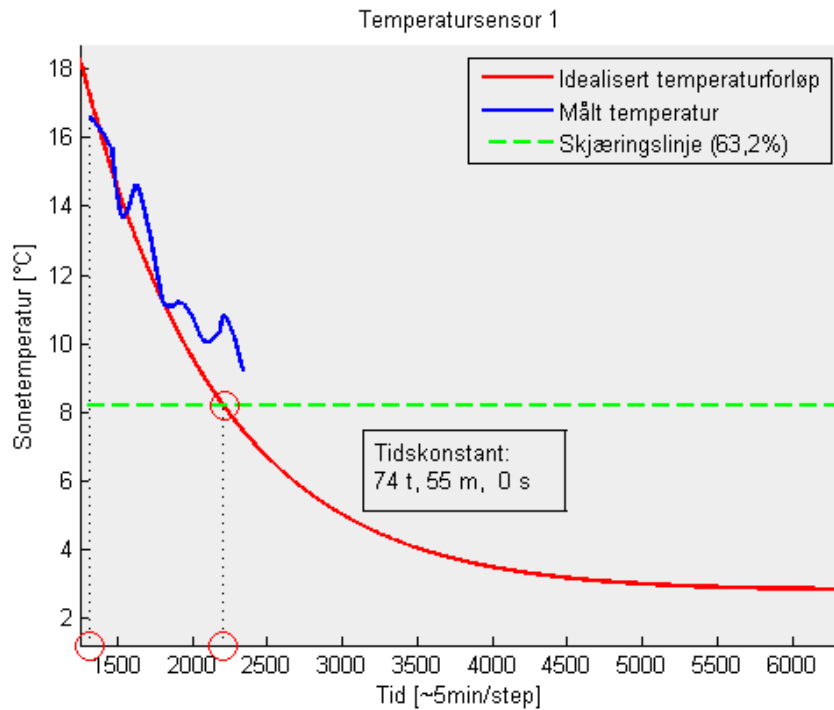
time_constant = secs2hms((endpoint - startpoint)*5*60);

%-----
% Formatering av plot output
title(plottitle);
xlabel('Tid [~5min/step]');
ylabel('Sonetemperatur [°C]');
% set(gca,'XTick',[]); %Brukes for å fjerne verdiene på x-aksen
dim = [0.3 0.005 0.3 0.3];
str = {'Tidskonstant: ',time_constant};
annotation('textbox',dim,'String',str,'FitBoxToText','on');
legend('Idealisert temperaturforløp','Målt temperatur',...
'Skjæringslinje (63,2%)')

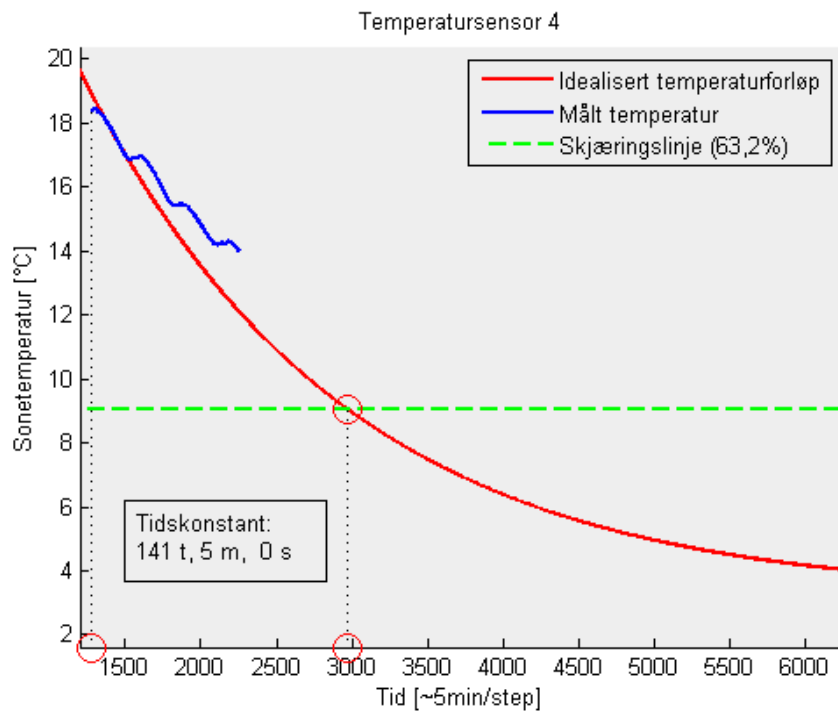
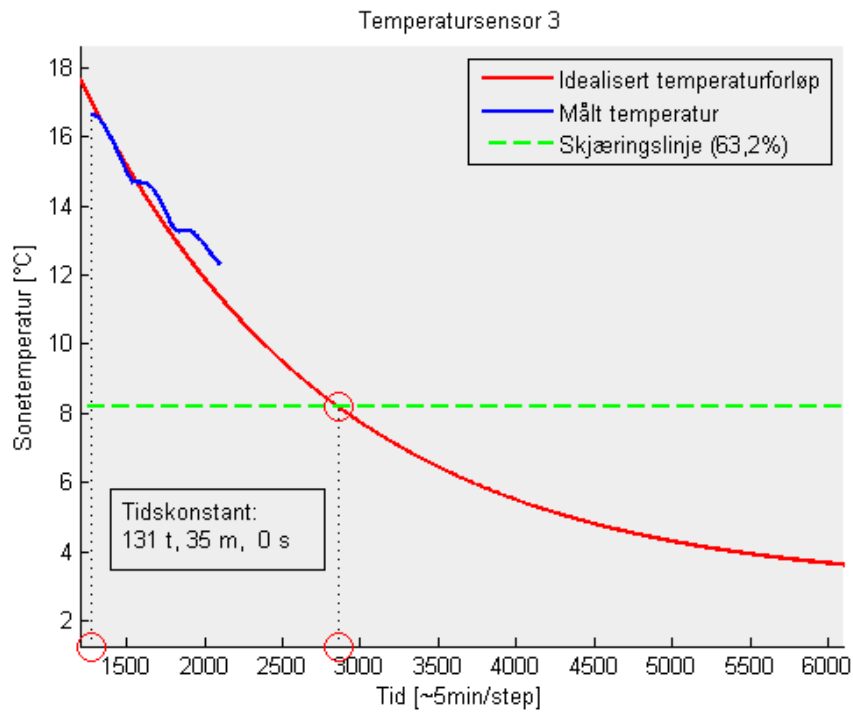
end %function
%=====

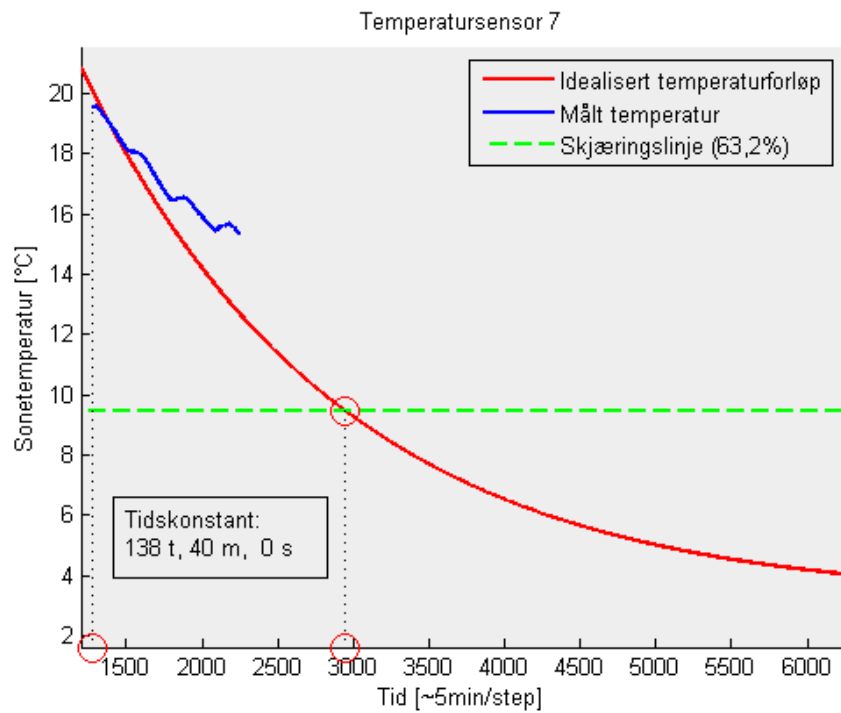
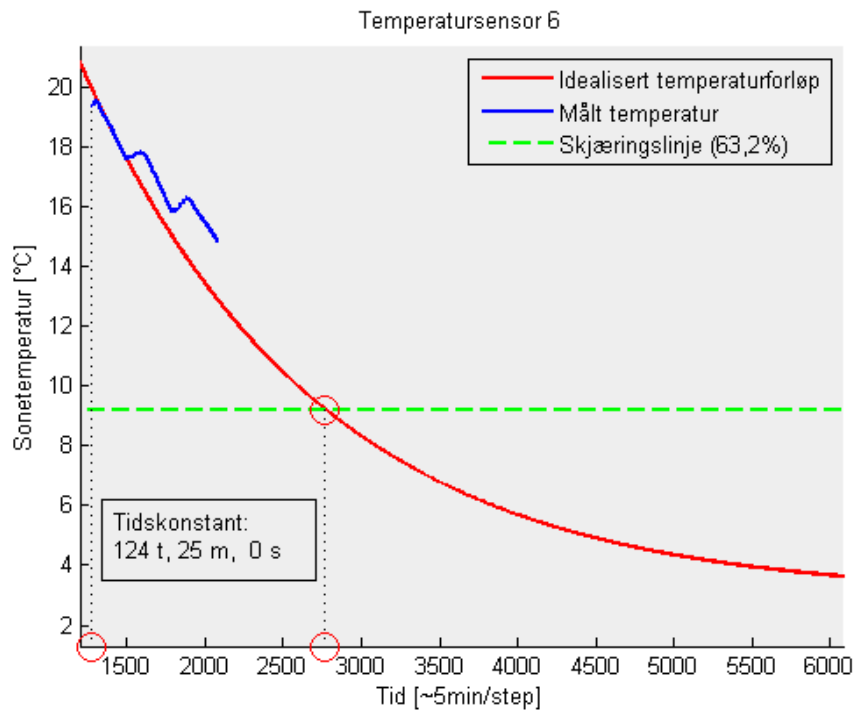
```

Tidskonstanter for Lillebjørn



Tidskonstanter for Bygg A





Tidskonstanter for Bygg B

