



Norwegian University of
Science and Technology

Effektreduksjon med vannbåren gulvvarme ved aktiv bruk av
bygningens termiske masse

Lars Eirik Bakkom og Martin Sande

Bachelor i maskin, VVS-teknikk

Innlevert: mai 2019

Hovedveileder: Bjørn Austbø

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for maskinteknikk og produksjon



**FAKULTET FOR
INGENIØRVITENSKAP**
**Institutt for maskinteknikk og
produksjon**
7491 Trondheim

Besøksadresse:
Richard Birkelands vei 2B, Trondheim

RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

Tittel (norsk og engelsk):
**Effektreduksjon med vannbåren
gulvvarme ved aktiv bruk av bygningens
termiske masse**

Power Reduction with Underfloor Heating in
Buildings by Active Use of the Building's
Thermal Mass

Prosjektnr:
MTP-V-2019-04

Forfattere:
Lars Eirik Bakkom
Martin Sande

Oppdragsgiver eksternt:
Erichsen og Horgen

Dato levert: 20.05.2019

3 vedlegg

Totalt antall sider
136 inkl. vedlegg

Veileder internt:
Bjørn Austbø

Rapporten er ÅPEN

Kort sammendrag:

Oppgaven går ut på å utforske potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner og aktivt bruke dette for å jevne ut effekttopper ved bruk av vannbåren gulvvarme. Formålet med oppgaven er å bidra til å sette et større fokus på effekt og effekttopper, samt forsøke å finne løsninger slik at man kan neddimensjonere gulvvarmesystemet av økonomiske og miljømessige hensyn.

Det har blitt gjennomført simulering i IDA ICE, og med støtte fra teori og simulering i MATLAB har det blitt funnet ut at det er mulig å redusere det maksimale effektuttaket med 24 % med liten påvirkning på termisk komfort.

Stikkord fra prosjektet:

Effekttopp	Power peak
Effektreduksjon	Power reduction
Prediktiv kontroll	Predictive control
Tung konstruksjon	High thermal mass
Gulvvarme	Underfloor heating
Treghet i betongen	Thermal lag
Lastforskyvning	Load displacement

Forord

Med denne oppgaven konkluderer vi vår treårige bachelorstudium i maskin ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er gjennomført ved institutt for energi- og prosessteknikk gjennom vårsemesteret 2019 og krediteres med 20 studiepoeng.

Denne bacheloroppgaven har vært svært interessant å gjennomføre fordi den omhandler et tidsrelevant spørsmål som har fått økende fokus i nyere tid. Dette har vært en stor motivasjon for arbeidet vårt.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileder ved NTNU, Bjørn Austbø. Han har bidratt med gode råd til den teoretiske delen samt den praktiske gjennomføringen av simuleringen og spesielt til oppsettet av skriptet i MATLAB. Vi vil også takke Erichsen og Horgen med veilederne Olav Struksnes og Arnkell J. Petersen for god støtte og tilrettelegging for gjennomføringen av denne oppgaven.

NTNU

Trondheim, mai 2019



Lars Eirik Bakkom, 20.05.2019



Martin Sande, 20.05.2019

Oppgavebeskrivelse

Oppgaven går ut på å utforske potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner og aktivt bruke dette for å jevne ut effekttopper ved bruk av vannbåren gulvvarme. Dette skal ikke gå på bekostning av den termiske komforten. Formålet med oppgaven er å bidra til å sette et større fokus på effekt og effekttopper, og forsøke å finne løsninger på neddimensjonering av gulvvarmesystemet for økonomiske og miljømessige hensyn. Det er ønskelig å forstå om tregheten i bygningsmassen kan bidra til å fordele effektpådraget fra varmekilden og dermed legge et grunnlag for utvikling av mer effektive reguleringsystemer. Dette innebærer å gjennomføre et detaljert litteraturstudium og konstruere en simuleringsmodell som kan benyttes til å undersøke samspillet mellom pådraget på gulvvarmen og konstruksjonens termiske masse, samt om tregheten til den termiske masse kan utnyttes. Problemstillingen denne oppgaven belager seg på er: Er det mulig å utnytte den naturlige tregheten i termisk tunge konstruksjoner for å jevne ut effekttopper ved bruk av vannbåren gulvvarme?

I all hovedsak begrenser oppgaven seg til å utforske potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner. Forutsetningene er at bruksmønsteret til et eksisterende bygg ikke skal endres. Det blir dermed benyttet simuleringsmodeller til å basere analysen på. En følge av dette er at oppgaven kun fokuserer på løsninger som kan implementeres uten at det stilles krav til strukturelle endringer. Dette innebærer å fokusere på pådragsstyring, og simplifiserer modellen slik at vi kun får ut relevante data.

Resultatmål

- Drøfte konsekvenser av å bruke en lastforskyvning på gulvvarmen
- Se om tregheten i betongen kan hjelpe til å redusere effektpådraget ved hjelp av simulering
- Komme med innspill på hvilke styringsmetoder som kan være mer bærekraftig
- Bidra til en kostnadsbesparelse ved fremtidig dimensjonering av vannbåren varme
- Sette lys på overdimensjonering og hvorfor vi har en økning av effekttopper

Sammendrag

Det norske strømmettet blir presset av et økende effektuttak. Hvis den maksimale samtidige effektbruken ikke reduseres, må strømmettet utbygges. Dette er et prosjekt som vil koste opp mot 140 milliarder kroner og det er derfor viktig å finne løsninger for å redusere det maksimale effektuttaket. Denne oppgaven inneholder tre deler. Den første delen handler om et litteraturstudie som fokuserer på hvordan gulvvarmesystem fungerer generelt og hvordan den termiske massen i bygninger kan utnyttes for å redusere effekttopper. Den andre delen går på metoden som er brukt til å gjennomføre simuleringene i IDA ICE og MATLAB før resultat, diskusjon og konklusjon blir presentert i den tredje og siste delen.

Litteraturstudiet viser at det er mulig å benytte den termiske massen i bygninger som et midlertidig varmelager. Den termiske tregheten og varmelagringskapasiteten gjør at bygninger kan absorbere varmeenergien i de periodene hvor det er varmeoverskudd, og akkumulere den slik at varmeenergien kan frigis på tidspunkter når det er underskudd av varme. Ved å endre tidspunktet for når varmeenergien som er lagret benyttes, er det mulig å forskyve effekttoppene i systemet slik at varmeoverføringen kan reguleres mellom temperaturen i rommet og byggets termiske masse. Dette er en driftsstrategi som kalles lastforskyvning og forskning finner at et system som reguleres med en slik strategi kan forbedre og utnytte systemvirkningsgraden til varmeproduksjonen.

Simuleringen som blir presentert i oppgaven viser at det er mulig å redusere det maksimale effektuttaket med 24 % og med minimale endringen i termisk komfort. Det viser at det er mulig å fjerne effekttoppene som oppstår om morgenen og ettermiddagen ved bruk av forskjellige metoder slik som lastforskyvning. Videre i oppgaven brukes programmet MATLAB for å støtte opp og sjekke påliteligheten til resultatene fra IDA ICE.

Simuleringsresultatene kan betraktes som en veiledning fordi simuleringsmodellen ikke baserer seg på et realistisk bygg, men er gjort som en forenkling for å vise at det er mulig å redusere effekttoppene og underbygge teorien. Resultatene vurderes likevel som pålitelig fordi lastforskyvningstrategien fungerer. Det konkluderes derfor med at det er mulig å innføre en strategi for lastforskyvning på varmesystemet uten at det går på bekostning av den termiske komforten i bygningen.

Abstract

The Norwegian electricity grid is being pushed to the limit by an increasing power output. If the maximum simultaneous power is not reduced, the electricity grid must be expanded. This is a project that will cost up to NOK 140 billion and it is therefore important to find solutions to reduce the maximum power output. This thesis contains three parts. The first part is about a literature study that focuses on how the floor heating system works and how the thermal mass in buildings can be utilized to reduce power peaks. The second part is based on the method used to implement simulations in IDA ICE and MATLAB before the result, discussion and conclusion are presented in the third and last part.

The results of the literature study show that it is possible to utilize the thermal mass in buildings as a thermal storage. The thermal inertia and heat storage capacity allow buildings to absorb the thermal energy during periods of excess heat and accumulate it so that the thermal energy can be released at times when there is heat loss. By changing the time when the thermal energy stored is used, it is possible to displace the power peaks in the system so as to control the heat transfer between the temperature of the room and the thermal mass of the building. This is an operating strategy called load displacement and the studied literature shows that a system that is regulated with strategies like this can be improved and utilize the system efficiency of the heat production.

The simulation presented in the thesis shows that it is possible to reduce the maximum power output by 24 % without compromising any drastic change in thermal comfort. It shows that it is possible to remove the power peaks that occur in the morning and in the afternoon using different methods such as load displacement. The program MATLAB is used to support and to check if the results for IDA ICE are reliable.

The results for the simulation can be considered a guide because the simulation model is not based on a realistic building. It is made as a simplification to show that it is possible to reduce power peaks and support the theory. The results are still considered reliable and concludes that it is possible to introduce a strategy for load displacement on the heating system without compromising the thermal comfort of the building.

Innhold

Forord	I
Oppgavebeskrivelse	II
Sammendrag	III
Abstract	IV
Innhold	VIII
Figurer	XI
Tabeller	XII
1. Introduksjon	1
1.1. Bakgrunn og motivasjon	1
1.2. Formål og problemstilling	3
1.3. Begrensninger	3
1.4. Metode	4
1.4.1. Metode for litteraturstudie	5
1.5. Struktur	5
2. Introduksjon til gulvvarme	9
2.1. Dimensjonering	10
2.1.1. DVUT - dimensjonerende vinter utetemperatur	11
2.1.2. Varmebalanse	11
2.1.3. Overflatetemperatur	14
2.2. Leggemønster	14
2.3. Regulering	16
2.3.1. Temperaturregulering	16
2.3.2. Mengderegulering	16
2.4. Varmepumpe som styring	17
2.4.1. Virkemåte	17

2.4.2.	Dimensjonering og prosjektering	18
2.4.3.	Effektfaktor, COP	19
2.4.4.	Regulering og drift	20
3.	Termisk inneklime	21
3.1.	Påvirkning av menneskers varmebalanse	22
3.1.1.	Bekledning og aktivitet	22
3.2.	Termisk komfort	23
3.2.1.	Operativ temperatur og bedømmelseindeks for termisk komfort .	24
3.3.	Komfortbedømmelse i IDA ICE	27
4.	Termisk masse som varmereservoar	28
4.1.	Varmelagringsprinsipper	28
4.1.1.	Sensibel varmelagring	28
4.1.2.	Latent varmelagring	29
4.1.3.	Termokjemisk varmelagring	29
4.2.	Lagringsstrategier	30
4.2.1.	Aktiv lagring	30
4.2.2.	Passiv lagring	30
4.3.	Lagringspotensiale i termisk masse	31
4.4.	Byggets tidskonstant	33
5.	Thermal Energy Storage, TES	36
5.1.	Termisk masse	36
5.2.	TABS	37
5.3.	Lastforskyvning	38
5.3.1.	Forskyvningsstrategier	40
5.3.2.	Prediktiv lastforskyvning	42
5.4.	Tidligere studier av lastforskyvning	43
5.4.1.	Varmelagring i termisk masse for å redusere effekttopper	43
5.4.2.	Syklisk lagring for redusert døgnvariasjon	45
5.4.3.	Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems- supply temperature optimisation and self-regulating effects	46

6. Simulering IDA ICE	51
6.1. Simuleringsmetode	51
6.2. Inndata modell	52
6.2.1. Klima og værdata	52
6.2.2. Romgeometri	52
6.2.3. Bygningskroppen	53
6.2.4. Varmesystemet	54
6.2.5. Ventilasjon	54
6.2.6. Intern- og personbelastning	55
6.3. Simuleringsscenario	56
6.3.1. Kontroller	56
6.4. Lastforskyvning ved endring av døgnpådrag	57
7. Numeriske beregninger i MATLAB	60
7.1. Oppsett	60
7.1.1. Beregningssyklus	60
7.2. Inndata modell	62
7.2.1. Bygningskropp	63
7.3. Modellens konstanter	64
7.3.1. Varmetapsberegning	64
7.3.2. Interne laster	65
7.3.3. Rommets varmekapasitet	66
8. Resultater	69
8.1. Simuleringsmodell IDA ICE	69
8.1.1. Last 1 – Referanse	69
8.1.2. Last 2	73
8.1.3. Last 3	76
8.1.4. Last 4	79
8.1.5. Sammenligning resultat IDA ICE	82
8.2. Resultat MATLAB	83
8.2.1. Gulvkonstruksjon etter NS-EN ISO 11855-2:2015	83
8.2.2. Tyngre konstruksjon	86

8.2.3. Internlastendring	88
9. Diskusjon	89
9.1. Litteraturstudie	89
9.2. Simuleringsmodell i IDA ICE	90
9.2.1. Inndata	90
9.2.2. Simuleringsintervall	91
9.3. Simuleringsmodell i MATLAB	91
9.4. Resultatene fra simulering i IDA ICE	92
9.5. Resultat fra simulering i MATLAB	94
9.6. Oppsummering diskusjon	95
10. Konklusjon	96
10.1. Videre studier	97
Bibliografi	104
Vedlegg	105
A. Forslag til populærvitenskapelig artikkel	A-1
B. Skript MATLAB	B-1
B.1. Gulvvarmesimulering etter ISO	B-1
B.2. Gulvvarmesimulering med en tyngre gulvkonstruksjon	B-7

Figurer

1.1.	Effektbruk og el-bruk i prosent stigning [2].	1
1.2.	Månedlig variasjon i effektuttak [5].	2
2.1.	Eksempel på oppbygging av gulvvarme [6].	9
2.2.	Den ideelle opvvaringskurven viser høyden som y-akse og temperatur som x-akse. Figuren er funnet i [7, 8, 9] og hentet fra [6].	10
2.3.	Illustrerer noen av de dynamiske interaksjonene som påvirker den vannbårene gulvvarmen fra et termisk synspunkt [16].	13
2.4.	Eksempel på leggemønster [20].	14
2.5.	Serpentine - Normal, Double Serpentine - Flettemønster og Counter flow – Spiralmønster [21].	15
2.6.	Eksempel på feil dimensjonert gulvvarmeløsning [22].	15
2.7.	Prinsipiell skisse av et varmepumpeanlegg [24].	18
2.8.	Fremstilling av varmepumpens effekt- og energidekning [24].	19
2.9.	Effektfaktor (COP) med hensyn på temperaturløft [24].	20
3.1.	Metabolisme med økt grad av aktivitet [27].	23
3.2.	Sammenheng mellom PMV og PPD fra Byggforsk Byggdetaljer 421.501 [28].	25
3.3.	Optimal operativ temperatur med hensyn på aktivitet og bekledding [33].	27
4.1.	Sammenheng mellom lagret varmemengde og temperatur for sensible og latente lagringsprosesser [36].	29
4.2.	Illustrasjon av passiv og aktiv lagring [37].	31
4.3.	Simuleringsresultater av temperaturforløp for utetemperatur (blå), romluftstemperatur for standard lett konstruksjon (sort) og romluftstemperatur for tung konstruksjon med eksponert termisk masse (rødt) over et tidsintervall på 24 timer gjort av SINTEF. [39]. . . .	32
4.4.	Kurve av avkjølingsforløp når utemperaturen endres. τ er tidskonstanten. Tangenten viser hvordan hellingen på kurven avtar med tiden [42].	34

5.1. En skjematisk fremstilling av (a) uten noe form for lagring og (b) med mulighet for lagring. Inspirert fra [45].	36
5.2. Lagringsprosess for termisk masse basert på TES fra [46].	37
5.3. Illustrasjon på gulvoppbygging av TABS [48].	38
5.4. Illustrasjon av varmemagasinerings [47].	38
5.5. Illustrasjon på lastforskyvning i et varighetsdiagram. Den rød-skraverte andelen er spisslast som kuttes bort og erstattes med tilsvarende grunnlast (grønn-skravert). [15]	39
5.6. Prinsipp for toppplastforskyvning [49].	40
5.7. Strategier for lastforskyvning [35]. Fra venstre: «Load levelling», «Demand limiting» og «Full storage».	41
5.8. IDA ICE simuleringresultat for varmebelastning ved laststyring fra [42].	44
5.9. IDA ICE simuleringresultat som viser det resulterende temperaturforløpet fra [42].	45
5.10. Temperatur variasjon i rammen til kuben når den består av standard betong [16].	47
5.11. Temperatur variasjon i rammen til kuben når den består av en termisk tyngre betong [16].	47
6.1. Illustrasjon av den simulerte modellen i IDA ICE.	51
6.2. Pådragsforløp for ventilasjonsanlegget.	55
6.3. IDA ICE styringssystem for pådrag av gulvvarme.	57
6.4. Døgnpådrag for «Last 1».	57
6.5. Døgnpådrag for «Last 2».	58
6.6. Døgnpådrag for «Last 3».	58
6.7. Døgnpådrag for «Last 4».	59
8.1. Effektpådrag fra grunnlasten «Last 1».	70
8.2. Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 1».	70
8.3. Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 1». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overfaltetemperatur (RØD).	72
8.4. Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 1».	72
8.5. Effektpådrag fra «Last 2».	73

8.6. Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 2».	74
8.7. Temperaturforløp gjennom døgnet for «Last 2». Operativ temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).	75
8.8. Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 2». . .	75
8.9. Effektpådrag fra «Last 3».	76
8.10. Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 3».	77
8.11. Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 3». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).	78
8.12. Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 3». . .	78
8.13. Effektpådrag fra «Last 4».	79
8.14. Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 4».	80
8.15. Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 4». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).	81
8.16. Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 4». . .	81
8.17. Sammenligning av levert varmeeffekt fra de simulerte lastene.	82
8.18. Sammenligning av PPD for de forskjellige lastene.	83
8.19. Temperatur gjennom gulvkonstruksjon i stabil tilstand.	84
8.20. Varmefluks gjennom konstruksjonen, stabil tilstand.	85
8.21. Romtemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.	85
8.22. Overflatetemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.	85
8.23. Temperatur gjennom konstruksjon i betong i stabil tilstand.	86
8.24. Varmefluks gjennom konstruksjonen, stabil tilstand.	87
8.25. Romtemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.	87
8.26. Overflatetemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.	87
8.27. Romtemperatur ved endring av interne laster ved standard gulvkonstruksjon.	88
8.28. Romtemperatur ved endring av interne laster ved tyngre konstruksjon. . .	88
9.1. Sammenligning av gulvvarmetemperaturen ved de forskjellige lastene. . .	93
9.2. Sammenligning av den operative temperaturen ved de forskjellige lastene.	93

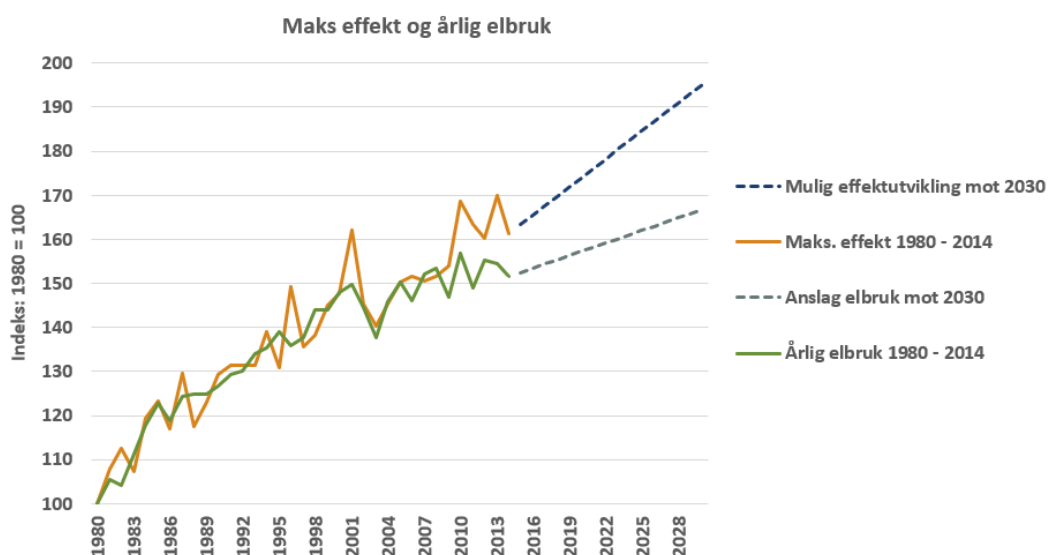
Tabeller

2.1. Faktorer i rommets varmebalanse [15].	13
3.1. Faktorer som påvirker inneklima.	21
3.2. Bekledningsnivåets påvirkning av effekt. Utdrag fra Byggforsk Byggdetaljer 421.501. [28]	23
3.3. Metabolisme for aktiviteter [27].	23
4.1. Materialelegenskaper til noen vanlige materialer ved 20 °C [40].	31
6.1. Arealdata i referansemodellen.	53
6.2. Inndata for bygningskroppen. Bygger på energiltak i byggeteknisk forskrift § 14-2 og § 14-3.	53
6.3. Verdier for oppbygningen av betonggulv fra NS-EN ISO 11855-2:2015. . .	54
7.1. Verdier for oppbygning av en tyngre gulvkonstruksjon inspirert fra TABS.	64
7.2. Varmetransport ut fra flatene i sonen.	64

1. Introduksjon

1.1. Bakgrunn og motivasjon

Dagens strømnnett blir presset av et stadig høyere forbruk [1]. Det har bidratt til å dra fokus og bevissthet fra energiforbruk mot effektforbruk og økte effekttopper. De mange brukerne, økende andeler elektriske transportmidler, hurtigladere, induksjonsapparater og ENØK (energiøkonomisering) bidrar alle til et høyere maksimalforbruk på strømnettet [2]. Innføringen av AMS (avanserte måle- og styringssystem) gjør at strømselskaper kontinuerlig kan måle hvor mye strøm som blir brukt og dermed regulere prisen på strømmen fra time til time etter nettets belastning [3]. Dette er med på å øke fokuset på effektbruk i samfunnet. Til nå har den største delen av befolkningen blitt fakturert av strømforbruket basert på antall kWh, som måles manuelt av kundens strømmåler [4]. Fra Figur 1.1 er det en markant økning i maksimalforbruk av effekt fra 1980 til 2014 og trekker man en gjennomsnittlig linje vil det i 2030 forventes opp mot enda 40 % økning i forbruk [2]¹. Figur 1.1 viser blant annet at strengere energikrav og energibevissthet ikke er med å redusere et stadig høyere forbruk tilstrekkelig nok til at det kan håndteres av det eksisterende strømnettet.

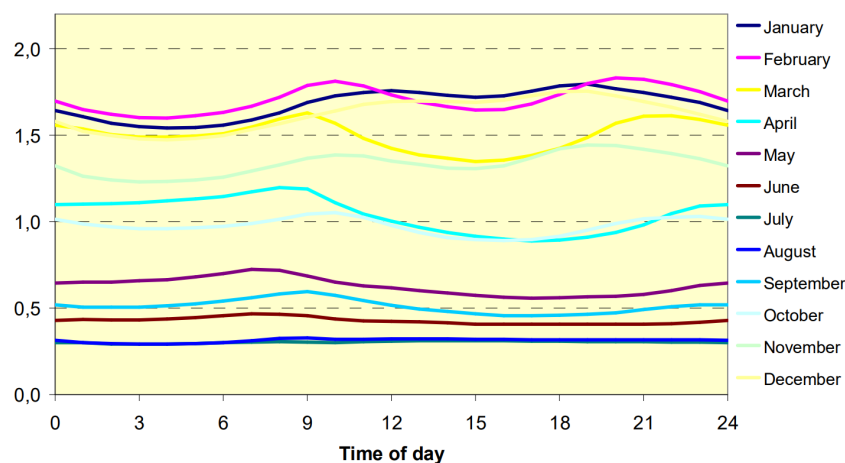


Figur 1.1.: Effektbruk og el-bruk i prosent stigning [2].

¹Mailutveksling 30.01.2019 med Dag Spilde, NVE - Norges vassdrags- og energidirektorat

Med en slik økning på forbruket er kapasiteten i nettet i ferd med å bli brukt opp. Det vil bli gjort en investering og utbygging av nettet de nærmeste årene som vil koste opp mot 140 millioner kroner innen 2023 [1]². Å investere og bygge ut strømmettet er kostbart mens det er relativt billig å drive det. Videre er det ønskelig å bruke det gamle nettet så lenge som mulig for å senke gjennomsnittskostnadene. Det trengs derfor tiltak til for å unngå en utbygging. Strømmettet er dimensjonert etter den timen i året hvor forbruket (effektuttaket) forventes å være høyest og dimensjoneringen er dermed avhengig av utviklingen i effektuttak fremover [1]. Det er essensielt å redusere effekttoppene til brukerne slik at man kan senke maksimalforbruket på sentralnettet.

Kundens varmebehov, belastningsmønster og varmetap varierer over år, uker og døgn. Døgnvariasjonen bli berørt av personers daglige rutiner, som for eksempel dusjing om morgenen og matlagning på ettermiddagen. Kontor- og industrilokaler har oppvarmingsbehov som skaper store effektpådrag i perioder. Områder som hovedsakelig består av næringsbygg vil ofte ha en annen forbruksprofil over døgnet sammenlignet med boligområder. Næringsbygg består ofte av en tung konstruksjon og har en mer predikativ bruksprofil. Figur 1.2 viser hvordan det gjennomsnittlige effektbehovet totalt varierer per dag over året. Diagrammets kurver er inndelt på månedsbasis og viser at månedene desember til mars svinger betraktelig mer enn de øvrige månedene. Dette skyldes at disse månedene er de med størst skille mellom dag- og nattemperatur sammenlignet mot de varmere månedene i året. [5]



Figur 1.2.: Månedlig variasjon i effektuttak [5].

²Jf. NVE (2013), NVE (2014) og Statnetts nettutviklingsplan.

Et gulvvarmesystem har potensial til å kunne styres mer effektivt mot nettopp det å senke effekttoppene. Det brukes store mengder effekt tidlig om morgenen for å få inneklimate opp til en romtemperatur som tilfredsstillter termisk komfort. I store bygg, spesielt industribygg, kreves det dermed store effektpådrag. Det kan blant annet integreres driftsstrategier som gjør det mulig å redusere distribusjonstapet, sørge for at den dynamiske varmeoverføringen blir fleksibel og systemet kan driftes mer strategisk.

1.2. Formål og problemstilling

Oppgaven går ut på å utforske potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner og aktivt bruke dette for å jevne ut effekttopper ved bruk av vannbåren gulvvarme. Formålet med oppgaven er å bidra til å sette et større fokus på effekt og effekttopper, samt forsøke å finne løsninger slik at man kan neddimensjonere gulvvarmesystemet av økonomiske og miljømessige hensyn. For å bidra til innsikt på dette området blir det studert relevant litteratur for å avdekke hvordan styring og regulering av gulvvarmesystemet blir gjort i dag. I tillegg søkes det å avdekke hvordan man kan utnytte den termiske lagringskapasiteten i bygget for å redusere effekttoppene, uten at det går på bekostning av den termiske komforten. Vi søker å forstå om tregheten i bygningsmassen kan bidra til å fordele effektpådraget og dermed legge et grunnlag for utvikling av mer effektive reguleringsystemer. Dette innebærer å konstruere en simuleringsmodell som kan benyttes til å undersøke samspillet mellom pådraget på et gulvvarmesystem og konstruksjonens termiske masse, samt om tregheten til den termiske massen kan utnyttes. Problemstillingen denne oppgaven belager seg på er:

Er det mulig å utnytte den naturlige tregheten i termisk tunge konstruksjoner for å jevne ut effekttopper ved bruk av vannbåren gulvvarme, uten at det går på bekostning av termisk komfort?

1.3. Begrensninger

I all hovedsak begrenser oppgaven seg til å utforske potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner. Forutsetningene våre er at vi ikke kan endre bruksmønsteret til et

eksisterende operativt kontorbygg, og det vil dermed bli benyttet simuleringsmodeller til å basere analysen på. En følge av dette er at oppgaven fokuserer kun på løsninger som kan implementeres uten at det stilles krav til strukturelle endringer. Dette innebærer at vi hovedsakelig fokuserer på pådragsstyring og simplifiserer modellen slik at vi kun får ut relevant data. Det vil kun bli sett på oppvarming ved bruk av vannbåren gulvvarme.

1.4. Metode

Oppgaven består av to hovedelementer som omfatter både sammenfatning av relevant litteratur og bruken av simuleringsverktøyene IDA ICE (IDA Indoor Climate and Energy) og MATLAB. Litteraturstudiet omfatter alt fra læreboklitteratur, vitenskapelige rapporter og tidligere master- og doktorgradsoppgaver, til informasjonskilder som datablader og artikler. Dette utgjør grunnlaget for oppgaven og har i all hovedsak blitt funnet gjennom NTNUs Universitetsbiblioteks nettbaserte database, men også gjennom fagbøker og kontakt med bedrifter.

Den andre delen i oppgaven omhandler effektsimulering av en enkel sone. IDA ICE, er et dynamisk simuleringsverktøy som brukes til å analysere bygningers ytelse med hensyn på energibruk og termisk inn klima. Det er et tredimensjonalt simuleringsprogram som tillater flersonesimuleringer på en modell av vilkårlig geometri. Programmet er basert på moduler som beskriver virkemåten til den enkelte parameter og bygningskomponent. Dette innebærer parameter som temperaturpunkt, intensitet på internlast og bruksmønster. Disse kan defineres for de enkelte sonene, mens tekniske spesifikasjoner for bygningskroppen kan defineres for alle sonene under ett. Dette gir mulighet til å foreta detaljerte simuleringer, samt kontrollere og loggføre ønskede parametere med svært detaljerte simuleringsresultater.

En modell i IDA ICE kan ha en høy kompleksitetsgrad, noe som fører til at det er svært arbeidskrevende å konstruere en velfungerende modell. Dette gjør at IDA ICE fort blir for avansert for mange prosjekter. I denne oppgaven er vårt fokus på én spesifikk sone med en-dimensjonal varmetransport fra gulvvarmen og opp mot oppholdssonen. IDA ICE fungerer til vårt formål siden programmet gjør det mulig å simplifisere og kun gi ut informasjon som er nødvendig.

1.4.1. Metode for litteraturstudie

Et litteraturstudie er en systematisk innhenting og tolkning av litteratur som relaterer seg til bestemte tema. Målet ved en slik omfattende prosess er å finne relevante og troverdige kilder som vil støtte og underbygge faglige områder relevante for denne oppgaven.

Det finnes forskjellige databaser og nettsider som blir sett på som mer pålitelige enn andre. Kilder funnet utenfor trofaste databaser skal det settes spørsmål til. Videre brukes relevante stikkord og temaer fra oppgaven til å søke etter kilder. Kilden velges om søkeordet treffer, det er en faglig relevans og om kilden virker troverdig. For å ytterligere forsikre seg om kilden er pålitelige kan en kryssreferanse gjennomføres. Om kilden er brukt i flere tidligere dokumenter vil kilden ses på som mer troverdig.

1.5. Struktur

Rapporten vil i oppgavens første del starte med å presentere resultatene fra litteraturstudiet i form av teorikapitler. Formålet med dette er å etablere et teoretisk grunnlag for reduksjon av effektbruk, generell dimensjonering og styring av golvvarme, samt hva som må til for å opprettholde byggets termiske inneklima. I kapittel 2 blir det gjennomgått grunnleggende informasjon om golvvarme tradisjonelt, før det gjøres rede for hva som definerer et termisk inneklima i kapittel 3. Kapittel 4 gjøres det rede for hvordan bygninger kan lagre varme og hvilke faktorer som påvirker lagringskapasiteten, før det nevnes tiltak som kan redusere effekttoppene i kapittel 5.

I oppgavens andre del vil det presenteres metoden for arbeidet gjort i IDA ICE og MATLAB. Kapittel 6 handler om oppsettet av modellen i IDA ICE og modellen i MATLAB i kapittel 7.

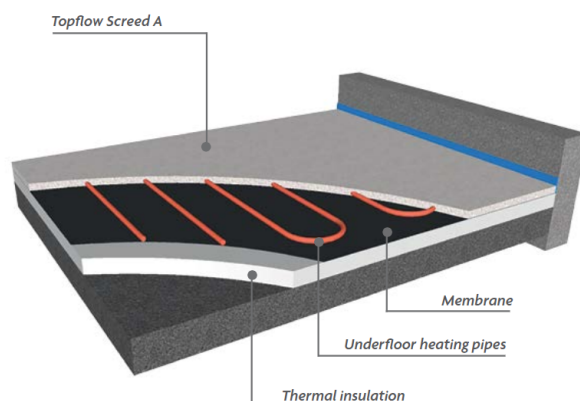
I den siste delen blir de gjennomførte resultatene fra IDA ICE og MATLAB presentert i kapittel 8. I kapittel 9 vil det bli diskusjon rundt metodene brukt og de presenterte resultatene før konklusjon og våre tanker om videre arbeid i kapittel 10.

Del I.

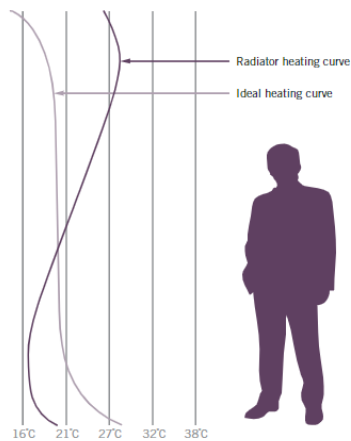
2. Introduksjon til gulvvarme

Et gulvvarmesystem kan bidra til et energieffektiviserende tiltak samtidig som det forbedrer brukerens termiske komfort. Det finnes to typer gulvsystem, elektrisk og vannbåret. I denne oppgaven fokuserer vi kun på bruk av et vannbåren systemet vist i Figur 2.1. Et vannbårent system består av et nettverk av rør som inneholder varmemedie i en lukket sløyfe som ligger nedstøpt i en avrettingsmasse eller betong. I motsetning til en elektrisk løsning, kan et vannbårent system brukes til både oppvarming og kjøling. Når vannet avkjøles via varmeveksling, tømmes denne energien til rommet primært gjennom stråling, men også konveksjon og ledning. Det er denne termiske ledningsevnen til massen rørene ligger i som bestemmer reaksjonstiden. Returvannet blir deretter oppvarmet til driftstemperatur og resirkulert gjennom systemet. [6]

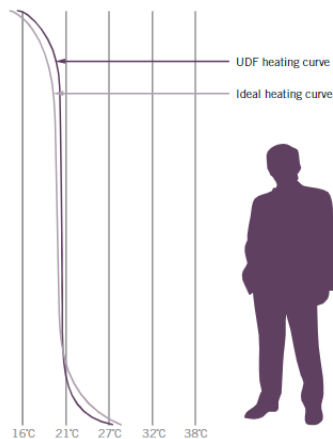
Et vannbårent system utstråler varme til lavere temperaturobjekter og overflater. Gulvets store overflater betyr at en lav til moderat gulvtemperatur kan gi nok strålevarme til å opprettholde en behagelig temperatur for okkupantene. Strålevarmebidraget betyr at lufttemperaturen kan være lavere for å oppnå det ekvivalente komfortnivået som et varmtilluftssystem fordi det ikke forstyrrer den interne luftstrømmen i bygningen. Lav luftbevegelse minimerer sirkulasjon av støvpartikler som resulterer i en redusert følelse av tørr luft. Gulvvarmen fordeler varmen i rommet gjevenere enn et radiatoranlegg vist i Figur 2.2.



Figur 2.1.: Eksempel på oppbygging av gulvvarme [6].



Radiatorvarmens oppvarmingskurve satt opp mot den ideelle varmekurven.



Gulvvarmens oppvarmingskurve satt opp mot den ideelle varmekurven.

Figur 2.2.: Den ideelle oppvarmingskurven viser høyden som y-akse og temperatur som x-akse. Figuren er funnet i [7, 8, 9] og hentet fra [6].

2.1. Dimensjonering

Ved dimensjonering av et varmeanlegg trenger man å beregne en rørdimensjon som kan frakte vannmengden med en hastighet som dekker effektbehovet til rommet. Rørdimensjonen kan tas ut på en nøyaktig måte ved bruk av nomogram og formel eller bruk av en overslagsberegning, også kaldt forenklet metode. Ved den nøyaktige metoden brukes rommets effektbehov og temperaturforskjellen til å regne ut vannmengden, m , i l/s .

$$m = \frac{Q[kW]}{C_p \times (T_{tur} - T_{retur})} [l/s] \quad (2.1)$$

Der:

m Vannmengden

Q Effektbehov

C_p Spesifikk varmekapasitet

T_{tur} Temperatur på turvannet

T_{dut} Temperatur på returvannet

Dette effektbehovet kommer av bygningens varmebehov. Behovet avhenger av en rekke fysiske og sosiale forhold. De sosiale forholdene inngår menneskers adferd og varmeavgivelse. Fysiske forhold er uavhengig av mennesker og avhenger av faktorer som temperaturdifferansen mellom inne- og uteluft, vindstyrke, solinnstråling, isolasjonsstyrke og materialeegenskaper. Disse faktorene påvirker bygningens varmebalanse. [10]

Firmaer som dimensjonerer og leverer vannbåren gulvvarmesystemer i dag får ofte oppgitt en ferdig utført energibehovsberegning. Dette krever en inngående kjennskap til byggets konstruksjon og klimadata som ikke alltid er tilgjengelig.

2.1.1. DVUT - dimensjonerende vinter utetemperatur

For å beregne en bygnings effektbehov behøver man å kjenne til DVUT, Dimensjonerende Vinter Ute Temperatur. DVUT er den trolig laveste utetemperaturen og beskriver den middeltemperaturen som varer i minst ett døgn. NS-EN ISO 15927-5 handler om beregning og presentasjon av klimadata. Beregningssettet går ut på at temperaturen underskrider det dimensjonerende været som har oppstått maksimalt 30 ganger i løpet av en 30 år lang periode [11]. DVUT velges ut for å passe bygningens tidskonstant og geografiske plassering. En tyngre bygningskonstruksjon og en bedre isolering gjør at innetemperaturen påvirkes mindre av utetemperaturen. [12, 13]

2.1.2. Varmebalanse

Når det oppstår temperaturdifferanse mellom inne- og uteluften til et bygg, vil varme strømme mot det området med lavest temperatur. Varmetapet vil slutte når

temperaturdifferansen er lik null. For å motvirke varmetapet og fall i innetemperatur må varmesystemet tilføre en motvirkende varmeeffekt. Dette effektbehovet bestemmes etter summen av varmetap og varmetilskudd/overskuddsvarme. Transmisjon, infiltrasjon og ventilasjon kan føre til varmetap, mens internlaster, eksterne laster og personbelastninger gir varmetilskudd. Transmisjon er varmetap gjennom flater av klimaskjermen, vist ved følgende ligning. [14]

$$\phi_T = A \times U \times (T_r - T_{dut})[W] \quad (2.2)$$

Infiltrasjon, vist ved ligning (2.3), er luftstrøm/luftlekkasje fra omgivelsene inn til rom, ligning. Ventilasjonsluften utgjør enten varmetilskudd eller varmetap etter temperaturen til luften.

$$\phi_I = n \times V \times C_p \times \rho \times (T_r - T_{dut})[W] \quad (2.3)$$

Der:

ϕ_T Varmetap fra transmisjon

ϕ_I Varmetap fra infiltrasjon og ventilasjon

T_r Romtemperatur

T_{dut} Dimensjonerende ute temperatur

n Antall luftutskiftninger per time

V Volumet av luftlekkasjen

A Arealet til flate

U Varmegjennomgangskoeffisient

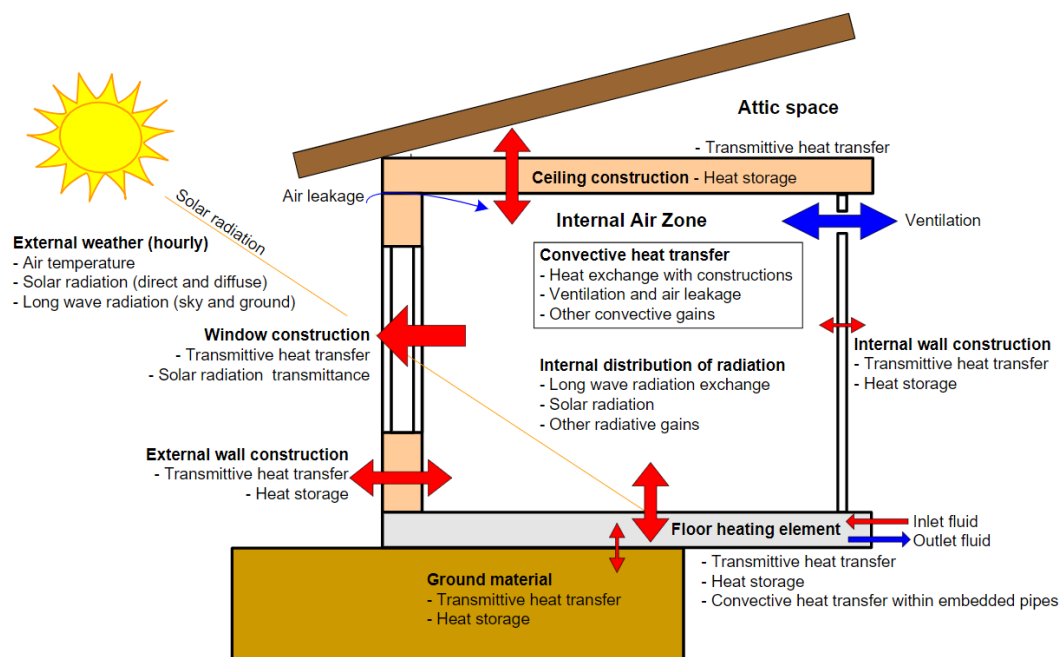
C_p Spesifikk varmekapasitet

ρ Massetetthet

Rommets interne laster er varmetilskudd fra interne kilder, ϕ_{in} . Dette er en kombinasjon av både fysiske og sosiale forhold. Tilskuddet inkluderer varmestråling fra belysning, utstyr og personer. Eksterne laster er varmetilskudd fra eksterne kilder, ϕ_{eks} . Varmen som gis til rommet er dermed kun bestemt av fysiske forhold vist i Tabell 2.1 og illustrert i Figur 2.3. [15]

Tabell 2.1.: Faktorer i rommets varmebalanse [15].

Ledd i balansen	Påvirkes av
Varmetap:	
Transmisjon gjennom omhullingsflatene	U-verdi og form
Infiltrasjon, luftlekkasjer	Lufttetthet
Varmetilskudd:	
Lys og utstyr	Utstyrsmengde og effektivitet
Solinnstråling	Antall personer og aktivitet
Romoppvarmingsanlegg	Vindusløsning, orientering og avskjerming
Varmelagring:	
Bygningskonstruksjoner	Varmekapasitet og overflate
Møbler	Varmekapasitet og overflate



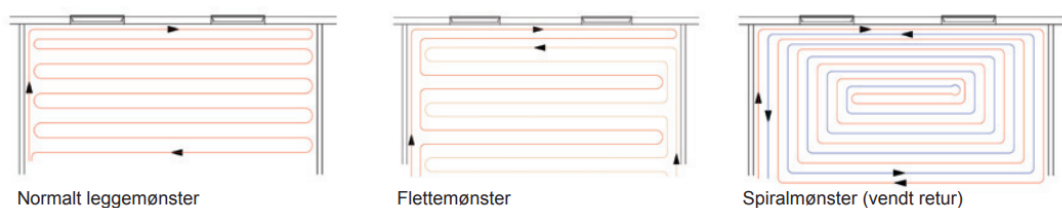
Figur 2.3.: Illustrerer noen av de dynamiske interaksjonene som påvirker den vannbårene gulvvarmen fra et termisk synspunkt [16].

2.1.3. Overflatetemperatur

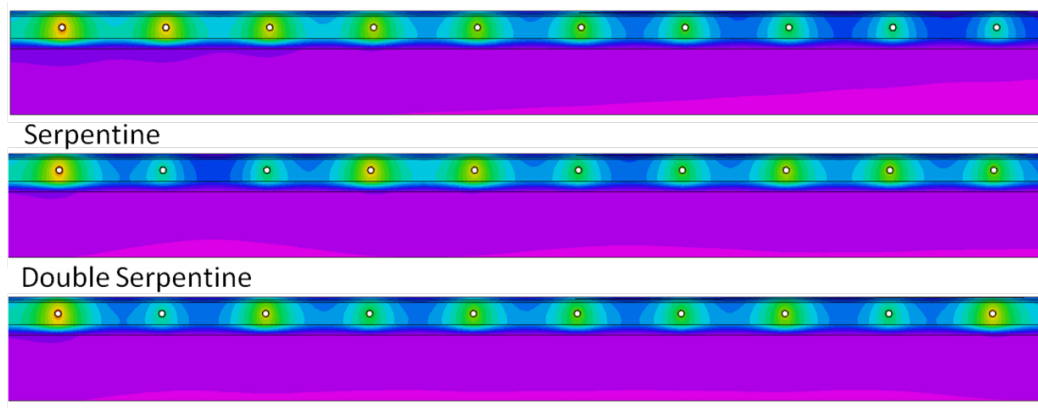
Gulvvarme kan ligge under mange forskjellige typer gulv. Betong, påstøp på bærende dekke og på de fleste type tregulv fordi det er et lavtemperatursystem som varmer opp gulvet skånsomt og jevnet. I NS-EN 1264-2:2008 beskrives det at den maksimale overflatetemperaturen i oppholdssoner er $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, men forskjellige typer tregulv kan komme i fare for uttørking ved for høye temperaturer. Mange leverandører oppfordrer å holde temperaturen under $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ i disse tilfellene. Betonggulv, som er fokuset i oppgaven, har ikke denne begrensningen. I boken Inneklimateknikk skriver Stensaas at overflatetemperaturen kan sette så høyt som $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]. For å levere nok energi til overflaten slikt at man opprettholder rommets temperatur, er det anbefalt et effektbehov mellom $30\text{-}50\text{ W/m}^2$. [18, 19]

2.2. Leggemønster

Når man legger gulvvarme er det en rekke mønster man kan velge mellom, illustrert i Figur 2.4. Målet er å ha en jevn overflatetemperatur igjennom rommet. For å oppnå dette må man ta hensyn til gulvmateriale og temperaturltap. Varmeavgivelsen kan påvirkes i forskjellige soner på gulvflaten. I dag brukes det ofte egne beregningsprogrammer til dimensjonering og valg av leggemønster. [6]

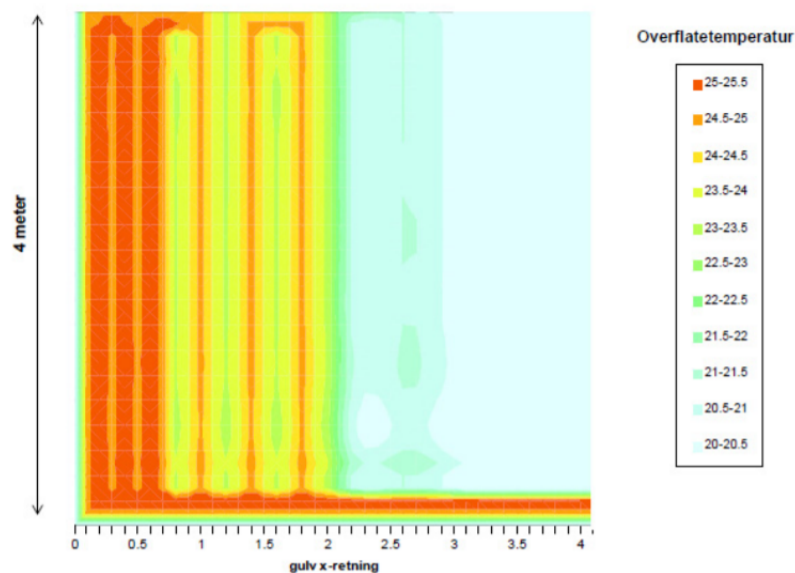


Figur 2.4.: Eksempel på leggemønster [20].



Figur 2.5.: Serpentine - Normal, Double Serpentine - Flettemønster og Counter flow – Spiralmønster [21].

Fotbladet kan registrere en temperaturforskjell helt ned mot $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22]. I situasjonen illustrert i Figur 2.5, vil okkupanter i rommet merke en tydelig forskjell på overflatetemperaturen. Dette kan påvirke deres termiske komfort. Figur 2.6 viser eksempel av lagt gulvvarme med dårlig fordeling av varme gjennom overflaten. [22]



Figur 2.6.: Eksempel på feil dimensjonert gulvvarmeløsning [22].

2.3. Regulering

Styringssystemer for dagens vannbårne gulvvarmesystemer blir i hovedsak styrt av aktuatorer på en fordeler som får signal fra rom- eller gulvfølere. En aktuator er en teknisk innretning som får inn et styresignal for så å utføre en mekanisk bevegelse, som i dette tilfelle kan være å styre en ventil. Enkelte anlegg kan også styres helt uten romfølere. Disse er basert på en utendørs temperaturføler som styrer varmekildens fyringskurve. I disse systemene er det avhengig av at dimensjoneringen og innreguleringen av rørsløyfene er utført korrekt for en effektiv drift [23]. En annen mulighet er at det monteres en selvregulerende aktuator på fordeleren som justerer vannmengden slik at en ΔT på 5 °C opprettholdes. Dette er en modulerende aktuator med følere som kobles til tur- og returrøret på gulvvarmesløyfen som gjør innreguleringen av rørsløyfen overflødig³.

De to vanligste reguleringsmetodene er temperatur- og mengderegulering.

2.3.1. Temperaturregulering

Det som avgjør hvor stor varmeeffekt et system kan levere er temperaturdifferansen på tur- og returvannet. Returvannets temperatur er vanskelig å kontrollere direkte fordi det avkjøles i rørsløyfen fra utgangen av turvannet. Det betyr at varmeeffekten og temperaturen må reguleres i turvannet. [23]

2.3.2. Mengderegulering

Ved mengderegulering endres volumstrømmen gjennom varmeavgiveren for å regulere varmeavgivelsen. Termostatiske ventiler regulerer vannmengden for å opprettholde konstant temperatur på mediet. [23]

³Mailutveksling 07.05.2019 med Torstein Hofvind Solhaug, Teknisk inneselger / Produktsjef luft- og smussutskillere, Armaturlonsson

2.4. Varmepumpe som styring

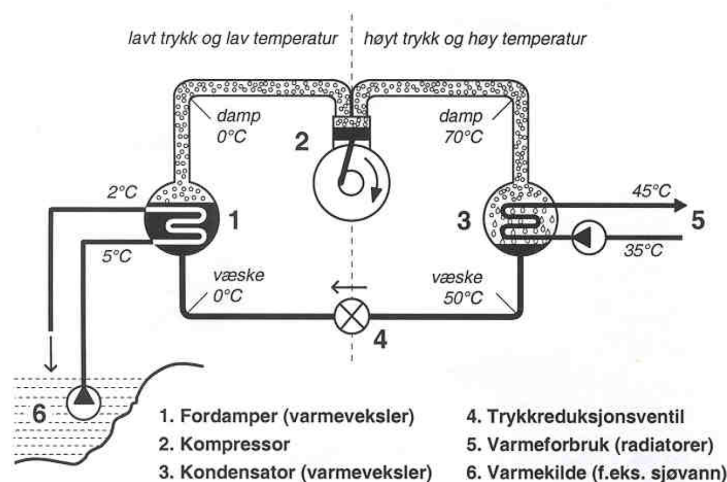
Det blir ikke forsket direkte på varmepumpestyring av det vannbårne gulvvarmesystemet i denne oppgaven, men den generelle forståelsen for hvordan alt henger sammen som system er nødvendig. En varmepumpe benyttes for å utnytte lavverdig omgivelsesvarme (fornybar energi) som eksempelvis grunnvann, sjøvann, jord og fjell eller former for overskuddsvarme som eksempel ventilasjonsluft, avløpsvann og kjølevann.

2.4.1. Virkemåte

En varmepumpe består hovedsakelig av fire komponenter – fordamper, kompressor, kondensator og strupeventil. Varmepumpen bruker et arbeidsmedium eller prosessmedium som sirkulerer i en lukket rørkrets. Energi blir hentet fra en lavtemperatur varmekilde og leverer dette ved en høyere temperatur til forbrukeren. Arbeidsmediet gjennomgår en kontinuerlig lukket krets med ulike tilstandforandringer videre forklart under og illustrert i Figur 2.7: [24]

1. Ved innløpet til varmeveksleren, **fordamperen**, er arbeidsmediet i en væskefase med trykk så lavt at mediet holder en lavere temperatur enn varmekilden. De energistrømmene fra varmekilden føres til arbeidsmediet som begynner å fordampe på grunn av temperaturforskjellen. Ved utløpet av fordamperen befinner mediet seg i en gassform fordi varmekilden har overført varmemengde med økt energiinnhold i arbeidsmediet (væske \rightarrow gass).
2. Arbeidsmediet som nå befinner seg i en gassfase suges inn i en **kompressor** hvor trykket blir økt som fører til en temperaturøkning på gassen. Energimengden som tilføres kompressoren går med til å øke energiinnholdet i gassen. Trykket i kompressoren er lavt slik at energi kan overføres fra varmekilden til arbeidsmediet (gass \rightarrow gass).
3. I en gassfase med høyt trykk og en høy temperatur strømmer arbeidsmediet over en ny varmeveksler, **kondensator**, som overfører termisk energi til mediet. Dette er fordi arbeidsmediet holder en høyere temperatur enn mediet som skal varmes opp (eksempel vann i en gulvvarmekrets eller radiator) (gass \rightarrow væske).

4. Arbeidsmediet som nå befinner seg i en væskefase med et høyt trykk, samt en høy temperatur, strømmer over en trykkreduksjonsventil, **strupeventil** som senker trykket og dermed temperaturen på mediet (fordampningstrykk og -temperatur). Arbeidsmediet strømmer så i væskefase til fordamperen og gjentar kretsløpet på nytt (væske → væske).



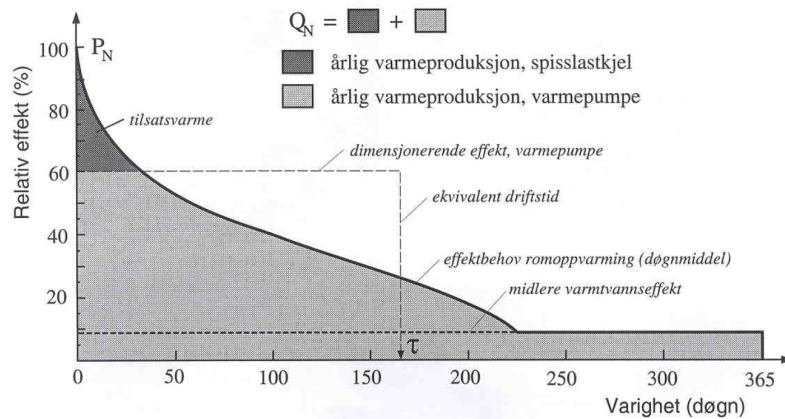
Figur 2.7.: Prinsipiell skisse av et varmepumpeanlegg [24].

2.4.2. Dimensjonering og prosjektering

Riktig dimensjonering, utforming og styring av et varmepumpeanlegg er vesentlig for å opprettholde en lønnsomhet. Dette er enda viktigere enn i et system med konvensjonelle kjelsentraler. Et varmepumpeanlegg bruker evnen til å spare høyverdig energi. Det er derfor viktig med en tverrfaglig kompetanse for prosjektering, installasjon og drift på grunn av anleggets kompleksitet.

Et varmepumpeanlegg har typisk tre til fem ganger høyere varmeytelse enn et konvensjonelt fyringsanlegg. En varmepumpe som er dimensjonert til å dekke et maksimalt effektbehov, vil være et kostbart anlegg med dårlig utnyttelse. Et slikt anlegg vil få en lavere årsvarmefaktor på grunn av lavere virkningsgrad. En varmepumpe dimensjoneres derfor for å dekke et netto effektbehov (grunnlast) med en tilsatsvarme (spisslast) som leveres fra et kjelanlegg (elektrisk, olje, gass), vedovn eller panelovner. [24]

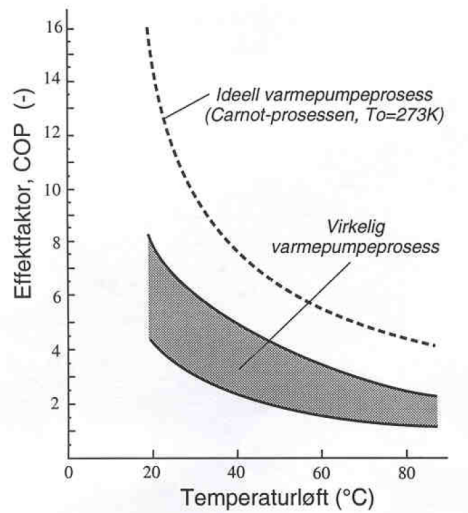
En optimal effektdekning er avhengig av eksempelvis bygningens netto effekt- og energibehov og energipriser. Et varmepumpeanlegg kan typisk utgjøre 40-70 % av en bygningens netto effektbehov og varmepumpen vil da dekke 90-95 % av bygningens årlige oppvarming, mens resterende 5-10 % blir levert av spisslastkilden vist i Figur 2.8. Spisslasten skal dimensjoneres slik at den kan dekke hele effektbehovet i tilfelle en driftsstans eller service på varmepumpen. [24, 25]



Figur 2.8.: Fremstilling av varmepumpens effekt- og energidekning [24].

2.4.3. Effektfaktor, COP

Effektfaktoren COP (Coefficient of Performance), uttrykker varmepumpens evne til spare høyverdig energi ved de ulike driftstilstandene. Denne angir det forholdet mellom den avgitte varmeeffekten og den tilførte elektriske effekten til kompressoren. Varmepumpens temperaturløft er det som avgjør effektfaktoren. Det som menes med temperaturløft er temperaturforskjellen mellom fordampningstemperaturen og kondenseringstemperaturen. Et lavt temperaturløft gir en høy effektfaktor, som vist i Figur 2.9.



Figur 2.9.: Effektfaktor (COP) med hensyn på temperaturløft [24].

2.4.4. Regulering og drift

Et korrekt styrt og regulert anlegg er vesentlig for å spare energi og ha et system med lavest mulig kostnader. Et varmpumpeanlegg som er overdimensjonert for et anlegg og kun går på en lav driftstilstand, vil ikke utnytte sitt fulle potensiale og vil dermed ha en dårligere virkningsgrad enn en varmpumpe som har riktig driftstilstand.

Det har vært tidligere prosjekter hvor det er installert varmpumper som ikke har gitt en så god utnyttelse og energisparing som forventet. Dette skyldes gjerne feil ved dimensjonering og oppkobling av anleggene, feil valgte systemløsninger og komponenter, at anleggene har kjørt på høyere turtemperatur enn nødvendig eller unødvendig innkobling av spisslasten. [24]

3. Termisk inneklima

En bygning har som oppgave å gi ly for vær og vind samtidig som det tilpasses aktivitetene som foregår i bygningen. Et inneklima skal være sunt og behagelig samtidig som det bidrar til en god helse, trivsel og prestasjonsevne. Det er viktig å opprettholde et godt inneklima for å unngå helseproblemer. Plager som hodepine, irritasjon av hud og slimhinner og unormal tetthet kan bety at en eller flere av faktorene nevnt ikke tilfredsstiller kravene for et godt inneklima. Det må tas tiltak i bygninger der disse symptomene er mer utbredt enn normalt. Hvordan man oppfatter inneklimaet varierer fra person til person. Individuer med allergier og annen overfølsomhet kan oppfatte inneklima på en helt annen måte enn andre. For at alle disse kravene skal være oppfylt kreves det god innsikt i bygningens interne og eksterne termiske forhold som påvirker varmebalansen. [26]

Inneklima er sammensatt av flere målbare fysiske, kjemiske og biologiske faktorer som påvirker bygningens kvalitet på inneklima illustrert i Tabell 3.1 [27].

Tabell 3.1.: Faktorer som påvirker inneklima.

Termisk miljø	Varme, kulde, trekk og luftfuktighet
Atmosfærisk miljø	Forurensning, luftkvalitet og friskluftmengde
Akustisk miljø	Støy, og oppfattelsen av tale og lyd
Aktinisk miljø	Belysning, stråling, elektriske felt og magnetiske felt
Mekanisk miljø	Ergonomi, skliskring og vibrasjoner

Denne oppgaven fokuserer på det termiske miljøet fordi de klimatiske forholdene som har en innflytelse på menneskets varmebalanse også påvirker energimengden bygninger bruker. Dette kapitlet forklarer de termiske inneklimaparameterne og hvordan kvaliteten på inneklimaet i en bygning oppleves og kan bedømmes av bygningens okkupanter.

3.1. Påvirkning av menneskers varmebalanse

De fire klimatiske faktorene som påvirker et menneskes generelle varmebalanse er: innendørs lufttemperatur, midlere stråletemperatur, luftfuktighet og lufthastighet. Et individs behov til termisk innemiljø vil variere og det er vanskelig å tilfredsstille alles behov. [28, 29]

- **Lufttemperatur** er den viktigste parameteren for termisk inneklima og er den enkleste å måle. Det er definert som den målte temperaturen uten påvirkning av varmestråling (tørrkuletemperatur). Store temperaturforskjeller mellom ankelnivå og hodenivå vil føre til termisk ubehag. Ifølge Arbeidsmiljølovens «Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen» er det anbefalt en lufttemperatur på 22 °C og under i de årstider det er behov for oppvarming. [28, 29]
- **Midlere stråletemperatur** er den strålingsutvekslingen som oppstår mellom en person og de omgivende flatene i rommet. Strålingsutvekslingen avhenger av overflatetemperaturen på de omgivende flatene og fører til varmetap hos mennesker. [28, 17]
- **Luftfuktighet** uttrykkes som absolutt eller relativ luftfuktighet. Den absolutte påvirker varmetap ved fordampning fra en person og uttrykkes som vandamptrykket i luften. Med en relativ luftfuktighet innenfor intervallet 20-60 % vil det ha liten innvirkning på inneklimaet. Ved luftfuktighet under 20 % kan det oppstå statisk elektrisitet, tørr hud, irriterte slimhinner og uttørking av materialer. Over 70 % er det fare for muggdannelse. [28, 29, 30]
- **Lufthastighet** i et rom påvirker en persons og omgivelsers varmeutveksling. En høy lufthastighet vil oppleves som trekk og vil gi en følelse av ubehag. Det vil også kreves en høyere lufttemperatur ved økende lufthastighet for å opprettholde termisk komfort. [28, 17]

3.1.1. Bekledning og aktivitet

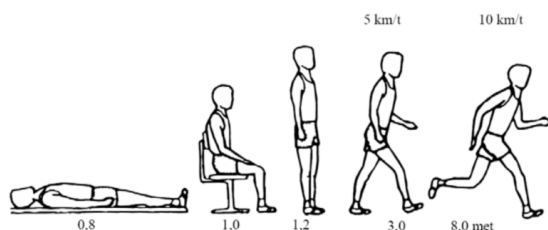
Bekledning og aktivitet har en stor påvirkning på om et inneklima oppleves som optimalt. Bekledning isolerer kroppen til et menneske og gir muligheten til å regulere varmetapet. *Clo*

er varmeledningsmotstanden i bekledding, der 1 clo er standard innendørs vinterbekledding og 0,5 clo er lett sommerbekledding. Selv små endringer i bekleddingen kan gi utslag på et menneskes komfort på grunn av at vi er svært sensitive ovenfor endringer i isolasjonen som Tabell 3.2 viser.

Tabell 3.2.: Bekleddingsnivåets påvirkning av effekt. Utdrag fra Byggforsk Byggdetaljer 421.501. [28]

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

Menneskekroppens metabolisme og varmeproduksjon påvirkes av aktivitetsgraden. Figur 3.1 og Tabell 3.3 viser at når intensiteten på en aktivitet øker, øker også varmeproduksjonen. Varmeproduksjonen avhenger også av person, alder, helse og kjønn. Metabolisme bruker benevnningen *met* der 1 met tilsvarende aktivitetsnivå for en stillesittende person.



Figur 3.1.: Metabolisme med økt grad av aktivitet [27].

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 3.3.: Metabolisme for aktiviteter [27].

3.2. Termisk komfort

Termisk komfort er et begrep som beskriver en persons tilfredshet med rommets termiske omgivelser. En person vil kun oppleve et tilfredsstillende inneklima om man er i termisk komfort. Dette er en sinnstilstand som varierer fra person til person. Faktorer som operativ temperatur, lufthastighet, luftfuktighet og temperaturdifferansen mellom gulv og hodehøyde er faktorer med stor påvirkning. Personlige faktorer som klær, aktivitet og

egen metabolisme har også innvirkning. Det kreves god innsikt i disse forholdene for å holde byggets okkuperanter tilfredsstilt.

3.2.1. Operativ temperatur og bedømmelseindeks for termisk komfort

PMV (Predicted Mean Vote) og PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) er to komfortindekser som brukes for å indikere den termiske opplevelsen en tilfeldig gruppe mennesker har av et gitt termisk inneklima. Disse to indeksene er basert på Fangers empiriske undersøkelser, som i dag er en standardmetode for å vurdere inneklimaet [27]. Fangers ligning går ut på at man avleser en optimal operativ temperatur med visse forhold som relativ fuktighet, aktivitet og lufthastighet [31, 32].

PMV går ut på at gruppen selv får definere sin egen følelse av inneklimaet på en 7-trinns psykofysisk skala mellom -3 til 3 (heltall) der 0 er termisk nøytralt. -1/+1 angir noe ubehag grunnet lett kjølig og lett varm, mens de øvrige verdiene representerer en økende andel misnøye for kalde eller varme omgivelser (-3, -2, +2, +3). Beregning av PMV er fullstendig vist i NS-EN ISO 7730.

$$PMV = (0,303 \times e^{-0,036M} + 0,028) \times ((M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}) \quad (3.1)$$

Der:

M Metabolisme

W Arbeid (settes i de fleste tilfeller lik 0)

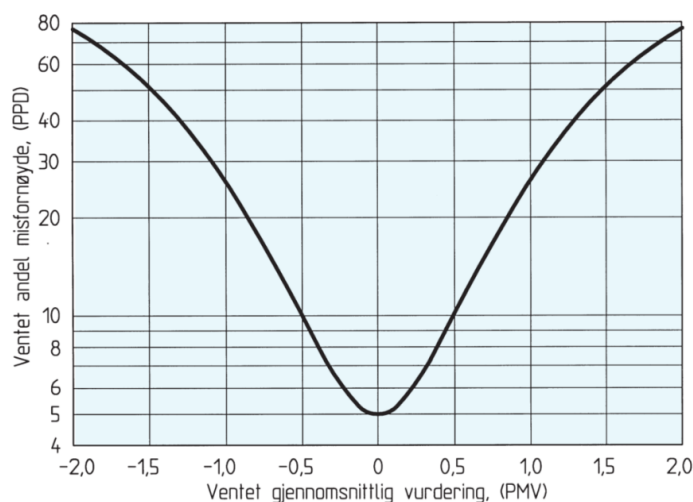
H Tørt varmetap

E_c Varmetap fra fordunsting og diffusjon fra huden ved opplevd termisk nøytralitet

E_{res} Varmetap ved fordampning av fuktighet i utåndingsluft

C_{res} Varmetap, tørr utåndingsluft

PPD (Predicted percentage dissatisfied) er en indeks som estimerer en sannsynlig prosentandel misfornøyde blant personen i et termisk miljø med en gitt bekledning og aktivitet. For å kunne bedømme den termiske komforten brukes NS-EN ISO 7730 til å utlede en PPD-indeks ut ifra PMV-verdien. Ved en kjent PMV-verdi kan man avlese PPD-verdien av diagram i Figur 3.2 som viser sammenhengen mellom de to indeksene. Her er det hvert å merke seg at selv om den gjennomsnittlige PMV-verdien er 0, forventes det en andel misfornøyde på 5 %.



Figur 3.2.: Sammenheng mellom PMV og PPD fra Byggforsk Byggdetaljer 421.501 [28].

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2) \quad (3.2)$$

Ifølge NS-EN ISO 7730 er det krav til en ventet andel misnøye og en ventet gjennomsnittlig vurdering. Et inneklima som har PMV- og PPD-verdier som ligger i intervallet med en ventet andel misfornøyde under 10 % og en ventet gjennomsnittlig vurdering mellom -0,5 og +0,5, er innenfor akseptable krav. Disse kriteriene gjelder for kroppens helhetlige opplevelse av termisk komfort. [27]

Operativ temperatur, vist ved ligning (3.3) er et mål på den opplevde innetemperaturen og beregnes ved å ta gjennomsnittet av lufttemperaturen og omgivende overflatetemperaturer (middelstråletemperaturen). Om forskjellen på både middelstråletemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4 °C, luftfuktigheten mindre enn 2 m/s og luftfuktigheten

er minimal, blir forskjellen på den operative temperaturen og lufttemperaturen så liten at det ikke er vesentlige forskjeller [28]. Dette fører til at man kan forholde seg til kun ett inneklimaparameter og ikke fire [30].

$$\text{Operativtemperatur} = t_0 = \frac{\alpha_k \times t_L + \alpha_s \times t_s}{\alpha_k + \alpha_s} \quad (3.3)$$

Ofte kan man sette en tilnærming hvor konveksjon = stråling ($\alpha_k = \alpha_s$) uten store feil. Dette gir følgende ligning (3.4):

$$t_0 = \frac{t_L + t_{FM}}{2} \quad (3.4)$$

Der:

α_k Varmerovergangskoeffisient konveksjon

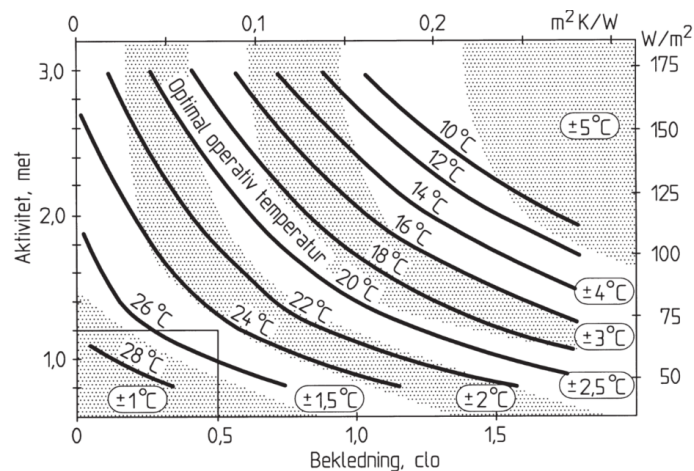
α_s Varmerovergangskoeffisient stråling

t_{FM} Middelstråletemperatur [K]

t_L Lufttemperatur [°C]

t_s Strålingstemperatur [°C]

Figur 3.3 viser sammenhengen mellom den operative temperaturens variasjon med ulike bekledningsnivå (clo) og aktivitetsnivå (met) i et diagram. Den forventede gjennomsnittlige vurdering (PMV) lik 0 gir den optimale operative temperaturen. Diagrammet forutsetter en relativ luftfuktighet på 50 % og en lufthastighet mindre enn 0,1 m/s. De sorte heltrukne linjene viser en optimal operativ temperatur ved et gitt aktivitetsnivå og bekledding. De mørke og hvite feltene markerer et temperaturintervall hvor den optimale operative temperaturen har en PMV mindre enn 10 %. Tilsvarende diagram for PPD finnes i NS-EN ISO 7730.



Figur 3.3.: Optimal operativ temperatur med hensyn på aktivitet og bekledding [33].

3.3. Komfortbedømmelse i IDA ICE

I dette kapittelet er det beskrevet de fleste parametere som simuleringsverktøyet IDA ICE inkluderer ved en dynamisk modellering. IDA ICE loggfører blant annet lufttemperatur, strålingstemperatur, lufthastigheter og relativ luftfuktighet. Disse blir kontinuerlig loggført for hver time i sonen. Brukeren kan definere bekleddings- og aktivitetsnivået slik at den termiske komforten kan beregnes av programmet.

Etter et simuleringsintervall får man ut detaljert informasjon om de forskjellige parameterne i sonen. Dette gjør at brukeren kan analysere kvaliteten på inneklimaet ved å se på temperaturforløp, luftstrømmer, varmestrømmer og finne faktorer som er med på å påvirke inneklimaet negativt.

PDH (Hours of people dissatisfied) er IDA ICE sitt mål på hvordan inneklimaet oppleves. Den totale summen av timene som okkupantene i sonen er tilfreds med kvaliteten på inneklimaet, er det som benevnes med PDH. Det er også mulig å hente ut dynamiske tabeller og kurver som viser PPD- og PMV-verdier. [34]

4. Termisk masse som varmereservoar

Termiske masser har potensiale til å lagre store mengder termisk energi på grunn av materialets høye varmekapasitet og lave konduktivitet. For å utnytte denne kapasiteten, er det gunstig å studere hvordan denne termiske energien lagres. [35]

4.1. Varmelagringsprinsipper

Det finnes tre forskjellige prinsipper for varmelagring i termisk masse. Sensibel varmelagring, latent varmelagring og kjemisk varmelagring.

4.1.1. Sensibel varmelagring

Den mest brukte formen for termisk energilagring er sensibel varmelagring. Under sensibel varmelagring vil temperaturen i lagringsmediet gradvis endres samtidig som det lades eller utlades. Denne temperaturendringen er det som kjenner ut lagringsmetoden og blir ofte betegnet som følbare varme. Sensibel varmelagring utnyttes best om det brukes materialer med høy varmekapasitet og en ikke alt for lav konduktivitet. Mur, vann og betong er gode eksempler på slike materialer. Ligningen (4.1) gir mengden varme som kan lagres i et materiale. [36, 37]

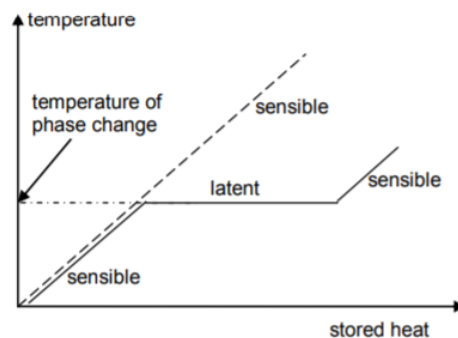
$$Q = m \times C_p \times \Delta T = \rho \times C_p \times V \times \Delta T \quad (4.1)$$

Formelen beskriver materialets varmelagringspotensial. Lagret varmemengde, $Q[J]$, er avhengig av volumet, $V[m^3]$, og temperaturendringen, ΔT , i materialet, samt tettheten, $\rho[kg/m^3]$, og den spesifikke varmekapasiteten, $C_p[J/kgK]$. Egenskapene som bestemmer potensialet til materiale som termisk energilager, er tetthet og spesifikk varmekapasitet.

4.1.2. Latent varmelagring

Latent varme er varmen som lagres eller frigjøres når et materiale går igjennom en faseendring. Ved bruk av faseendringmateriale PCM (Phase-Change Material) som lagringsmedium i bygninger, kan man lagre termisk energi i konstruksjonen. Når et fast stoff varmes opp til temperaturer over smeltepunktet, absorberer det varme og smelter. Den varmeenergien driver faseovergangen og lagres i materialet. Gjennom faseovergangen holder materialet en konstant temperatur vist i Figur 4.1. Dette betyr at varmemengden lagret under faseendringen ikke kan måles ut ifra temperaturdifferanse. På grunn av de små volumendringene i faseovergangen er den lagrede varmen lik produktets masse, $m[kg]$, til materiale og entalpiendringene, $\Delta h[J/kg]$, under faseovergangen i ligning (4.2). [38, 37]

$$\Delta Q = \Delta H = m \times \Delta h \quad (4.2)$$



Figur 4.1.: Sammenheng mellom lagret varmemengde og temperatur for sensible og latente lagringsprosesser [36].

4.1.3. Termokjemisk varmelagring

Termokjemisk varmelagring utnytter entalpiendringen i reversible endo- og eksotermiske reaksjoner. Lagringsprosessene baserer seg på absorpsjon og adsorpsjon. Endotermiske reaksjoner krever energi mens eksotermiske reaksjoner frigir energi. Utvekslingen av denne varmeenergien forårsaker entalpiendringen. Ved bruk av spesielle termokjemiske materialer (Thermal Chemical Material), kan man utnytte lagringspotensiale i termiske energilagringssystemer (TES). [36, 37]

4.2. Lagringsstrategier

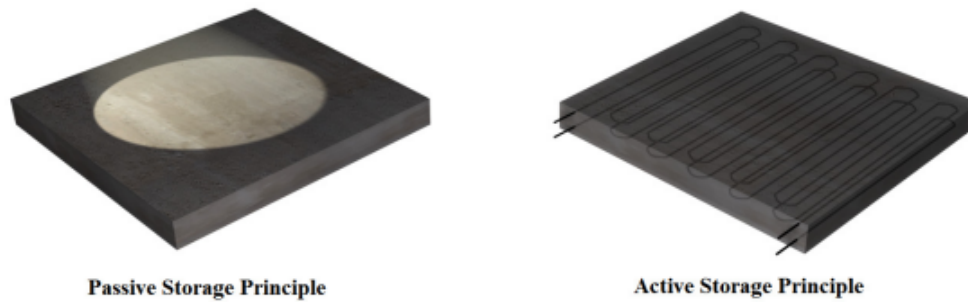
Formålet med lagring av energi er å opprettholde et tilfredsstillende inneklima uten å bruke unødvendige mengder energi. Gjennom døgnsyklusen til et bygg utsettes rom for varierende mengder termisk energi. Det er ønskelig å utnytte så mye som mulig av energien som tilføres rommet, men varmen genereres ikke alltid i samsvarer med behovet. Det oppstår ofte perioder med overskudd og perioder med underskudd. Lagret energi fra overskuddsperioder kan utnyttes i underskuddsperioder og jevner ut kjøle- og oppvarmingsbehovet. Termisk energi kan bli lagret med to prinsipper: aktiv og passiv lagring. Se Figur 4.2.

4.2.1. Aktiv lagring

Ved aktiv lagring overføres termisk energi inn i eller mellom materialet fra varmebærende væsker eller gasser ført i rørsystemer. Temperaturdifferansene mellom materialet og mediet starter varmeutveksling og temperaturen til materialet øker. Den termiske konduktiviteten, $\lambda[W/mK]$, til materialet hurtig den termiske energien trenger gjennom materialet. Det mest vanlige systemet er vannbåren gulvvarme. To fordeler med aktiv lagring er at man kan lagre energien i hele materialets tykkelse og det er mulig å oppbevare energilageret i et annet området enn hvor energien samles. Aktive lagringssystemer kan ikke tas i bruk i eksisterende bygninger uten drastiske endringer i gulv konstruksjonen. [37]

4.2.2. Passiv lagring

Passiv lagring er den mer tradisjonelle måten å lagre termisk energi. Her utnyttes den naturlige temperaturdifferansen som oppstår i bygninger. Termisk energi lagres i massen til gulv, vegger og objekter som er i rommet ved konveksjon, stråling og ledning. På samme måte som ved aktiv lagring, startes varmeutvekslingen mellom innnetemperaturen og de forskjellige massene i rommet. Varmekapasiteten til materialet bestemmer mengden termisk energi som tas opp i materialet, mens konduktiviteten bestemmer varmelagringsevnen. [37]



Figur 4.2.: Illustrasjon av passiv og aktiv lagring [37].

4.3. Lagringspotensiale i termisk masse

Termisk masse beskriver en bygnings evne til å absorbere energi, oppbevare den, og friggi den på et senere tidspunkt [39]. Så lenge massen er eksponert mot luft og det er en temperaturdifferanse vil sensibel varme overføres.

Spesifikk varmekapasitet, $C_p[J/kgK]$, er definert som den mengden varme som må til for å øke materialets temperatur med $\pm 1K$ [39]. Varmekapasiteten beskriver materialets varmelagringspotensial som vil si at materialer med høy varmekapasitet egner seg godt som energireservoarer. Bygninger beskrives som termisk tunge eller lette etter størrelsen på varmekapasiteten. Høy varmekapasitet for tunge og lav varmekapasitet for lette vist i Tabell 4.1.

Tabell 4.1.: Materialelegenskaper til noen vanlige materialer ved 20 °C [40].

Thermal capacities of some common SES materials at 20 °C ^a			
Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Volumetric thermal capacity (10 ⁶ J/m ³ K)
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.51
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

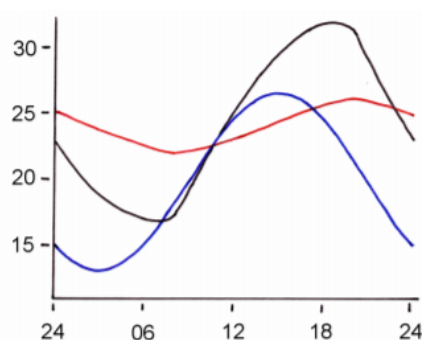
Termisk konduktivitet bestemmer varmeledningsevnen til materialet. Materialer med lav konduktivitet har evne til å transportere varme tregt og egner seg derfor godt som et energireservoar. Det er ønskelig å lagre termisk energi i en viss periode før det frigjøres tilbake til romluften slikt at det kan reagere videre på temperaturendringer. For lav konduktivitet er heller ikke ønskelig da varmelageret ikke vil respondere hurtig nok til å kompensere for endringene i innnetemperaturene.

Mineralull - har lav varmekapasitet og liten varmeledningsevne. Materialet brukes som isolasjon og egner seg derfor ikke som et energireservoar.

Stål - har god varmekapasitet, men leder samtidig varmen for godt. Dette betyr at energireservoaret lades og tømmes for raskt for å utnytte den termiske energien.

Tre - har også relativt god varmekapasitet, men leder varmen dårlig. Den dårlige ledningsevnen gjør at energireservoaret lades og tømmes for langsomt iforhold til å utnytte den termiske energien.

Betong og murverk egner seg veldig godt som energireservoarer. De har høy varmekapasitet og moderat varmeledningsevne. Mengden energi som kan lagres er stor og konduktiviteten gjør at energien frigjøres i samsvar med døgnsyklusen. [39]



Figur 4.3.: Simuleringsresultater av temperaturforløp for utetemperatur (blå), romluftstemperatur for standard lett konstruksjon (sort) og romluftstemperatur for tung konstruksjon med eksponert termisk masse (rødt) over et tidsintervall på 24 timer gjort av SINTEF. [39].

Figur 4.3 viser tydelig hvilken effekt utnyttning av lagringskapasiteten i tunge konstruksjoner har. I den lette konstruksjonen svinger romtemperaturen mellom $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ mens romtemperaturen i den tunge konstruksjonen kun svinger mellom $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Både oppvarmings- og kjølebehovet er betydelig redusert i den tunge bygningen siden konstruksjonen bruker lengre tid på å reagere på temperaturendringene. Dette viser at det er mindre energikrevende å opprettholde en jevn temperatur i den tunge konstruksjonen kontra den lette.

Konstruksjoner med høy termisk masse får mindre temperatursvingninger igjennom døgnet enn konstruksjoner med lav termisk masse. Ved bevisst utnyttelse kan overskuddsvarmen flyttes fra dagtid til nattetid. Kjølebehovet og oppvarmingsbehovet blir redusert som gjør det mindre energikrevende å holde en jevn temperatur i bygget. For å optimalisere den termiske massen er det viktig at de aktive og passive lagringsstrategiene jobber med hverandre. [39]

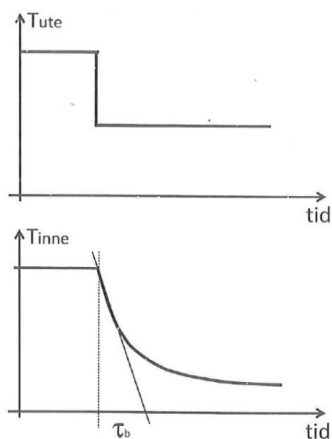
4.4. Byggets tidskonstant

Det er relevant å utforske materialets varmetreghet når varmeflyten og temperaturen varierer. Som beskrevet i kapittel 2.1.2 om varmebalanse må et varmesystem tilføre et rom energi for at temperaturen i rommet skal holdes stabil. Ligning (2.2) og (2.3) om varmebalansen kan uttrykkes ved stasjonære forhold. I situasjoner med transiente forhold, hvor temperaturen og varmestrømmen endrer seg over tid, er ikke formlene tilstrekkelig. I slike forhold er man nødt til å ta hensyn til den dynamiske varmebalansen som tar både høyde for bygningsdelenes varmekapasitet og deres innvirkning på de termiske forholdene. Den dynamiske varmebalansen for et rom eller bygningen kan beskrives med følgende ligning (4.3):

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

Tilskudd eller tap av varme fører til temperaturendring i rommet. Dette vil samtidig medføre en endring av varmeinnholdet i konstruksjonen og inventar, med overflate mot rommet [15]. Den termiske massen vil derfor ta opp eller avgi varme dersom det er en temperaturdifferanse mellom overflatetemperaturen og lufttemperaturen i rommet. Temperaturdifferansen vil skape interne varmestrømmer som påvirker varmebalansen. Den termiske massen vil reagere på temperaturendringene tregere enn romluften. Den termiske

tregheten i materiale kommer av varmekapasiteten. Det gir egenskaper til å akkumulere varme og frigi det ved et senere tidspunkt. Fra Figur 4.4 ser man at når varmetilførselen reduseres vil innetemperaturen synke raskt i begynnelsen og avta langsommere mot slutten. [41]



Figur 4.4.: Kurve av avkjølingsforløp når utetemperaturen endres. τ er tidskonstanten. Tangenten viser hvordan hellingen på kurven avtar med tiden [42].

For å beskrive varmetregheten i et materiale anvendes ofte en tidskonstant. Tidskonstanten er et mål på den tiden det tar før innetemperaturen i et bygg svarer mot en endring i utetemperaturen, eller når varmetilførselen stenges av, illustrert i Figur 4.4. Den langsomme avkjølingsprosessen kan beskrives med tidskonstanten τ , som er et forhold mellom varmelagringsevne, S , og varmetapskoeffisienten, H , beskrevet som:

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

Ved å sette (4.4) inn i (4.3) og løse denne, som beskrevet i Enøk i bygninger [15], kan temperaturforløpet til inneluften beskrives slik (4.5):

$$T_i(t) = T_0 + \frac{\Delta\phi}{H} \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.5)$$

T_0 er innetemperaturen på det tidspunktet hvor effekttilskuddet endres med $\Delta\Phi$. Det er forutsatt at utetemperaturen, T_e , og rommets totale effekttilskudd, $\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi$,

er konstant i tiden fra $t = 0$ til $t = t$. Under disse forutsetningene viser ligningen at innnetemperaturen endrer seg eksponentielt mot en ny stasjonær balansetemperatur, $T_i(\infty)$. Temperaturforløpet over tid kan dermed uttrykkes som en funksjon av kun tidskonstanten og temperaturene ved $t = 0$ og $t = \infty$: [43]

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

hvor balansetemperaturen i stasjonær tilstand er konstant lik:

$$T_i(\infty) = T_e + \frac{\phi_0 + \Delta\phi}{H} \quad (4.7)$$

Tidskonstanten kan brukes til å se hvordan innnetemperaturen i en bygning påvirkes og om det er faktorer som forårsaker endringer i oppvarmingsbildet. Vanligvis er tidsbenevningen oppgitt i timer eller dager. Videre er det helt avgjørende hvor tungt bygget er og hvor stort effektpådraget er. En tung konstruksjon er mer varmetreg og har dermed en høyere tidskonstant [31]. Verdier for «lette» konstruksjoner er typisk 15-20 timer og 50-200 timer for «tunge» konstruksjoner [15].

Nærmere beskrevet er tidskonstanten kvoten av bygningens varmekapasitet og varmetapsfaktor. Effekttapsfaktorer utgjør noe av transmisjonstapet gjennom klimaskallet og noe av ventilasjonstapet. Bygningens varmekapasitet blir berørt av den spesifikke varmekapasiteten og konstruksjonens masse innenfor isoleringen. Den spesifikke varmekapasiteten til et bygg viser til den kapasiteten materialet har til å lagre varme.[31].

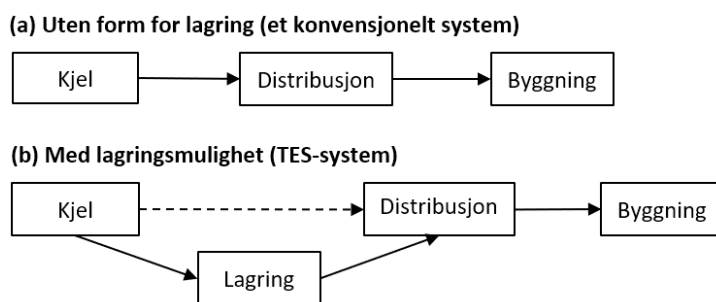
Tidskonstanten angir den tiden det tar for en bygning eller rom å oppnå 63 % av sluttemperaturrendringen [44, 15]. Denne prosentverdien får man ved å sette inn $t = \tau$ i ligning (4.5), noe som gir følgende ligning:

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

Beregning av bygningens tidskonstant beskrives også i NS-EN ISO 52016-1:2017.

5. Thermal Energy Storage, TES

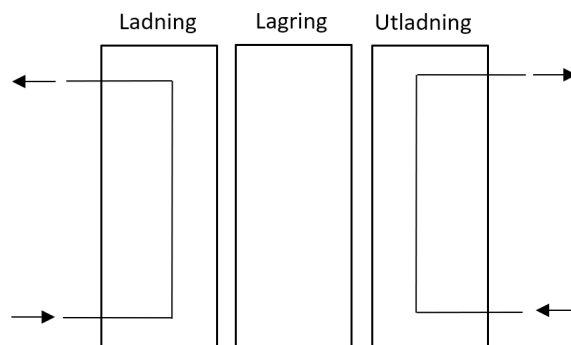
Dette kapitlet beskriver hvordan den termiske massen kan benyttes som et TES-system og driften av et slikt system for å redusere bygningens energibruk. Et termisk energisystem er kortsiktig lagring som akkumulerer varme og frigir den når det er behov for det [45]. Figur 5.1 viser en illustrasjon på om et bygg benytter seg av en strategi med eller uten lagring.



Figur 5.1.: En skjematisk fremstilling av (a) uten noe form for lagring og (b) med mulighet for lagring. Inspirert fra [45].

5.1. Termisk masse

Hovedhensikten med å benytte seg av et system som termisk energilagring er å separere når varmen produseres og når den brukes. Det er temperaturdifferansen mellom romluften og den termiske massen som gjør at det overføres varmeenergi mellom dem [45]. Den termiske massen ønsker å tilpasse seg den luften veggen er i forbindelse med og resulterer i at massen absorberer, frigir og lagrer termisk energi for å tilpasse seg. Dette er en naturlig prosess, men som er mulig å utnytte og kontrollere ved å regulere innnetemperaturen. Økes innnetemperaturen vil den termiske massen absorbere varme, men ved en reduksjon av innnetemperaturen vil den termiske masse gradvis avgi varme. En styring og utnyttelse av den termiske massen er det som betraktes som et TES-system. Figur 5.2 viser TES-systemets lagringsprosess ved tre steg; ladning, lagring og utladning [46].

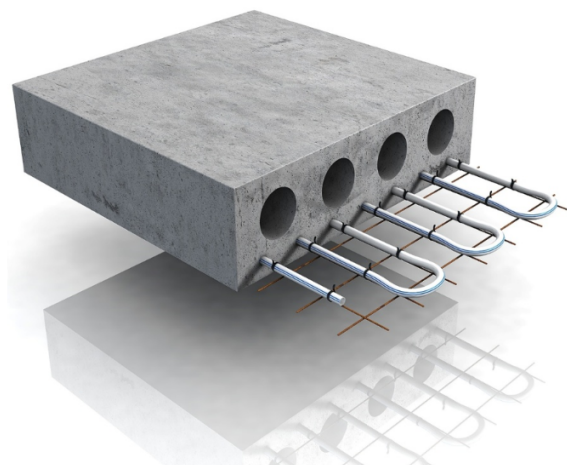


Figur 5.2.: Lagringsprosess for termisk masse basert på TES fra [46].

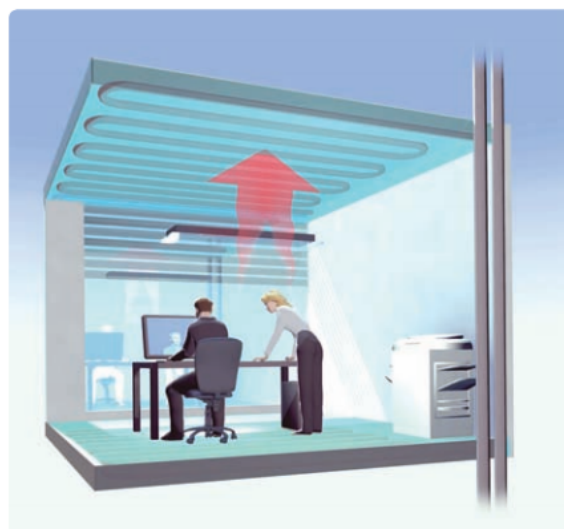
5.2. TABS

TABS (Thermally Active Building Systems) benytter innstøpt rør for å aktivere betongkjernen i bygningens masse for lagring og utladning av termiske energi, vist i Figur 5.3. For å utnytte energien på best mulig måte, benyttes det væskeførende rørsøyfer. Det er fordi væske har en høy spesifikk varmekapasitet, egner seg derfor godt til lagring og gjør at man kan ha et system som opererer med lavere temperaturer. TABS jobber nedover og benytter konstruksjonens tak vist i Figur 5.4, slik at en stor takflate blir eksponert mot et romareal som enten har et varmebehov eller et kjølebehov. Et TAB-system er et supplement for å opprettholde varmebalansen på lik linje som et tradisjonelt gulvvarmesystem med hensikt å redusere energiforbruket og opprettholde innneklimaet. [47]

Et TAB-system kobles manuelt mellom vinterdrift og sommerdrift. Temperaturen på den sirkulerte væsken bestemmes etter om bygningen trenger å kjøles ned eller varmes opp. Ved et varmebehov ligger væsken i rørene i område mellom 22-28 °C med kapasitet på 30 W/m², mens i område 16-22 °C med kapasitet på 40-60 W/m² ved kjølebehov. Dette systemet kalles derfor et lavtemperatur varmeanlegg og et høytemperatur kjøleanlegg. [9, 47]



Figur 5.3.: Illustrasjon på gulvoppbygging av TABS [48].

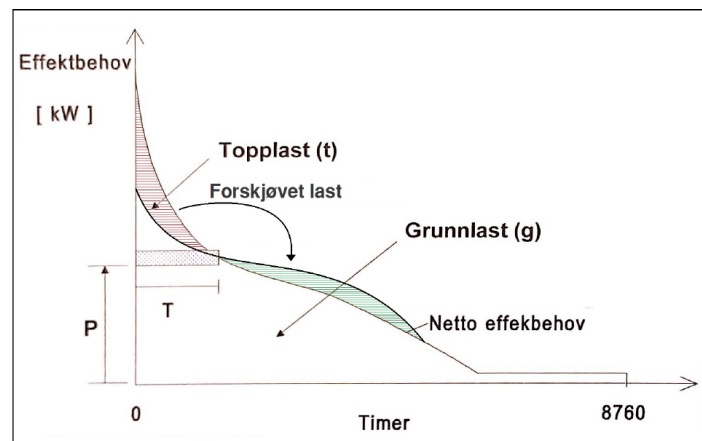


Figur 5.4.: Illustrasjon av varmemagasinerings [47].

5.3. Lastforskyvning

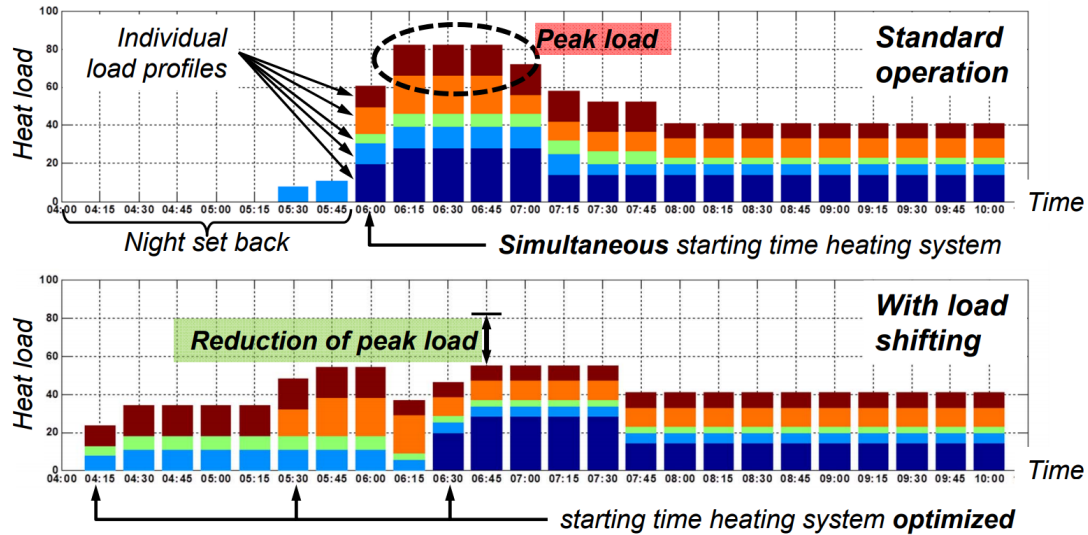
Lastforskyvning er en driftsstrategi som utnytter lagringskapasitet til å akkumulere varme i forkant av en forventet effekttopp [35]. Denne strategiens hensikt er å utnytte materialets varmelagringsegenskaper ved bruke tidligere magasinert varme i senere perioder hvor effektbehovet er stort. Dette fører til at man opprettholder den ønskede innnetemperaturen ved at overskuddsvarmen øker temperaturen (og den sensible varmen) i luften og i den termiske massen som er i direkte kontakt med luften. [5]

Etter den termiske massen er oppladet med ønsket varmemengde senkes varmetilførselen. I et vanlig bygg vil varmetapet igjennom bygningskroppen føre til et rast fall i innnetemperatur, men med termisk tregt materiale vil den magasinerte varmen avgis til rommet med en effekt som optimalt kompensere for den manglende effekten fra gulvvarmen. Bygninger med høy varmekapasitet har mulighet til å lagre mer energi derfor avgis mer effekt. [5]. Dette fører til at romluften opprettholder en temperatur innenfor akseptable verdier til den termiske massen er utladet og oppnår samme temperatur som luften i rommet. Det finnes flere studier (se kapittel 5.4) som viser at det er mulig å forskyve varmebehovet til et bygg for å oppnå denne effekten uten at det går på bekostning av innklimaet. [43]



Figur 5.5.: Illustrasjon på lastforskyvning i et varighetsdiagram. Den rød-skraverte andelen er spisslast som kuttes bort og erstattes med tilsvarende grunnlast (grønn-skravert). [15]

Flytting effektbehovet i perioder med stort varmebehov til perioder med lavt varmebehov, er det som menes med lastforskyvning [5]. Dette fører til en reduisering av maksimal effektuttak i perioder med effekttopper som gjør at spisslastkilden kan reduseres. Dette fører til at de kan videre bli erstattet med en økende andel grunnlastkilder. Figur 5.5 viser et diagram som illustrerer at maksimal effektbehovet reduseres og flyttes til grunnlastnivået, men at arealene til de skraverte områdene likevel er tilnærmet uforandret. Varmebehovet og energibruken er dermed ikke forandret, men kun tidspunktet det leveres på. I en virkelig situasjon vil noe av varmen gå tapt til omgivelsene i den perioden varmen lagres i den termiske massen, men dette tapet blir relativt lite om ikke lagringsperioden er for lang [45].

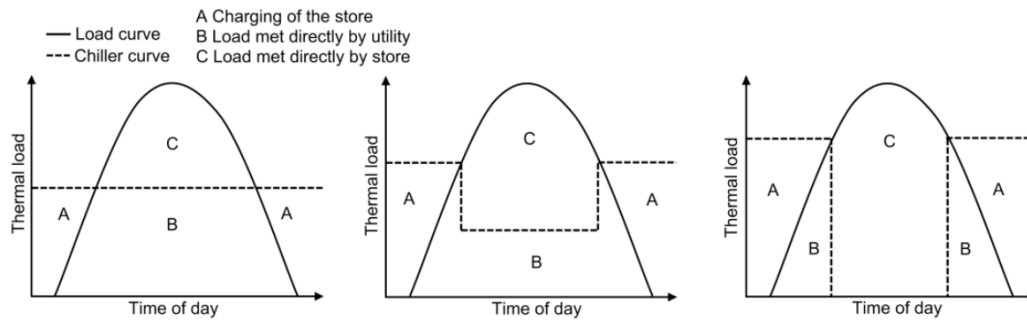


Figur 5.6.: Prinsipp for topplastforskyvning [49].

Siden varmeproduksjonen kan foregå i grunnlastområde er det også mulig å øke bruken av energiøkonomiserte og miljøvennlige energikilder. Dette fører igjen til at bruken av fossile brenslere og andre primærenergikilder som benyttes i dag til spisslast kan reduseres [50]. En reduksjon av maksimalt effektbehov vil også føre til flere andre driftsfordeler. Ved en lastforskyvning vil et jevnere pådrag av systemlasten bidra til en bedre stabilitet i systemlasten. Figur 5.6 viser et prinsipp for lastforskyvning hvor effekttoppen reduseres, men mengden energi økes og holdes mer stabil. En stabil drift gir en god systemvirkningsgrad og vil også bidra til å minimere tapene i systemene [51]. Varmetapene i distribusjonen vil bli minimert på grunn av at vi kan tillate oss å distribuere nettet med lavere temperaturer på grunn av et lavere effektbehov [52].

5.3.1. Forskyvningsstrategier

Lastforskyvning eller «peak shaving» kommer av at effekttoppene blir «barbert» bort ved at en andel av spisslastbehovet skyves ned i grunnlastområdet. «Load levelling», «Demand limiting» og «Full storage» er tre strategier på denne «barberingseffekten» som vist i Figur 5.7 [35, 40].



Figur 5.7.: Strategier for lastforskyvning [35]. Fra venstre: «Load levelling», «Demand limiting» og «Full storage».

Ved «Load levelling», eller lastutjevning blir det levert en konstant termisk effekt. Driften av varmesystemet får høy virkningsgrad, men det medfører at systemet kun kan dekke deler av varmebehovet i periodene varmebehovet er stort. Felt B representerer varmebehovet som den termiske lasten dekker. I tidsperioden i felt A lages energi i massen da effekttilskuddet overstiger behovet. Dette overskuddet utnyttes i felt C for å dekke hele effektbehovet. «Load levelling» utnyttes det termiske lagringspotensialet mindre enn de andre strategiene og fører til at reduksjonen av effekttoppen blir tilsvarende liten. Det blir midlertidig en konstant varmeproduksjon ved et konstant effektnivå som gir en best mulig virkningsgrad. [35]

Virkningsgraden i de to resterende strategiene blir bortprioritert slik at man får en størst mulig utnyttelsesgrad av lagret varme i den termiske massen. Figuren for «Full storage»-strategi forutsetter at et termisk energisystem for et bygg har tilgang på en stor lagringskapasitet og en høy installert varmeeffekt. Dette betyr at den termiske massen skal dekke hele varmebehovet i de periodene med effekttopper hvor varmetilførselen kuttet helt. I et slikt system vil effekttoppene reduseres betraktelig i systemlasten i korte perioder [40].

Mengden effekt som er tilgjengelig som varmelagringsevne i byggets termiske masse, er det som avgjør valget av en lastforskyvningsstrategi. I lette konstruksjoner eller tunge bygninger hvor den termiske massen ikke er eksponert direkte mot romluften, vil det ikke være strategisk gjennomførbart å benytte seg av «Full storage»-strategien for å unngå temperaturfall [35]. Det er problematisk å si noe om et bygg er kapabel til å tilfredsstille inneklimate på en generell basis dersom varmetilførselen reguleres med tanke

på lastforskyvning. Det er fordi ingen bygninger er like eller har de samme driftsbetingelsene [40].

5.3.2. Prediktiv lastforskyvning

Prediktiv lastforskyvning betyr å kunne forutsi med en viss nøyaktighet det tidspunktet når effekttopper i systemlasten kommer til å oppstå. I kapittel 1.1 identifiseres det to hovedtrekk fra en systemlast som viser tydelige døgnsykluser ved kundenes effektbehov. Det ene er en effekttopp om morgenen og det andre er om kvelden. Dette fører til at det er mulig å forutsi når på dagen disse effekttoppene vil oppstå. Utetemperaturen er det som i stor grad bestemmer størrelsen på effektbehovet i nettet og det er den forventede utetemperaturen som kan anslås å gi grunnlag for størrelsen på de forventede effekttoppene [53]. En slik lastforskyvningsstrategi er nødt til å ha tilgang på denne informasjonen for å kunne gi en forutsetning om tidspunkt og størrelse på effekttoppene slik at det går an å utnytte lade- og utladningsperiodene optimalt.

En repeterende døgnsyklus kommer av at mange bygninger har et repetitivt bruksmønster på en daglig basis. I en arbeidsuke er aktiviteten på et kontor- eller administrasjonsbygg og offentlige bygg som skoler og barnehager like stor hver dag mot en svært liten aktivitet i helgene. For husholdninger er aktiviteten motsatt hvor det er helger, kvelder og ettermiddager som dominerer. En bygnings varmebehov er avhengig av et bruksmønster og siden det er relativt stor forutsigbarhet om et bygg er i bruk eller ikke, innebærer dette at det er mulig å anslå effektbehovets størrelse før det inntreffer. [10]

Selv om bygningens fremtidige varmebehov er enkelt å anslå, er det helt nødvendig med avanserte matematiske algoritmer slik at prediksjonen sikres en nøyaktighet slik at det er mulig å stole på den. Det finnes flere eksempler på vitenskapelige utgivelser som har forsøkt og har lykket med å utvikle slike algoritmer. Noen eksempler er; «Extreme learning machine for prediction of heat load indistrict heating systems» [54], «Forecasting of consumers heat load in district heating systemsusing the support vector machine with a discrete wavelet transform algorithm» [55] og «Heat load prediction in district heating systemswith adaptive neuro-fuzzy method» [56]. Disse eksemplene har tatt utgangspunkt i styring av et fjernvarmenett, men kan videreføres til styring av en varmepumpe på

et vannbårent gulvvarmesystem. Felles er at de beregner fremtidige varmebehov ved å sammenligne med en database med tidligere logførte behov med sanntidsbehov for å finne likheter som brukes til å predikere en varmebehovsprofil i timene fremover. Det er stort sett disse tidligere logførte datamengdene som gjør grunnlaget i de matematiske algoritmene som predikerer den fremtidige lasten.

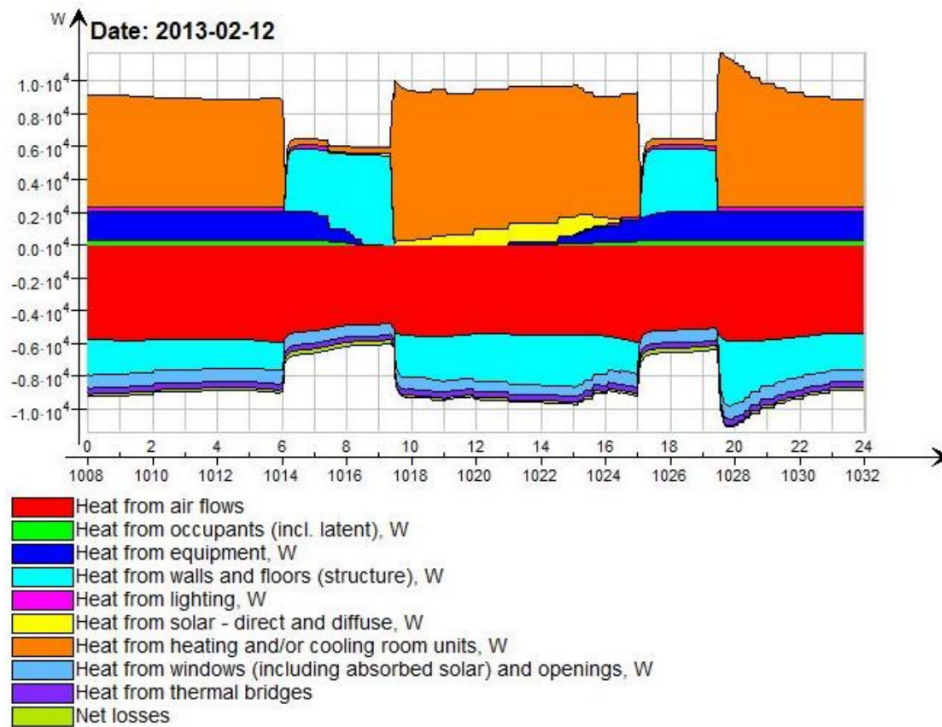
Et slikt system som er i stand til å planlegge en lastforskyvning for å redusere eller unngå disse effekttoppene helt, kan betraktes som et «smart» system som bruker intelligens til å tolke og analysere et gitt oppvarmingsmønster for så å optimalisere driftsforholdene i tiden fremover. Et smart varmenett (Smart Heat Grid) for å regulere varmedistribusjonen, er en løsning som vil hjelpe med å bevare konkurransevnen til et fremtidig varmenett [10].

5.4. Tidligere studier av lastforskyvning

5.4.1. Varmelagring i termisk masse for å redusere effekttopper

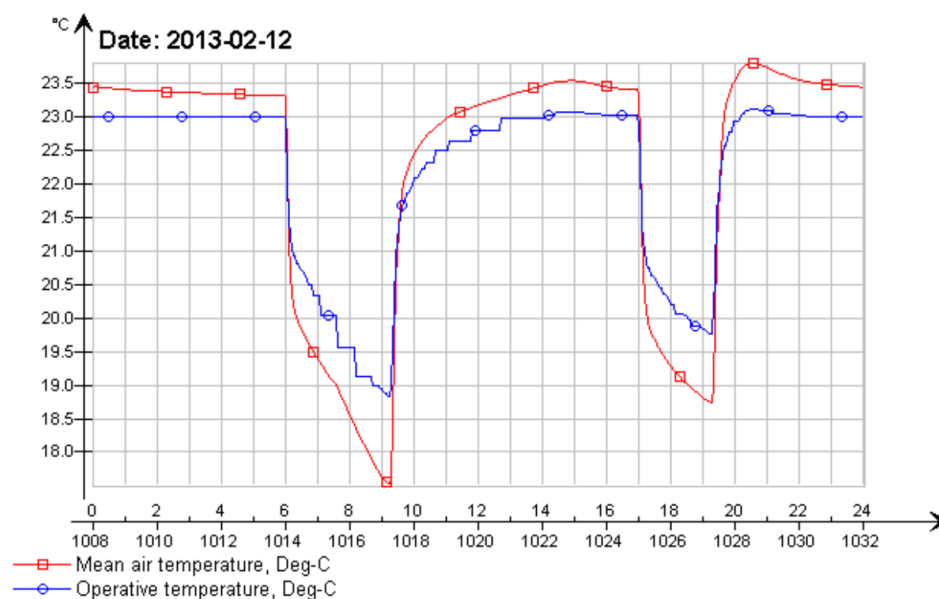
I oppgaven «Varmelagring i termisk masse for å redusere effekttopper» [42], ble programmet IDA ICE brukt til å forske på om en lastforskyvningsstrategi ville bidra til en reduksjon av effekttopper i et fjernvarmenett. Metoden som ble anvendt her går ut på å kutte effektuttaket i periodene med høye effekttopper slik at mengden på effekttoppene ble redusert som en følge av dette. Dette studiet viser at dette systemet påvirker innetemperaturen, men at den termiske tregheten til bygningen bidrar slik at innetemperaturen ikke går ut over inneklimaets komfortområde.

Det fokuseres på effekttoppene om morgenen i perioden 06:00 til 09:00 og ettermiddagen mellom 17:00 og 19:00. Fokusområdet i det nevnte studiet handler om kollektiv sosial atferd som forårsaker effekttoppene og fører til at lastforskyvningsstrategien resulterer i et inaktivt varmesystem 5 timer daglig. De resterende 19 timene fikk bygningen simulert tilført varmen som trengs for at innetemperaturen på 23 °C skulle bli opprettholdt. Den dynamiske varmebalansen i den simulerte modellen er vist i Figur 5.8 en normal vinterdag.



Figur 5.8.: IDA ICE simuleringsresultat for varmebelastning ved laststyring fra [42].

Varmen fra den termiske massen (lyseblått området) viser at den termiske tregheten i konstruksjonen klarer å akkumulere varme når varmesystemet er i drift (negativ verdi) og gi fra seg varme når anlegget er slått av (positiv verdi). Dette kommer av at varmen blir tatt opp i bygningsmassen så lenge inneluften opprettholder en høyere temperatur enn overflatetemperaturen på den termiske massen. Den positive verdien tilsier at den termiske massen avgir varme så fort inneluften synker under overflatetemperaturen på massen og dermed fører til å opprettholde varmebalansen slik at innetempurfallet ikke blir så stort. Hadde den termiske massen inneholdt mindre akkumulert termisk energi ville temperaturen falt betraktelig mer. Den termiske masse avgir en lavere effekt enn et varmesystem og det forårsaker et temperaturfall på innetemperaturen.



Figur 5.9.: IDA ICE simuleringsresultat som viser det resulterende temperaturforløpet fra [42].

Figur 5.9 viser simuleringsresultatet av den synkende operative temperaturen i bygningen så fort varmetilførselen blir skrudd av. Temperaturen faller helt ned til $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ før varmesystemet blir skrudd på igjen klokken 09:00. Dette resulterer i en temperaturdifferanse på $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Studiet støtter seg på simuleringsresultater som viser en forventet misnøye (PPD) på rundt 10 % som tilsier at temperaturdifferensen er akseptabel på grunn av det korte tidsrommet temperaturen er lav og inneklimaet er ansett som tilfredsstillende.

5.4.2. Syklisk lagring for redusert døgnvariasjon

Studiet «Syklisk lagring for redusert døgnvariasjon» [51] går ut på å anvende en metode som omfatter implementering av et periodisk reguleringssystem som styrer varmetilførselen ved å levere for mye eller for lite varme til bygningen. Dette studiet ble gjennomført i tidsrommet 2010-2011 med å se på fem bygningers potensiale til å akkumulere varme i Sverige. Forsøket var å se på muligheten til å redusere oppvarmingsbehovets døgnvariasjon og effektivisere varmeproduksjonen.

Forsøket ble gjennomført ved å justere utetemperaturens målinger før den ble registrert av en regulator slik at bygningens turtemperatur ble endret i varmesystemet. Det ble satt opp justeringssykluser slik at utetemperaturen gradvis ble regulert opp eller ned fra det som

var nødvendig for å dekke varmebehovet. Den termiske massen i bygningen vekslet mellom å avgi varme eller absorbere varme i perioder med overskuddsvarme som resultat fra denne reguleringen. Denne reguleringen viser at det er mulig å kontrollere varmestrømmen innad i et bygg ved å regulere varmetilførselen. Tregheten i den termiske massen kan dermed utnyttes til å separere tidspunktet mellom når varmeeffekten produseres og benyttes.

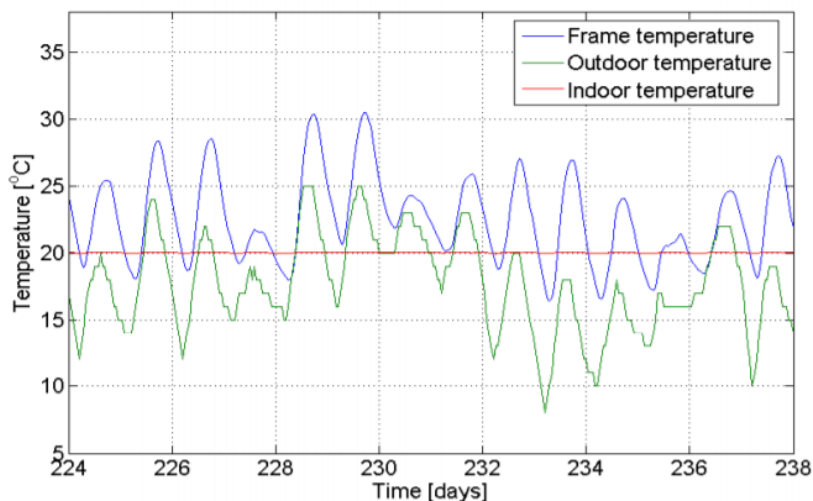
Resultatene fra studiet viser at innetemperaturen kun hadde et større avvik enn $\pm 0,5$ °C én gang i testperiodens syklus. Den normale variasjonen i løpet av en dag ble beregnet til et gjennomsnitt på $\pm 0,21$ °C. Konklusjonen ble derfor at sannsynligheten var liten for at tilsvarende perioder med korte reguleringssykluser ikke ville gi en større temperaturvariasjon enn $\pm 1,0$ °C. En temperaturvariasjon på 1,0 °C vil ikke ha innvirkning på menneskes opplevelse av termisk komfort og testresultatene ble derfor konkludert med at en syklisk regulering var mulig å gjennomføre uten vesentlig reduisering av inneklime.

5.4.3. Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems- supply temperature optimisation and self-regulating effects

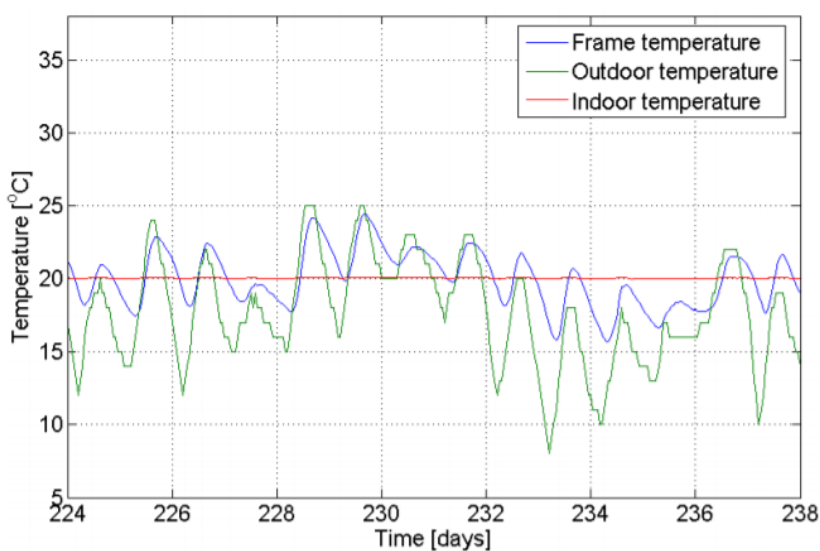
Målet med prosjektet «Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems- supply temperature optimisation and self-regulating effects» [16], var å samle informasjon for å kunne utnytte varmelagring i tunge bygningskonstruksjoner med hensyn til energibesparelse, bedre termisk inneklime og reduserte effekttopper. I dette studiet har det blant annet forsket på hvilke resultater bruk av tyngre materialer vil ha på temperaturendringene i en sone. Simuleringen er gjort på en betongkube. Den uisolerte kuben har et volum på 1 m^3 , har et vindu som utgjør hele sør-enden, og ble testet med vanlig betong og en type betong med høyere termisk masse. Et varmeapparat holder temperaturen i kuben til en konstant 20 °C. Målet med forsøket var å få ut data på hvordan de forskjellige materialene oppførte seg når de ble utsatt for en varierende utetemperatur.

Figur 5.10 og 5.11 viser resultatene fra 2 uker av simuleringen i august måneden. Utetemperaturen varierer i stor grad gjennom ukene. Som nevnt over holder innetemperaturen konstant 20 °C. Her blir potensialet til termisk masse tydelig vist.

Eksempelvis på dag 228 er det en stor temperatur økning fra 15-25 °C. Rammen av standard betong får en temperaturøkning fra 18-31 °C, vist i Figur 5.10. Rammen til kuben med den tyngre betongen har kun en temperaturendring fra 18-24 °C, vist i Figur 5.11. Temperaturvariasjonen i rammen varierer betydelig mindre i tilfellet med den tyngre betongen. Dette resulterer i at varmeapparatet vil yte mindre mens temperaturen i rommet opprettholdes.



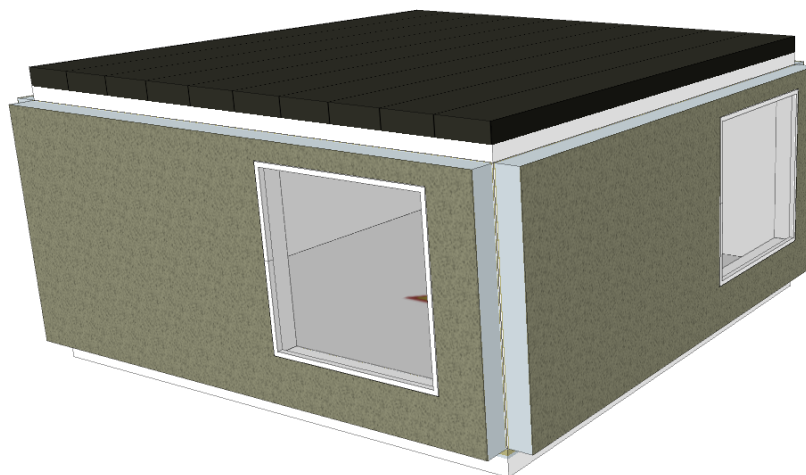
Figur 5.10.: Temperatur variasjon i rammen til kuben når den består av standard betong [16].



Figur 5.11.: Temperatur variasjon i rammen til kuben når den består av en termisk tyngre betong [16].

Del II.

6. Simulering IDA ICE



Figur 6.1.: Illustrasjon av den simulerte modellen i IDA ICE.

I den andre delen av denne oppgaven skal vi ta for oss modellering og simulering ved hjelp av simuleringsverktøyet IDA ICE og programmeringsverktøyet MATLAB. Hovedhensikten her er å studere samspillet mellom effektpådrag og den termiske lagringskapasiteten. I dette kapittelet gir vi en beskrivelse av hvordan modellen i IDA ICE er satt opp og hvordan simuleringen er gjennomført før vi beskriver metoden for MATLAB i kapittel 7. Resultatene blir så presentert i kapittel 8. IDA ICE er et simuleringsprogram som viser blant annet en bygnings oppførsel med hensyn på energi- og effektbehov under forskjellige omstendigheter. Det kan importeres bygninger fra ett CAD-program eller bygge opp modeller selv. Programmet inneholder en database med en detaljert beskrivelse i klimaets variasjon over hele året. IDA ICE er et program som kan utfører detaljerte energibetraktninger i én enkel eller en flersonet modell.

6.1. Simuleringsmetode

Litteraturstudiet viser at utnytting av termisk energilagring i termisk masse og lastforskyvning kan bidra til reduksjon av effekttopper. I kapittel 4.2 beskrives det at den eneste forutsetningen for dette er at den termiske masse eksponeres mot romluft. Dette betyr at denne strategien kan implementeres i eksisterende bygninger siden det settes

ingen krav til ombygging eller installasjon av nytt utstyr. Oppgaven baserer seg ikke på en eksisterende bygning og det bygges derfor opp en modell bestående av én enkel sone fra grunn i programvaren. Det konstrueres én enkel sone for å fremheve resultatene som er relevante for oppgaven siden IDA ICE kan gi kompliserte simuleringresultater om modellen er for kompleks. En forenkling gjør det lettere å skille hvilke parameterendringer som påvirker resultatene og hvilke som skyldes andre faktorer. Hovedmålet med simuleringene er å få ut data på effektforbruk på vannbåren gulvvarme og muligheten for å redusere effekttoppen ved å benytte seg av forskjellige døgnpådrag. Simuleringene begrenser seg til døgnsimulering fordi denne oppgaven fokuserer på reduksjon av effekttopper som oppstår under driftstider av anlegget. Resultatene for en helårssimulering er derfor av ingen interesse siden effekttoppene oppstår i arbeidsdager rundt 08:00 og 17:00 alle hverdager.

6.2. Inndata modell

Denne modellen er basert på standardverdier fra IDA ICE og NS-EN ISO 11855-2:2015 med få endringer slik at modellen samsvarer med TEK17.

6.2.1. Klima og værdata

IDA ICE benytter seg av lokale klimaprofiler som hentes opp fra en database slik at simuleringene blir utført på en mest mulig realistisk måte i henhold til bygningens geografiske lokasjon. Fra databasen er det blant annet mulig å hente ut lufttemperatur, luftfuktighet, strålingsintensitet og vindhastigheter. Siden vi ikke har et konkret bygg har vi valgt å ta for oss klimaprofilen for Oslo/Gardermoen som er inkludert i programvaren og en dimensjonerende utetemperatur (DVUT) på $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ som brukes for alle simuleringene.

6.2.2. Romgeometri

Referansemodellen er konstruert i form av én enkelt sone og er ikke importert fra en annen programvare som et eksisterende bygg. Sonen er laget som et enkelt bygg med fire yttervegger, tak, gulv mot en lignende sone med romtemperatur på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ og en takhøyde på $2,6\text{ m}$.

Sonens geometriske data i referansemodellen er gjengitt i Tabell 6.1.

Tabell 6.1.: Arealdata i referansemodellen.

Arealdata i sonen	m^2
Grunnflate	36
Tak	36
Vegger	46,8
Vinduer	15,6

6.2.3. Bygningskroppen

Inndataene for bygningskroppen er relevant for simuleringens resultat. Materialets egenskaper som varmekonduktivitet og varmekapasitet er vesentlig når det gjelder simuleringresultater. Ytterveggene består av betong med isolasjon og har en U-verdi fra Tabell 6.2, som kommer fra database i IDA ICE for en termisk tung vegg. Gulvkonstruksjonen er hentet fra oppbyggingen i NS-EN ISO 11855-2:2015.

U-verdier, kuldebroer og infiltrasjon

Tabell 6.2.: Inndata for bygningskroppen. Bygger på energiltak i byggeteknisk forskrift § 14-2 og § 14-3.

Tekniske spesifikasjoner	Verdi
U-verdi yttervegg [W/m^2K]	0,4869
U-verdi tak [W/m^2K]	0,172
U-verdi gulv [W/m^2K]	0,8159
U-verdi vindu [W/m^2K]	0,8
Normalisert kuldebroverdi [W/m^2K]	0,07

Termisk masse

Gulvet er i utgangspunktet standard fra databasen i IDA ICE, men er tilpasset slik at den stemmer overens med gulvsystemets oppbygging i NS-EN ISO 11855-2:2015 vist i Tabell 6.3. U-verdien er satt til $0,8159 \text{ W/m}^2\text{K}$ vist i Tabell 6.2.

Tabell 6.3.: Verdier for oppbygningen av betonggulv fra NS-EN ISO 11855-2:2015.

	<i>Tykkelse</i> $x[m]$	<i>Termisk konduk.</i> $\lambda[\text{W/mK}]$	<i>Tetthet</i> $\rho[\text{kg/m}^3]$	<i>Spesifikk varmekap.</i> $Cp[\text{J/kgK}]$
Toppgulv	0,015	0,21	1100	920
Creed/flytmasse	0,06	1,2	500	1050
Isolering	0,03	0,04	20	750
Betong	0,55	2,1	2400	920

6.2.4. Varmesystemet

Varmesystemet som skal undersøkes er et lavtemperatur vannbåret gulvvarmesystem. Hensikten her er å teste et system som er oppbygget i henhold til standarden NS-EN ISO 11855-2:2015 for å se hvordan et generelt system som er gjennomført i dag fungerer i forhold til et gulvvarmesystem som benytter seg av lastforskyvning for å utnytte tregheten i den termisk tung konstruksjonen (betong). Gulvvarmesystemet benytter en ΔT på $5 \text{ }^\circ\text{C}$, hvor turtemperaturen er på $35 \text{ }^\circ\text{C}$ og en returtemperatur på $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Grunnlasten til sonen er hentet ut fra IDA ICE hvor ventilasjonsviften og de interne lastene er skrudd helt av. Dette fører til et effektbehov på 1200 W som er effekten ut av bygget ved $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Ved å dele 1200 W på 36 m^2 får vi ut 33 W/m^2 som ligger i anbefalt område på gulvvarmen i dag vist under kapittel 2.1.3.

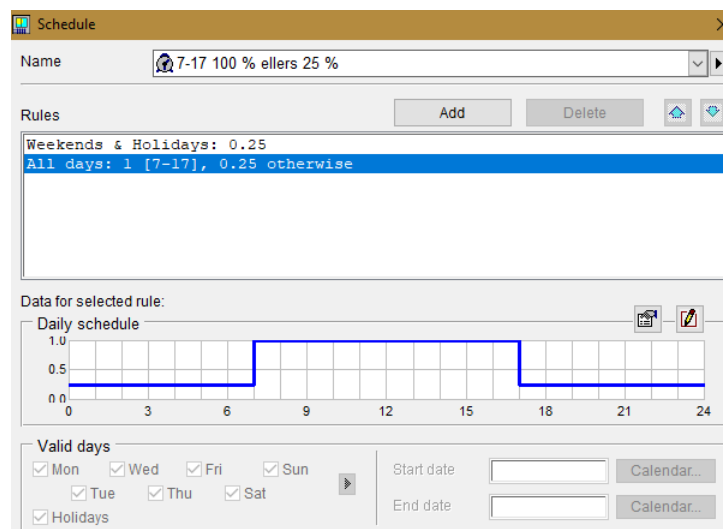
6.2.5. Ventilasjon

Ventilasjonsanlegget er konstruert slik at minstekravene for luftmengde i TEK17 er oppfylt. IDA ICE trenger luftmengder oppgitt i $[l/s]$, $[m^3/h]$, $[l/(sm^2)]$, $[m^3/(hm^2)]$ eller $[ACH]$ og

luftmengder i driftstiden er som følge:

$$7[l/s] \times 8[personer] + 0,7[l/sm^2] \times 36[m^2] = 81,22[l/s] \quad (6.1)$$

Luftmengden i hverdager tilføres med 100 % pådrag i tidsrommet 07:00-17:00 og 25 % uteom vist i Figur 6.2. Pådrag i helger, ferier og fridager er satt til 25 % gjennom hele døgnet. Tilluftstemperaturen er satt til 18 °C noe som betyr at det kommer underkjølt luft siden settpunktet for oppvarming er 21 °C. Dette er fordi rommet har interne varmekilder som personer, belysning og utstyr som alle er med på å øke rommets lufttemperatur.



Figur 6.2.: Pådragsforløp for ventilasjonsanlegget.

6.2.6. Intern- og personbelastning

Det er åtte personer i bygget, der den daglige aktivitetsperioden er satt fra 08:00-17:00 på hverdager for å simulere arbeidstid og opphold i bygget. Det antas at bygningen står tomt i helger og ferier. IDA ICE regner automatisk ut varmetilførselen fra okkupantene ut ifra inndata fra deres bekleddnings- og aktivitetsnivå. For å kunne gjøre vurdering av det termiske innklimaet i bygget må vi kjenne til clo- og met-verdien av personen som er plassert i sonen. Clo-verdien innstilt i IDA ICE er 1,1 +/- 0,1, tilsvarer sittende arbeid, og met på 1,1 fra kapittel 3.1.1. I tillegg til å få ut data på varmetilførselen er det også ønskelig å se om personene i bygget er i termisk komfort. Som beskrevet i kapittel 3.2.1

skal PPD-verdien ligge så nærme 5 % merket som mulig.

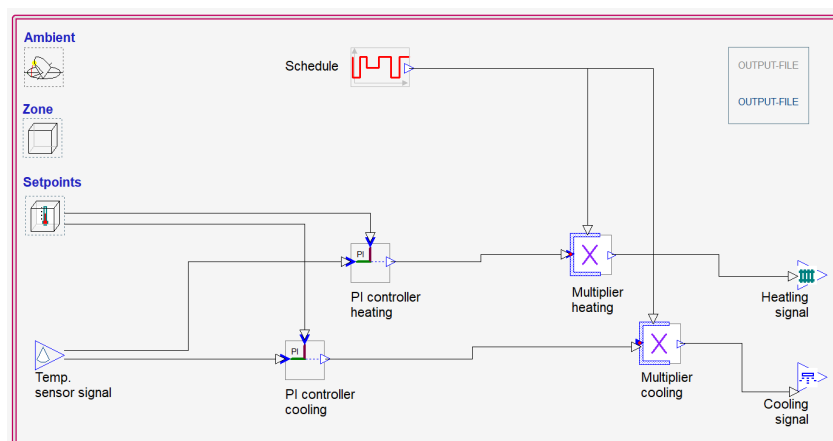
Møbler og interiør påvirker hvordan et inneklime oppfattes og gir samtidig fra seg varme som kan påvirke resultatet når lufttemperaturen synker. Andel interne belastninger inkludert møblering og belysning stilles inn til å avgi totalt 600 W for åtte okkupanter.

6.3. Simuleringsscenario

For denne oppgaven ble det for enkelt å kun bruke forhåndsdefinerte styringssystemer fra IDA ICE. Det var derfor nødvendig å lage et mer komplekst styringssystem slik at det var mulig å ha bedre kontroll på inndataene. Settpunktet er å opprettholde en temperatur i driftstid mellom 21-25 °C. PI-regulatorene på gulvvarmen regulerer varmetilførselen til bygget og styrer pådraget mot å opprettholde romtemperatur etter pådragsforløp, definert i kapittel 6.4.

6.3.1. Kontroller

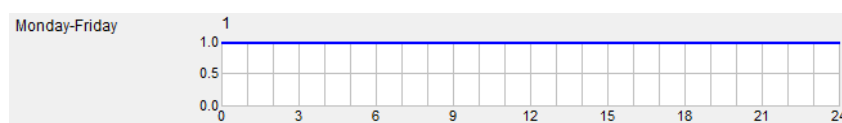
Figur 6.3 viser styringskontrolleren for gulvvarmen. En proporsjonal integrasjon regulator («PI controller»), for både oppvarming og kjøling, tar imot signal fra en romsensor («Temp. sensor signal») og justerer pådraget etter differansen mellom settpunktetsverdien («Setpoints») på 21 °C og rommets lufttemperatur. Dette signalet sendes videre og multipliseres («Multiplier») med et satt pådragsforløp («Schedule»). Dette resulterer til et varme- eller kjøletilførselspådrag på det vannbårne gulvvarmesystemet.



Figur 6.3.: IDA ICE styringssystem for pådrag av gulvvarme.

6.4. Lastforskyvning ved endring av døgnpådrag

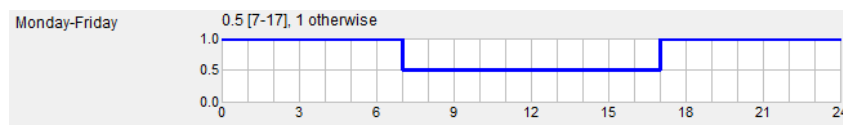
For å kunne gjennomføre simuleringene med forskjellig varmetilførsel over forskjellige tidsrom, stilles det manuelle tider for reguleringen av pådraget fra varmetilførselen. Bygget er i bruk fra 08:00-17:00 alle hverdager og det defineres profiler for pådrag av varmetilførselen fra gulvvarmen. Det settes en grunnprofil som brukes som en referanse. Profilen programmeres med et pådrag på 100 % gjennom hele døgnet. Denne lasten (grunnprofilen) illustrerer hvordan gulvvarmestyring er gjennomført i dag og det forventes en effekttopp ved arbeidshagens start og slutt. Profilen døpes om til «Last 1». Se Figur 6.4.



Figur 6.4.: Døgnpådrag for «Last 1».

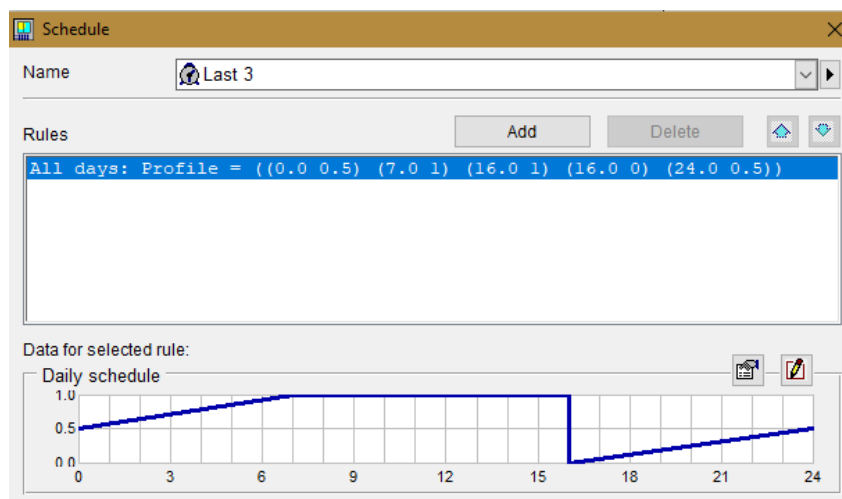
Klokken 07:00 skruer ventilasjonsanlegget seg opp fra 25 % til 100 % pådrag på grunn av at bygget tas i bruk og arbeidshagen starter. En større mengde underkjølt luft på 18 °C føres inn i rommet fra ventilasjonsanlegget og det forventes at gulvvarmen må kompensere med en økt varmetilførsel da rommets sett-temperatur er satt til 21 °C. Det forventes en effekttopp. For å motvirke dette senkes pådraget slik at vi tvinger systemet til å avgi mindre effekt. «Last 2» programmeres med 100 % pådrag gjennom døgnet med unntak

mellom klokken 07:00-17:00 da anlegget kjører med 50 % pådrag. Anlegget styres med et pådrag på 50 % av den grunn at de interne og personlige belastningene tilfører rommet varme slik at gulvvarmen ikke trenger å levere like mye energi. Se Figur 6.5.



Figur 6.5.: Døgnpådrag for «Last 2».

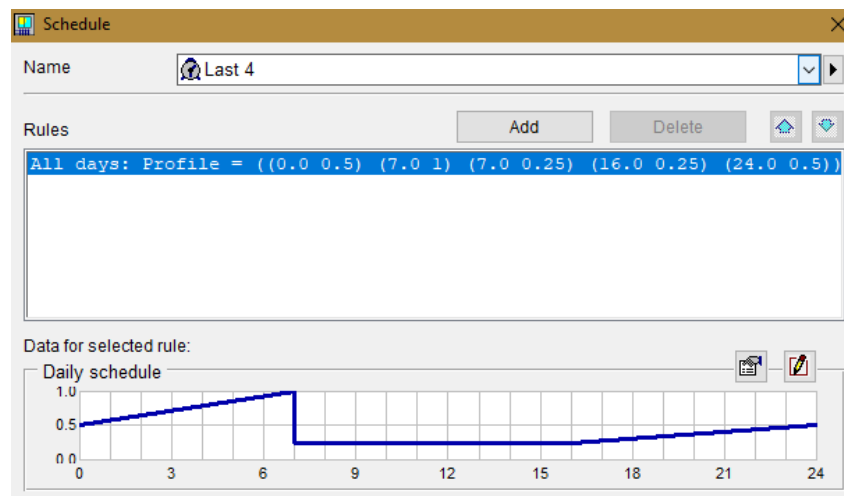
Gjennom driftstiden (08:00-17:00) forventes det at varmetilførselen fra okkupantene i sonen bidrar til å hjelpe med å opprettholde settpunktstemperaturen i sonen. Når okkupantene forlater sonen må varmetilførselen øke for å kompensere for de manglende interne og personlige lastene. Dette gjør at det forventes en effekttopp. For å minimere dette justeres pådraget. Det er ønskelig å redusere toppen ved å fordele varmetilførselen gjennom kvelden. I Kapittel 5.3 forklares lastforskyvning som prinsipp for å redusere effekttopper. «Last 3» programmeres med 100 % fra 07:00 til 16:00 og en lineær økning fra 0 % pådrag klokken 16:00 til 100 % klokken 07:00. Se Figur 6.6.



Figur 6.6.: Døgnpådrag for «Last 3».

Det er ønskelig å fjerne begge effekttoppene som oppstår rundt 08:00 og 17:00. «Last 4» tar i bruk metodene fra teorien bak både «Last 2» og «Last 3» for å redusere effekttoppene ved å foreta en lastforskyvning og effektreduksjon. Her er målet å se om metodene fungerer sammen eller om de motvirker hverandre. «Last 4» programmeres med et pådrag på 25

% mellom klokken 07:00 og 16:00, som «Last 2», og en lineær økning fra 25 % pådrag klokken 16:00, til 100 % pådrag klokken 07:00 som i «Last 3». Se Figur 6.7.



Figur 6.7.: Døgnpådrag for «Last 4».

Døgnpådragene som er fremstilt over er et produkt av prøve- og feile-metoden. Som det er sagt gjennom kapitlet er valgene som er tatt støttet opp av teori og funn fra litteraturstudiet, men alle lastene er finjustert og optimalisert. Ved å se på resultatene og deretter gjøre endringer for å finne de resultatene som er ønskelig har «Last 2, 3 og 4» blitt produsert.

7. Numeriske beregninger i MATLAB

MATLAB er et omfattende matematikkprogram som kan brukes til numeriske beregninger, simuleringer og visualiseringer. Skriptspråket brukt baserer seg på C. Programmet gir brukeren mulighet til å kode skriptet fra bunn og man kan legge til alle ønskede parametere.

De numeriske beregningene er gjennomført for å tilføye data som kan støtte og bevise funn fra litteraturstudiet og simuleringen i IDA ICE. MATLAB er bygd opp for å se sammenhengen mellom formlene fra standarden NS-EN ISO 11855-2:2015 og de dataene som kommer fra IDA ICE. For at resultatene fra beregningene skal underbygge IDA ICE, bygges modellen opp med det samme oppsettet.

7.1. Oppsett

Systemet er bygget opp av en enkel sone. Sonens romtemperatur blir påvirket av transmisjon, infiltrasjon, ventilasjon, samt varmetilførsel fra vannbåren varme støpt i gulvet.

Koden er satt opp slikt at man får ut verdier på temperatur og varmefluks gjennom hele konstruksjonen, romtemperaturen i sonen og overflatetemperaturen på gulvet. Det er interessant å se hvordan disse reagerer på endringer av parametere i simuleringen. Først beregnes en stasjonær tilstand, en initialsimulering. Beregningssyklusen definert i kapittel 7.1.1 gjennomføres med en gulvvarme på $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deretter reduseres vanntemperaturen til $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og den transiente simuleringen begynner. De utregnede verdiene fra initialsimuleringen blir utgangspunktet til den videre beregningssyklusen. Dette blir gjennomført med en endring i utetemperatur fra $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, endring i internlaste fra $33,5\text{ W/m}^2$ til 0 W/m^2 og en endring i vanntemperaturen beskrevet over.

7.1.1. Beregningssyklus

Skriptet deler gulvkonstruksjonen opp i små individuelle celler med uniform tykkelse (1 mm per lag) og varmefluksen regnes ut mellom hver enkel (7.1). Først beregnes varmefluksen

mellom hver celle i gulvet basert på de aktuelle temperaturene. Man får et detaljert bilde av hvordan varmen sprer seg fra gulvvarmeledningene, opp til gulvoverflaten og ned gjennom isolasjonen (7.2). Så lenge det er en differanse i temperatur, ΔT , mellom cellene, Δx , vil varmetransport fortsette å skje. Konstanten k er den termiske konduktiviteten til materialet. Varmefluksen fra gulvoverflaten til rom beregnes ut ifra temperaturdifferansen mellom romluften og temperaturen i den øverste definerte cellen i gulvet (7.3).

$$\dot{q} = -k \times \frac{dT}{dx} \quad (7.1)$$

$$\dot{q}_{n+1} = -k_{n+1} \times \frac{T_{n+1} - T_n}{x_{n+1} - x_n} \quad (7.2)$$

$$\dot{q} = 8,92 \times (T_{\text{overflate}} - T_{\text{rom}})^{1,1} \quad (7.3)$$

Videre berregnes en ny temperatur for hver enkel celle. Temperaturdifferansen, ΔT , bestemmes etter produktet av varmekapaciteten inn og ut av cellen og tidsintervallet, Δt , delt på varmekapasiteten til gulvlaget cellen ligger i (7.5).

$$\Delta E_2 = (\dot{q}_{1 \rightarrow 2} - \dot{q}_{2 \rightarrow 3}) \times \Delta t \quad (7.4)$$

$$\Delta T_2 = \frac{dE_2}{\rho_2 - C_{p2} - \Delta x} \quad (7.5)$$

Til slutt beregnes temperaturen i rommet (7.6). Temperaturendringen bestemmes etter produktet av all varmetransport, \dot{q}_{tot} (7.8), og tidsintervallet Δt , delt på varmekapasiteten til romluften, konstanten C_3 (7.7). Temperaturen i rommet skal holde en stabil temperatur som gir termisk komfort til okkupasentene i rommet.

$$\Delta T_{rom} = \frac{\dot{q}_{tot} \times \Delta t}{C_3} \quad (7.6)$$

$$C_3 = C_{p,luft} \times \rho_{luft} \times h_{rom} \quad (7.7)$$

Den totale varmegjennomgangen inn og ut av rommet (7.8) bestemmes etter summen av varmegjennomgangen fra konstruksjonen, transmisjon, infiltrasjon og ventilasjon, \dot{q}_{rom} (7.9). Varmen som er tilført fra de interne lastene, \dot{q}_{gen} (7.10), og gulvarmeledningene, \dot{q}_{n+1} (7.2), er det som utgjør denne varmegjennomgangen.

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{n+1} + \dot{q}_{gen} + \dot{q}_{rom} \quad (7.8)$$

$$\dot{q}_{rom} = C_1 \times (T_{ute} - T_{rom}) \quad (7.9)$$

$$\dot{q}_{gen} = C_2 \quad (7.10)$$

Den numeriske beregningen er kodet som en syklus. Etter at alle utregningene er gjennomført begynner syklusen fra starten og gjentar seg. Første gjennomgang gir nye temperaturer som brukes videre i neste syklus av beregningene. Dette gjentar seg fram til en satt totaltiden er overgått. Totaltiden bestemmes etter tiden som må til for at romtemperaturen skal stabilisere seg. Dette skjer når transmisjonstapet ut av sonen er i likevekt med summen av varmefluksen fra gulvoverflaten og internlaster.

7.2. Inndata modell

Gulvarmerørets senter er definert 0,03 m fra overflaten av gulvkonstruksjonen. Dette laget opprettholder en konstant temperatur for å simulere kontinuerlig sirkulasjon av arbeidsmediet. Fra modellen i IDA ICE er tur-temperaturen på arbeidsmediet 35 °C og retur-temperaturen på 30 °C. Temperaturen på laget blir satt til 32,5 °C, gjennomsnittet av tur- og retur-temperaturen.

T_{ute} bestemmes etter klimadata for Oslo området. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ brukes fordi dette er den dimensjonerende utetemperaturen i Oslo og er brukt som grunnlag i IDA ICE. Initialverdien til innnetemperaturen, temperaturen i rommet under sonen og temperaturen i gulvkonstruksjonen er satt til $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ før simuleringen begynner.

Totaltiden til simuleringen er satt til 3600 sekunder (1 time) for å gi tid til at gulvkonstruksjonens overflatetemperatur får stabilisert seg. Målingene blir gjort med et tidsintervall på 0,1 sekunder. I tillegg til de tidligere nevnte verdiene er det en rekke konstanten som må bestemmes.

7.2.1. Bygningskropp

For å videre bevise funnene fra teorien er det ønskelig å sammenligne resultater fra konstruksjoner med forskjellige termiske masser.

Standard gulvkonstruksjon

Gulvet er bygd opp av fire lag. Gulvbelegg, flytmasse, isolasjon og betong. Modellen baserer seg på NS-EN ISO 11855-2:2015 sitt tradisjonelle oppsett for vannbåren varme i betong. Tykkelsen til lagene, materialvalg og λ -verdier er direkte tatt fra den norske standarden. Modellen bruker de samme ρ - og C_p -verdiene som brukt i IDA ICE-simuleringen. Se Tabell 6.3.

Tyngre gulvkonstruksjon

Gulvet er bygd opp som en solid betongkloss med gulvvarmeledninger støpt direkte inn i materialet. Se Tabell 7.1. Alle lagene i begge gulvkonstruksjonene deles opp i 1 mm per lag for å sikre nøyaktighet i resultatene.

Tabell 7.1.: Verdier for oppbygning av en tyngre gulvkonstruksjon inspirert fra TABS.

	<i>Tykkelse</i> $x[m]$	<i>Termisk konduk.</i> $\lambda[W/mK]$	<i>Tetthet</i> $\rho[kg/m^3]$	<i>Spesifikk varmekap.</i> $C_p[J/kgK]$
Toppgulv	0,015	0,21	1100	920
Betong	0,06	2,1	2400	920
Isolering	0,03	0,04	20	750
Betong	0,55	2,1	2400	920

7.3. Modellens konstanter

7.3.1. Varmetapsberegning

Konstanten $C1$ er summen av varmetapet fra alle flater, ventilasjonen og kuldebruer i sonen.

Det vil alltid foregå varmetransport mellom områder med forskjellige temperaturer. Utenfor sonen er temperaturen $-20\text{ }^\circ\text{C}$ og derfor oppstår det varmetap gjennom alle flatene i sonen utenom gulvflaten. Her tilføres det termisk energi fra den vannbårne varmen. Konstanten $C1$ blir $2,53\text{ }W/m^2K$ fra (7.13).

Tabell 7.2.: Varmetransport ut fra flatene i sonen.

	U-verdi $[W/m^2K]$	Areal $[m^2]$	$[W/K]$
Vegger	0,4869	46,8	22,8
Tak	0,1902	36	6,85
Vinduer	0,8	15,6	12,5
<u>Sum:</u>			42,15

Den totale varmetransporten ut av sonen blir **42,15** W/K .

Temperaturdifferansen mellom romtemperaturen og tilluften resulterer i et varmetap til sonen. Formlene er hentet fra [57].

$$Q_v = \rho \times V \times C_p \times \Delta T = 0,33 \times n \times V \times \Delta T [W] \quad (7.11)$$

$$\frac{Q_v}{\Delta T} = 0,33 \times n \times V = 0,33 \times 1,5 \times 93,6m^3 = \mathbf{46,332W/K} \quad (7.12)$$

Der:

Q_v Varmetap ventilasjonsluft

n Antall luftutskiftninger per time (1,5 tatt fra TEK17)

V Rommets totale volum

ΔT Temperaturdifferansen mellom inne- og utetemperaturen

0,33 Kommer fra antagelse om $\rho = 1,2kg/m^3$ og $C_p = 1000J/kgK$ ved $20\text{ }^\circ C$

Den totale varmegjennomgangen ut av sonen er som følge:

$$C1 = 0,07W/m^2K + \left(\frac{42,15W/K + 46,3W/K}{36m^2} \right) = \mathbf{2,53W/m^2K} \quad (7.13)$$

Der $0,07\text{ }W/m^2K$ er normalisert kuldebroverdi fra TEK17.

7.3.2. Interne laster

$C2$ er en konstant for rommets varmepåvirkning av de interne lastene. I IDA ICE er det beskrevet at sonen har 8 okkuperanter som avgir totalt $605\text{ }W$ totalt. Hver okkuperant har egne tilhørende belastninger og utstyr som lys på $75\text{ }W$. Totalt blir summen av utstyr, belastninger og personbelastninger på $1205\text{ }W$. Konstanten $C2$ blir $33,5\text{ }W/m^2$ (7.15).

$$605W + (75W \times 8stk) = 1205W \quad (7.14)$$

$$C2 = \frac{1205W}{36m^2} = \mathbf{33,5W/m^2} \quad (7.15)$$

I den transiente simuleringen settes $C2$ til $0 W/m^2$. Dette er for å simulere at okkupantene har forlatt sonen.

7.3.3. Rommets varmekapasitet

Konstanten $C3$ er den spesifikke varmekapasiteten til luften i rommet. Varmekapasiteten beskriver mengden termisk energi som må tilføres for å heve rommets lufttemperatur med én grad. $C3$ er satt til $3059,389 J/m^2K$ (7.16).

$$C3 = \rho_{luft} \times C_{p,luft} \times h_{rom} \quad (7.16)$$

$$C3 = 1,172kg/m^3 \times 1004J/kgK \times 2,6m = \mathbf{3059,389J/m^2K} \quad (7.17)$$

Der:

ρ_{luft} Massetettheten til luften i rommet

$C_{p,luft}$ Spesifikk varmekapasitet til luften i rommet

H_{rom} Høyden under tak i rommet

Del III.

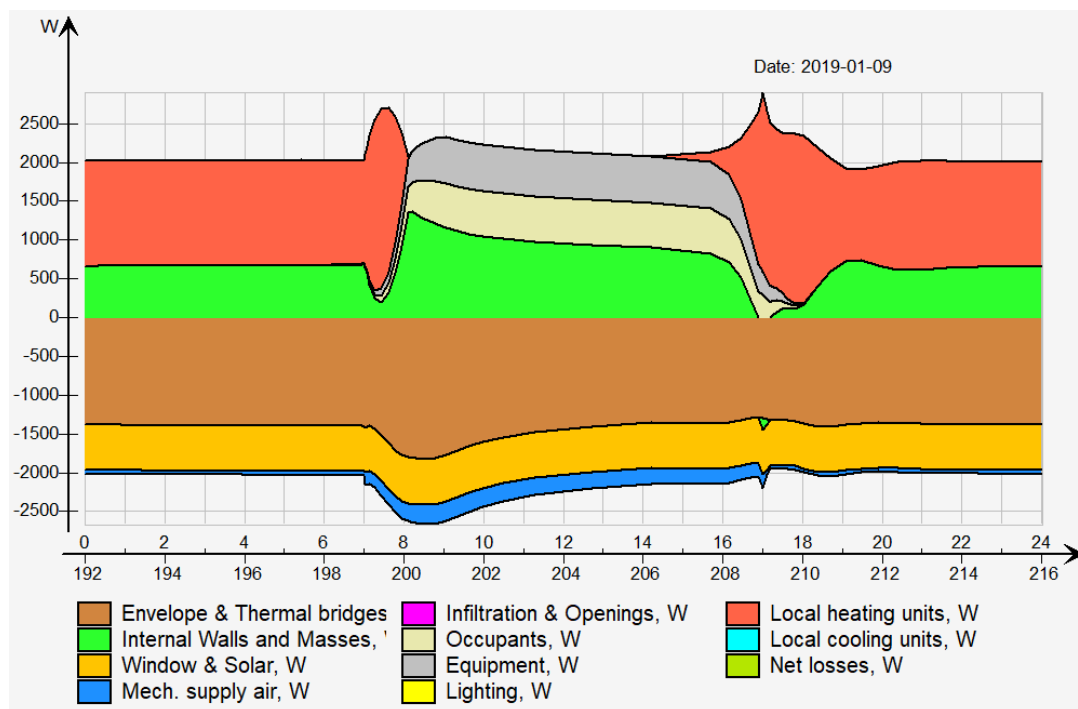
8. Resultater

8.1. Simuleringsmodell IDA ICE

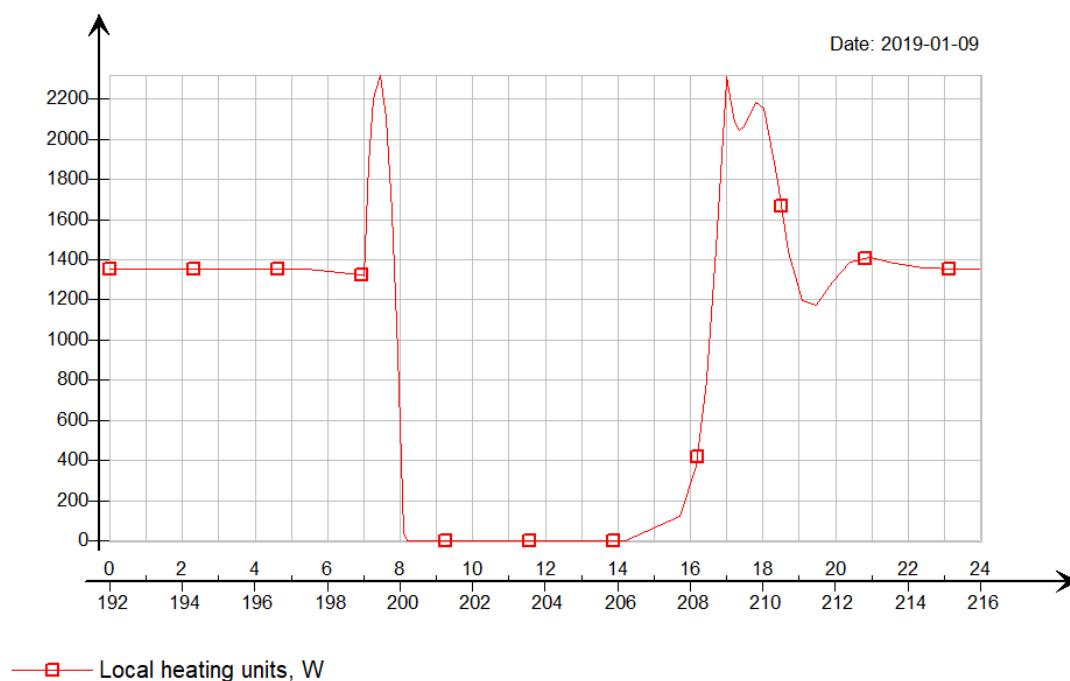
Dette kapitlet presenterer resultatene fra simuleringen av den enkle sonen. Resultatene fra hver av lastene vil bli presentert og gått igjennom hver for seg før det blir presentert en sammenligning mellom dem.

8.1.1. Last 1 – Referanse

Referansesimuleringen «Last 1» gir et reelt perspektiv over hvordan et gulvvarmesystem fungerer i dag. Fra Figur 8.1 og 8.2 ser man en effekttopp om morgenen klokken 07:30 og klokken 17:00 som forventet. Gulvvarmepådraget fra klokken 20:00 til 07:00 holder seg stabilt på grunn av at DVUT er satt til $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ og det er ingen andre påvirkninger i sonen. Ventilasjonsluften inn i sonen starter og avtar når de interne lastene og personbelastningen oppstår og forsvinner. Dette medfører at når ventilasjonen skrur seg på klokken 07:00, vil gulvvarmen som forventet gi et pådrag for å holde rommets innetemperatur innenfor sonens settpunktstemperatur. Pådraget når et maksforbruk på rundt 2300 W og avtar når de andre lastene i rommet avgir varmeenergi og sonen igjen når settpunktstemperaturen på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det gjør at de interne lastene og personbelastningene fører til at gulvvarmesystemet skur seg helt av siden sonen får tilført nok varmeenergi. Klokken 17:00 får vi igjen en ny effekttopp på et tilsvarende maksforbruk på rundt 2300 W som kommer av at ventilasjonen skrur seg av og bygget avslutter arbeidsdagen. Dette fører til at gulvvarmesystemet kompenserer med å gi et pådrag for å motvirke den manglende varmetilførselen som tidligere ble dekket av de interne lastene og personbelastningene.



Figur 8.1.: Effektpådrag fra grunnlasten «Last 1».



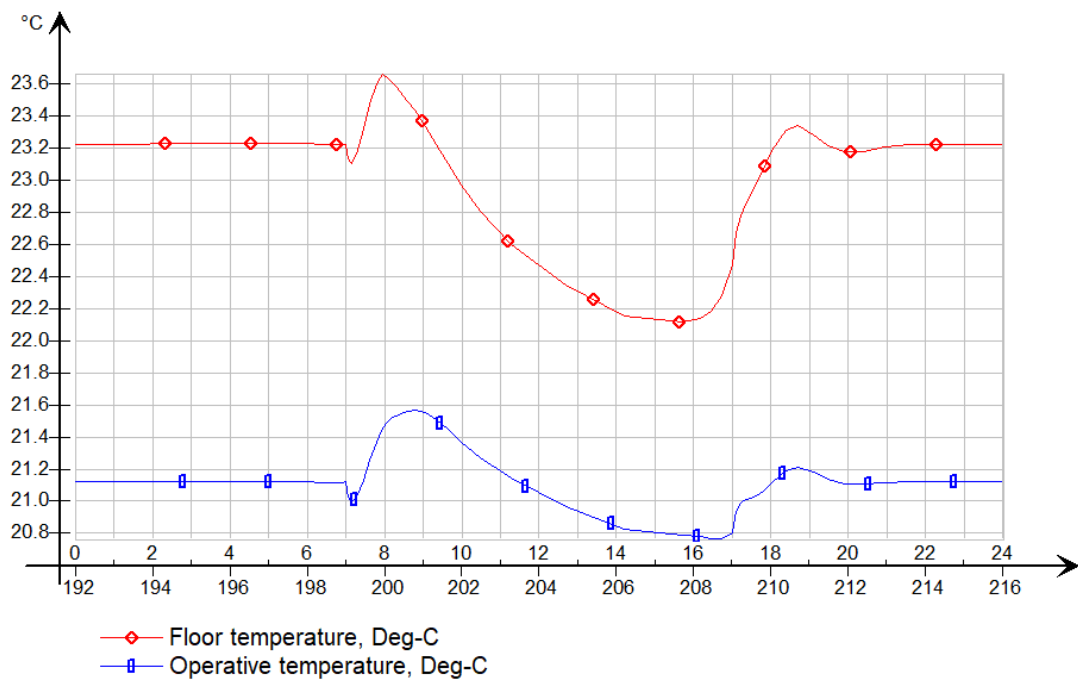
Figur 8.2.: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 1».

Når det kommer til sonens komfortopplevelse undersøkes rommets operative temperatur, gulvets overflatetemperatur og de beregnede PPD-verdiene. Temperaturene er fremstilt i påfølgende Figur 8.3 og PPD-verdiene i Figur 8.4.

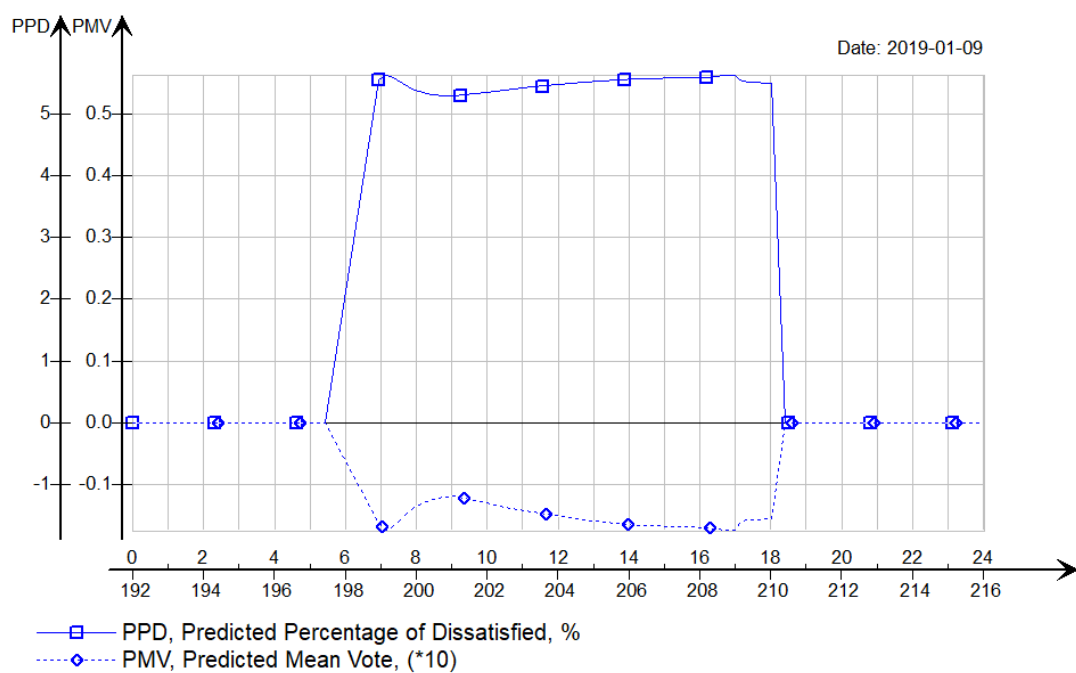
Den operative temperaturen holder en stabil $21,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ før okkupantene ankommer sonen. Temperaturen øker $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ før den gradvis synker $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ under settpunktstemperaturen. Okkupantene forlater sonen 17:00 og temperaturen øker og stabiliserer seg tilbake på settpunktstemperatur.

Temperaturforløpet til den operative temperaturen og overflatetemperaturen til gulvkonstruksjonen har svært lik profil. Overflatetemperaturen holder en stabil temperatur på $23,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ og øker med $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ i perioden hvor ventilasjonen starter og okkupantene ankommer, rundt en time raskere enn temperaturen i rommet. Den tydeligst forskjellen mellom profilene, er temperaturfallet i perioden med okkupanter. Gulvtemperaturen synker med en differanse på $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra $23,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ned til $22,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, som er mer enn tre ganger så mye som den operative temperaturen. Den operative temperaturen stabiliserer gulvtemperaturen tilbake til settpunktstemperaturen etter okkupantene har forlatt sonen.

I referansesimuleringen er det størst misnøye mot slutten av arbeidsdagen når temperaturen i sonen synker under $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra klokken 12:30 og ned mot $20,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ klokken 16:30. Dette kommer av at gulvvarmesystemet først starter når temperaturen i sonen er under settpunktstemperaturen og tregheten gjør at responstiden til systemet gir liten tid før temperaturen stiger til den satte temperaturen. Den minste temperaturen oppnådd i løpet av dagen er rett under settpunktstemperaturen som også resulterer i at PPD-verdien stiger i takt med den synkende temperaturen. En PPD-verdi på $5,5\%$ i tre timer er ansett som akseptabelt siden inneklimate betraktes som uakseptabelt dårlig først når den ventede andel misnøye er høyere enn 10% .



Figur 8.3.: Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 1». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overfaltetemperatur (RØD).

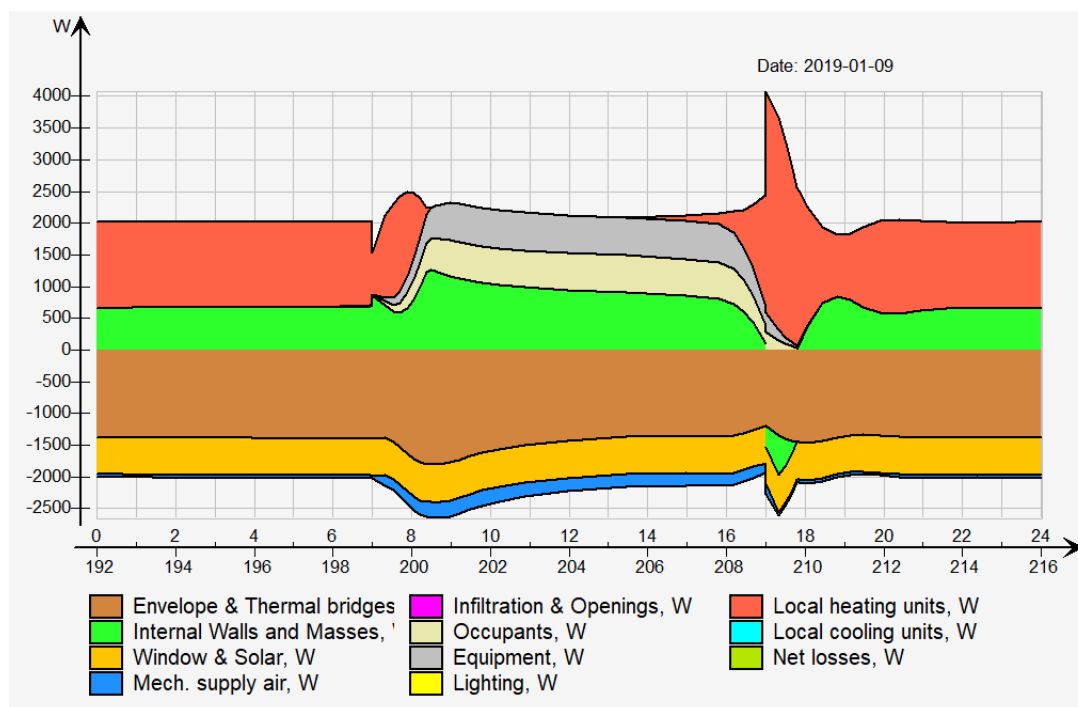


Figur 8.4.: Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 1».

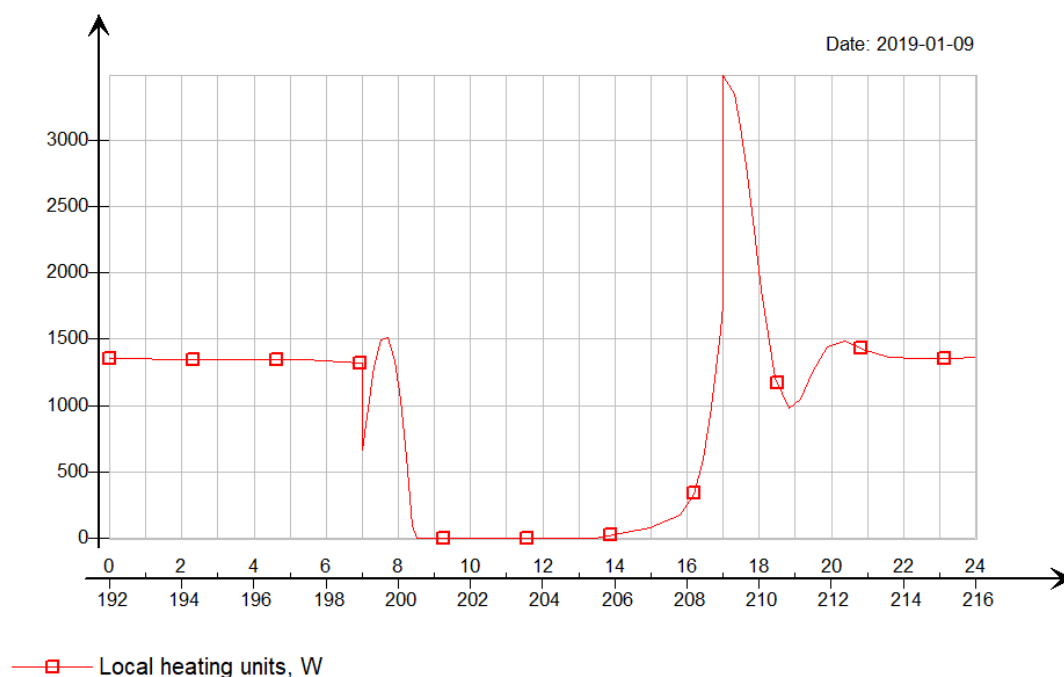
8.1.2. Last 2

Hensikten med «Last 2» er å redusere den første effekttoppen som oppstår om morgenen i perioden mellom 07:00 til 09:00 uten å ta hensyn til hvordan resten av pådraget endres. Det er interessant å observere hvordan effektpådraget gjennom det resterende døgnet påvirkes som resultat av pådragsforandringen fra morgenen.

Figur 8.5 og 8.6 viser effektbruken til sonen gjennom en hverdag med drift for «Last 2». Effektpådraget holder seg jevnt på 1400 W gjennom perioden pådraget er satt til 100 % (00:00-07:00 og 18:00-24:00). Den første effekttoppen som oppstår mellom 07:00 og 09:00 har blitt redusert fra 2250 W ned til 1500 W. Effekttoppen er nærmest ikke eksisterende. Gjennom okkupantenes oppholdstid er pådraget fra gulvvarmen, som i «Last 1», slått av. Den andre effekttoppen i perioden mellom klokken 16:00 og 18:00 har økt betraktelig fra 2250 W opp til 3500 W. Effekttoppen er kortvarig og effektpådraget synker hurtig ned til en stabil 2000 W som opprettholdes gjennom kvelden og frem mot klokken 07:00.



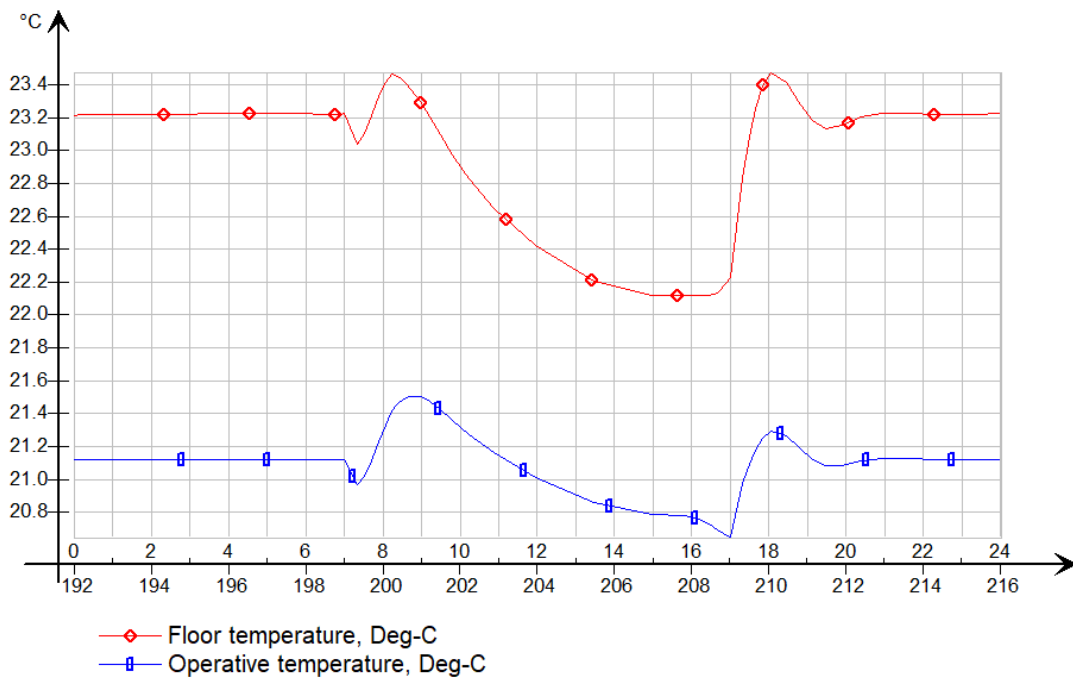
Figur 8.5.: Effektpådrag fra «Last 2».



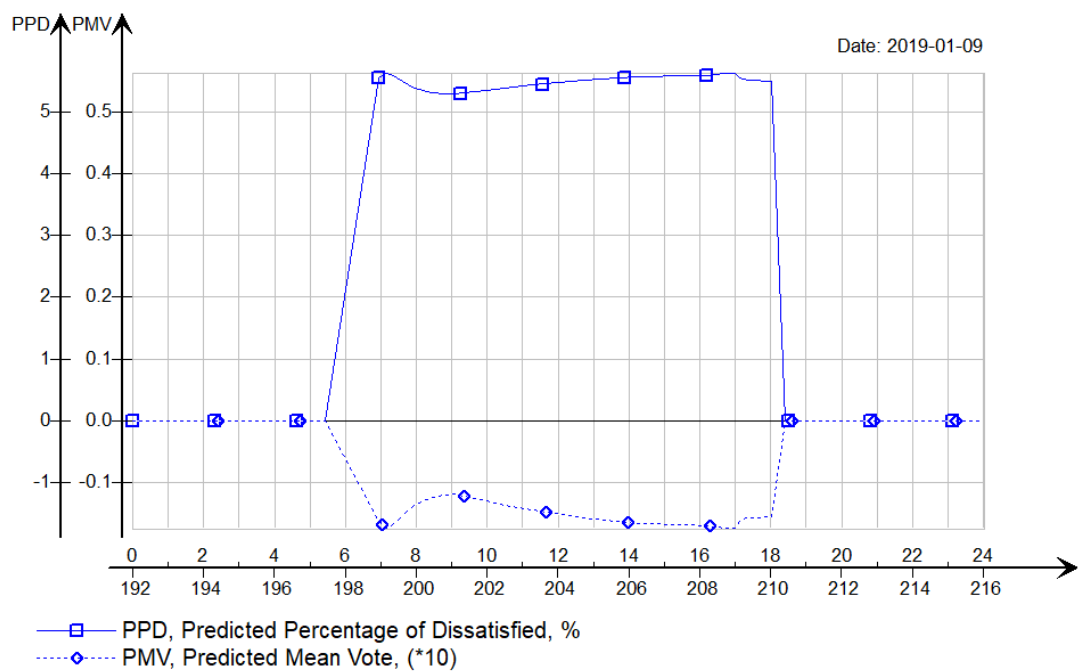
Figur 8.6.: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 2».

Den operative temperaturen holder seg relativt jevn gjennom døgnet. Systemet bestreber etter å opprettholde settpunkttemperaturen på $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ og pådraget varierer deretter. Resultatene vist i Figur 8.7 er veldig lik resultatene av temperaturene fra «Last 1». En temperaturtopp oppstår litt før 09:00, deretter synker temperaturen gradvis før okkupantene forlater sonen. Etter dette går temperaturen tilbake til settpunkttemperaturen.

Resultatet fra «Last 2» vist i Figur 8.8 viser at andel misnøye holder seg stabilt mellom 5-6 %. Det betyr at den termiske komforten er innenfor akseptable verdier. Fra figurene om «Last 2» ser man at det kommer en rask og høy effekttopp på ettermiddagen, men dette påvirker ikke andelen misnøye fordi det skjer etter at arbeidsdagen er over og okkupantene har dratt hjem. PPD-grafen følger temperaturgrafene og det er en jevn stigning fra rett over 5 % misnøye klokken 09:00 til 5,7 % klokken 17:00. Dette er veldig likt det som skjer under «Last 1».



Figur 8.7.: Temperaturforløp gjennom døgnet for «Last 2». Operativ temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).

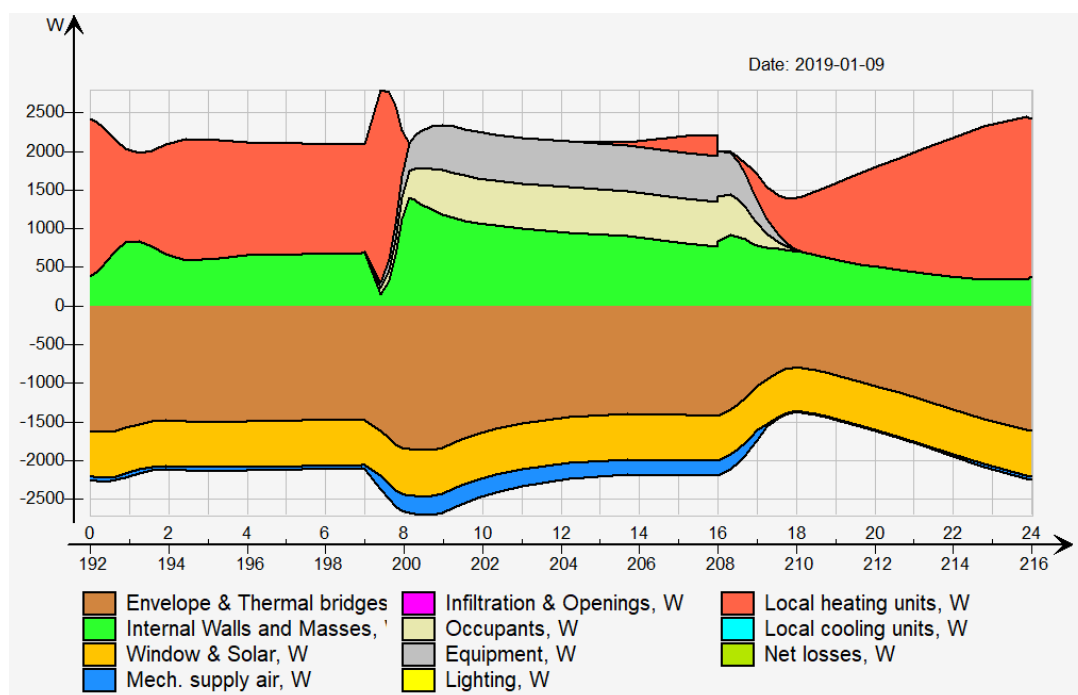


Figur 8.8.: Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 2».

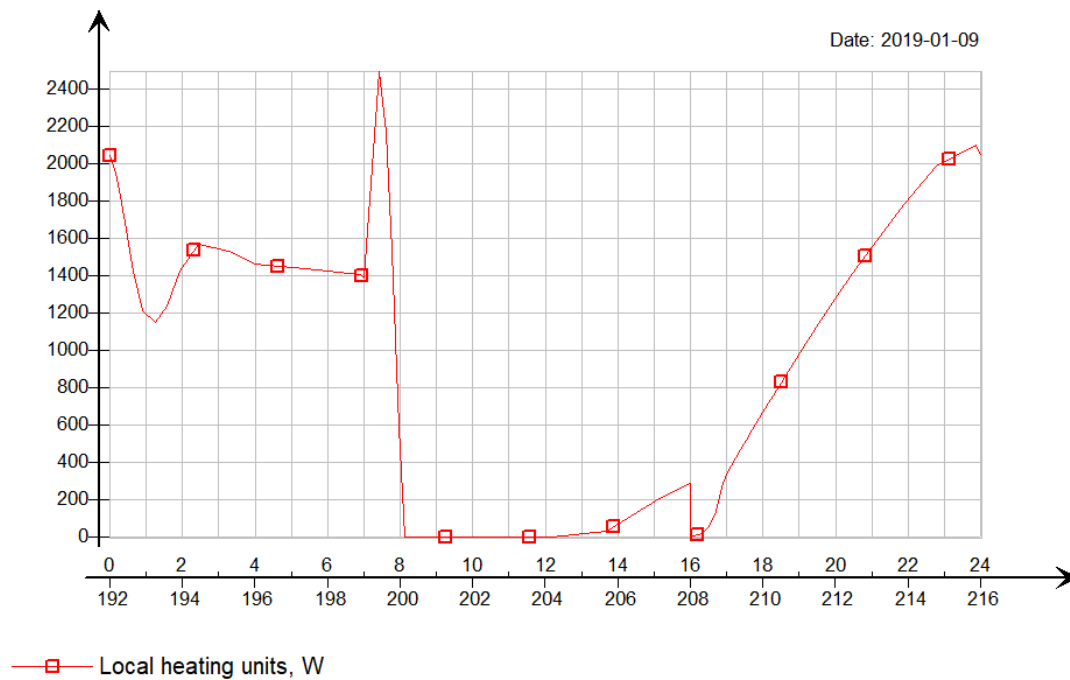
8.1.3. Last 3

«Last 3», som «Last 2», forsøker å redusere en effekttopp, men her er målet å redusere effekttoppen som oppstår på ettermiddagen, i perioden mellom 16:00 til 18:00 uten å ta hensyn til hvordan effektpådraget gjennom døgnet endrer seg. For denne lasten, som «Last 2», er det også interessant å observere hvordan resten av pådraget endrer seg i løpet av dagen.

Figur 8.9 og 8.10 viser det resulterende effektpådraget fra «Last 3». Effekttoppen som oppstår på ettermiddagen i «Last 1» er nå fjernet helt. Figur 6.6 viser at pådraget gradvis flytter og fordeler effektpådraget utover og gjennom kvelden fra 16:00 frem til 07:00. Resultatet av dette gir en gradvis, nærmest lineær økning i effektpådrag fra 0 W klokken 16:00 opp til en effekttopp på 2100 W klokken 24:00. Effektpådraget stabiliserer seg på rundt 1400 W før effekttoppen om morgen oppstår fra 07:00 til 08:00 på 2500 W.



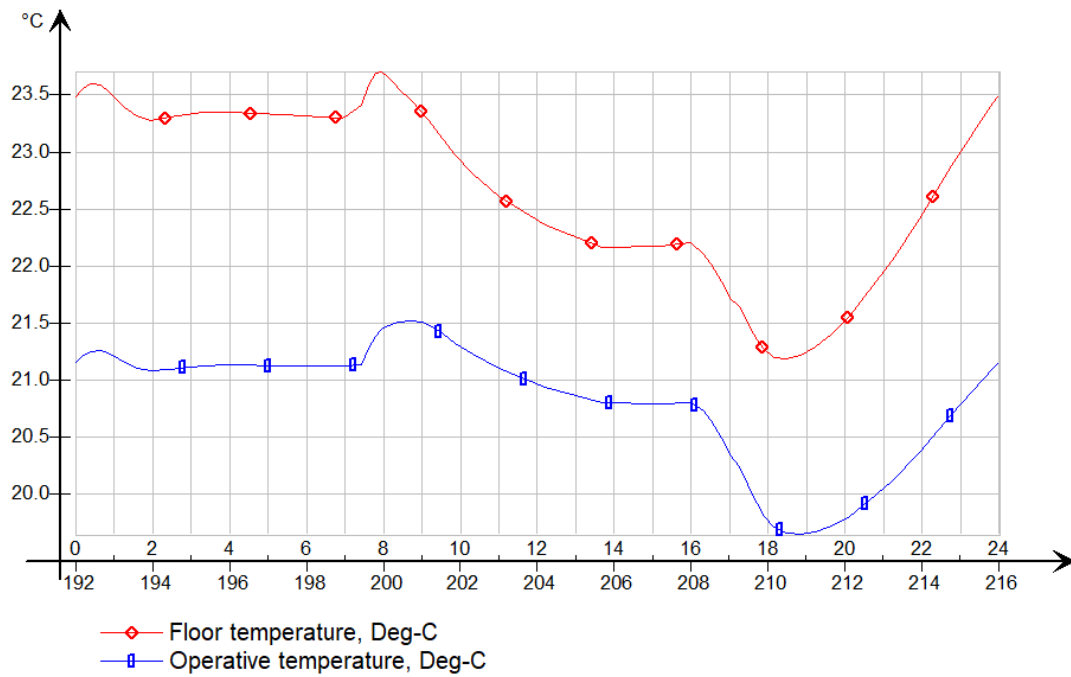
Figur 8.9.: Effektpådrag fra «Last 3».



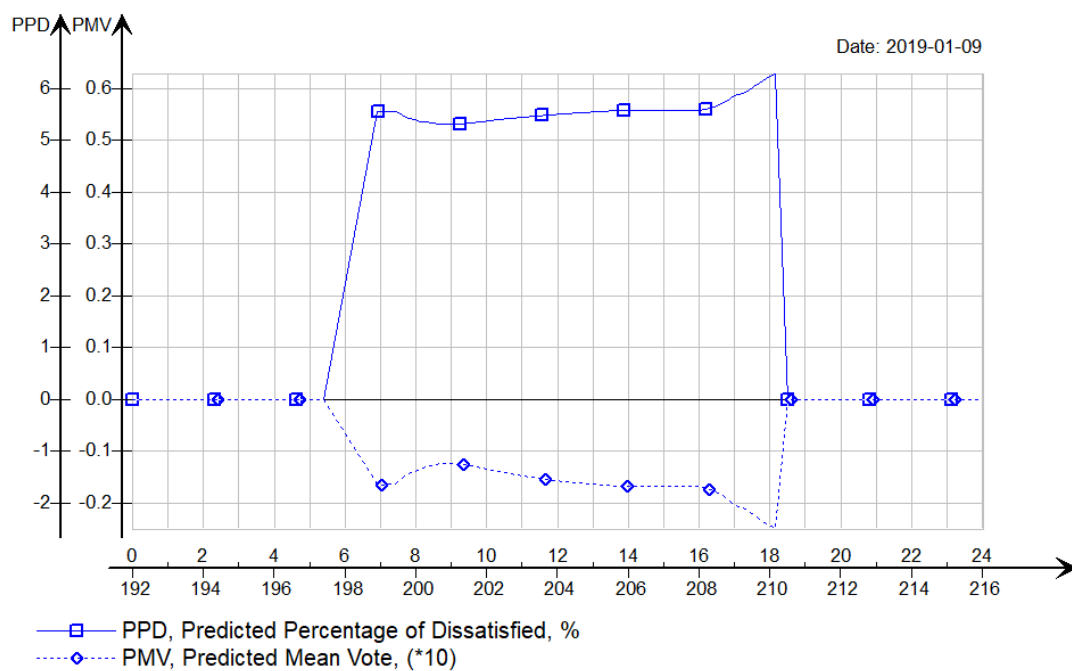
Figur 8.10.: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 3».

Temperaturprofilene for operativ temperatur i rommet og overflatetemperaturen til gulvkonstruksjonen til «Last 3», vist i Figur 8.11, har mange likheter med profilene fra «Last 1», vist i Figur 8.3. Pådraget er satt til 100 % i perioden 07:00 til 16:00 siden ventilasjonen skrur seg opp og okkupasntene ankommer sonen. Det blir økning i den operative temperaturen uten noe nedgang akkurat i det punktet når ventilasjonen starter. Det kan merkes i «Last 2» mellom klokken 07:30. Etter denne økningen synker temperaturen gradvis fra $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $20,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ før okkupasntene forlater sonen og temperaturen faller raskt til $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Videre øker temperaturen rolig tilbake til settpunktstemperaturen. Overflatetemperaturen følger svært lik profil ved en høyere temperatur. Se Figur 8.11.

I likhet med referansemodellen kommer den største andelen misnøye på slutten av okkupasntenes oppholdsperiode. 6.3 % av okkupasntene vil oppleve ubehag. Temperaturen synker under settpunktstemperaturen med ned mot $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i denne to timers perioden mellom 16:00 og 18:00 vist i Figur 8.12. Siden PPD-verdien aldri overstiger 10 % gjennom dette døgnet ses dette på som akseptabelt.



Figur 8.11.: Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 3». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).

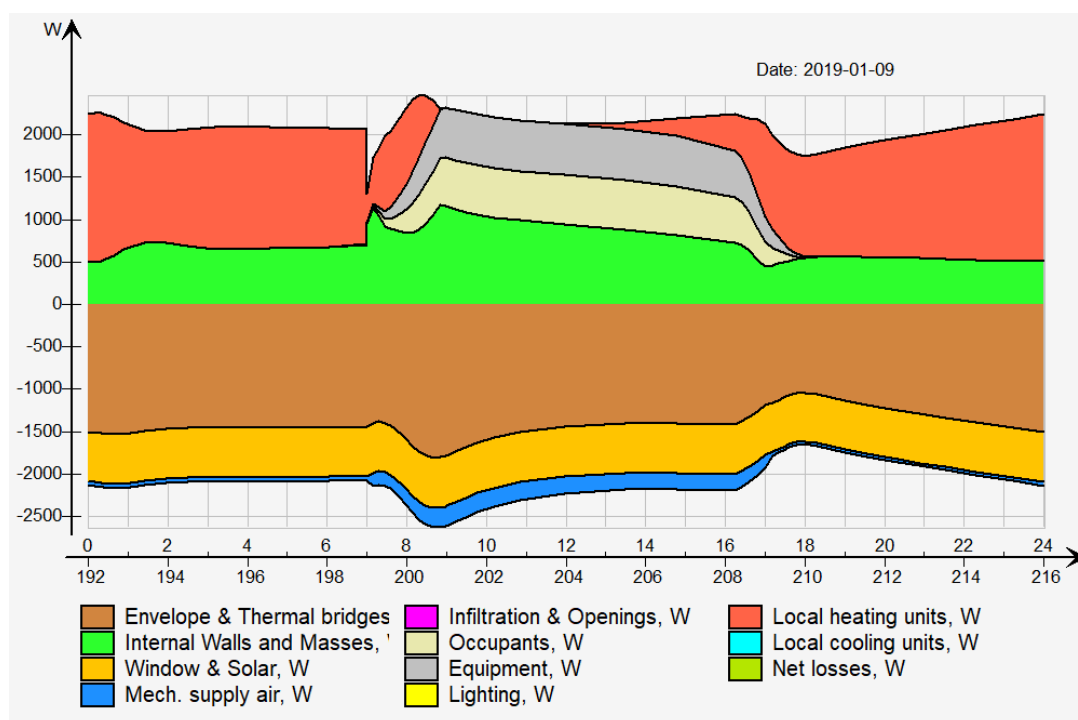


Figur 8.12.: Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 3».

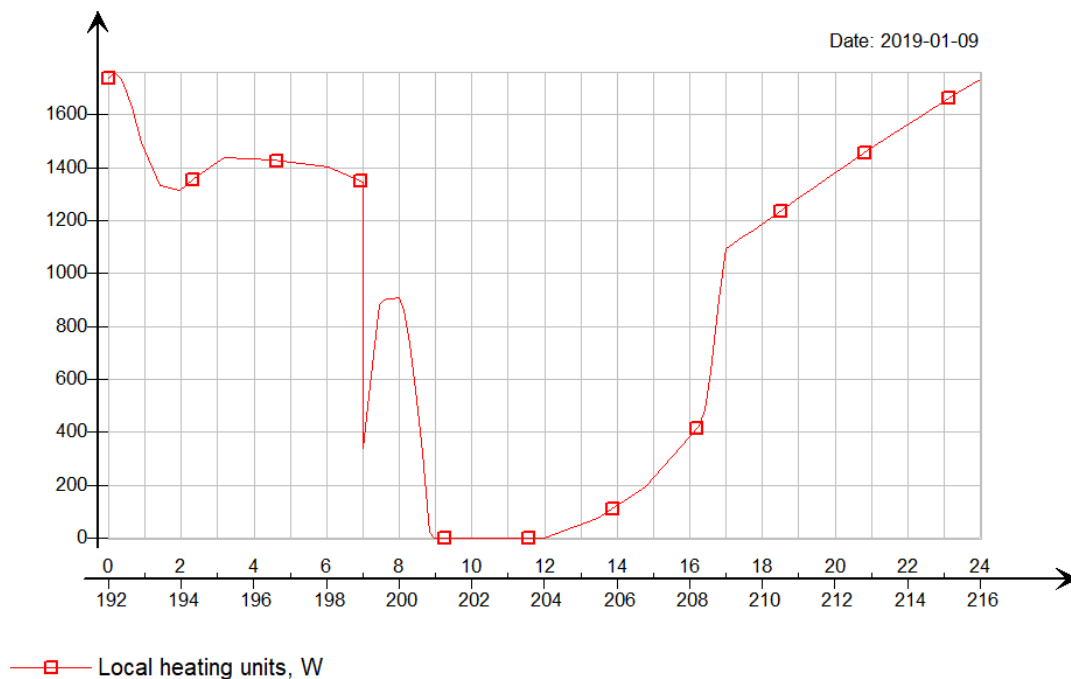
8.1.4. Last 4

Siden metodene i «Last 2» og «Last 3» har redusert effekttoppene er det nå interessant å se resultatene av å bruke begge metodene i en og samme driftsstrategi.

Det siste forsøket med «Last 4» ble det tatt data fra både «Last 2» og «Last 3» med den hensikt å redusere begge effekttoppene som oppstår i løpet av en dag. Her ble det brukt data og informasjon fra litteratursøket og laget et styringssystem med en driftsstrategi som reduserte effektpådraget slik at man unngår de to toppene som oppstår. Som Figur 8.13 og 8.14 viser holder pådraget relativt stabilt 1400 W mellom klokken 02:00 og 07:00 før pådraget reduseres og effekttoppene i tidsrommet 07:00 og 17:00 er helt borte. Under «Last 4» observerer man at pådraget fra gulvvarmen avsluttes klokken 09:00 og starter klokken 11:30 med en stigning fra 0 W til 1100 W i det nevnte tidsrommet. Fra klokken 17:00 er det et lineært pådrag mot det høyeste effektforbruket ved midnatt på 1750 W før den synker mot 1400 W klokken 02:00.



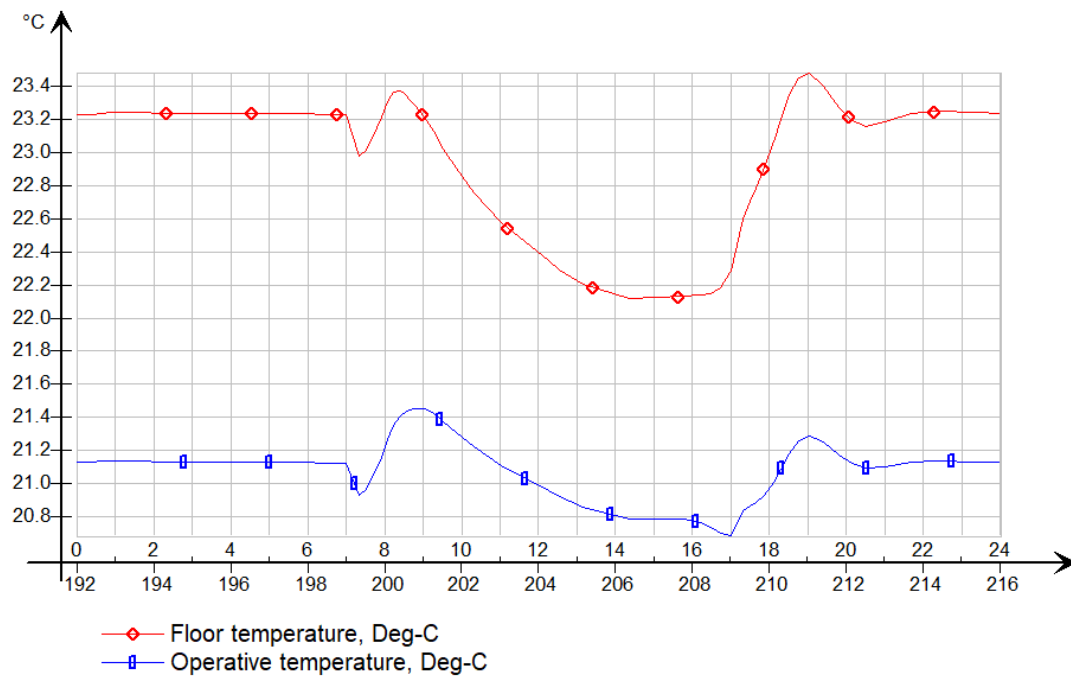
Figur 8.13.: Effektpådrag fra «Last 4».



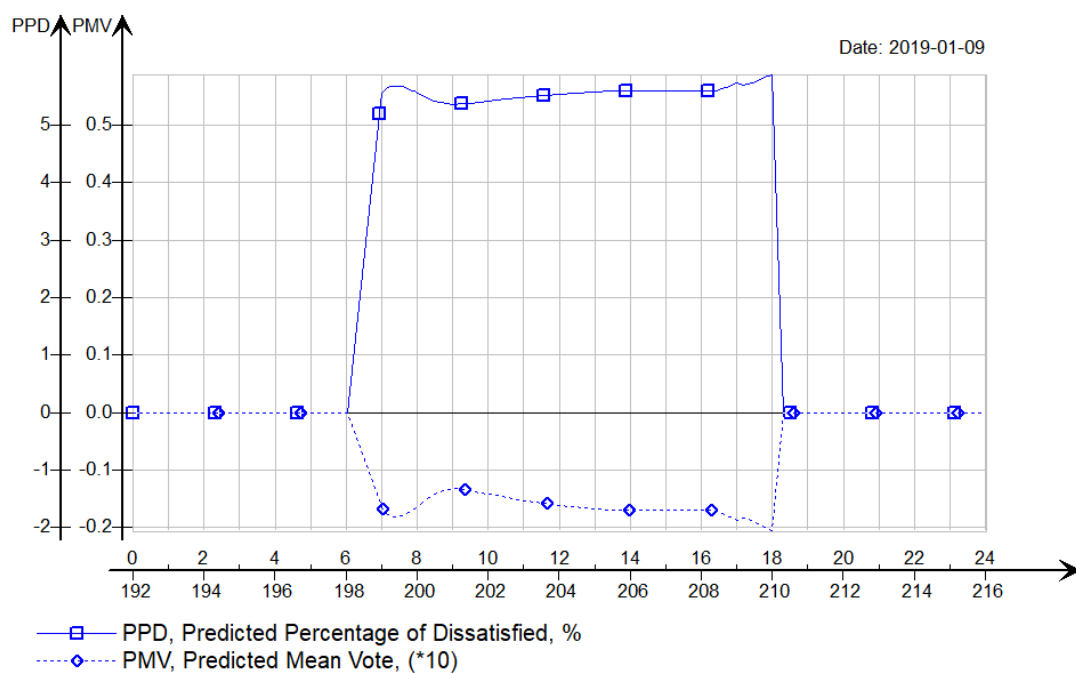
Figur 8.14.: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet «Last 4».

Under «Last 4» handler det om å redusere effektoppene samtidig som den termiske komforten opprettholdes. Fra Figur 8.15 holder den operative temperaturen en stabil $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ mellom 20:00 til 07:00 og får et kort ras når ventilasjonen skrur seg på klokken 07:00 før den stiger mot $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ klokken 09:00. Temperaturen synker gradvis mot $20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ klokken 17:00 når okkupantene og de interne lastene forsvinner før temperaturen igjen stiger til $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ klokken 19:00. Gulvtemperaturen følger et lignende mønster og har en maksimumstemperatur på $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og en minimumstemperatur på $22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den lave temperaturen mot slutten av arbeidsdagen fører til at gulvtemperaturen er noe kald, som igjen fører til en økende andel misnøye.

PPD-verdien vist i Figur 8.16 holder seg homogent innenfor 5-6 % og er derfor ansett som akseptable verdier i likhet med de andre simulerte lastene. Selv om temperaturen synker ned mot $20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ er ikke det et tilstrekkelig temperaturfall for å øke andel misnøye betraktelig.



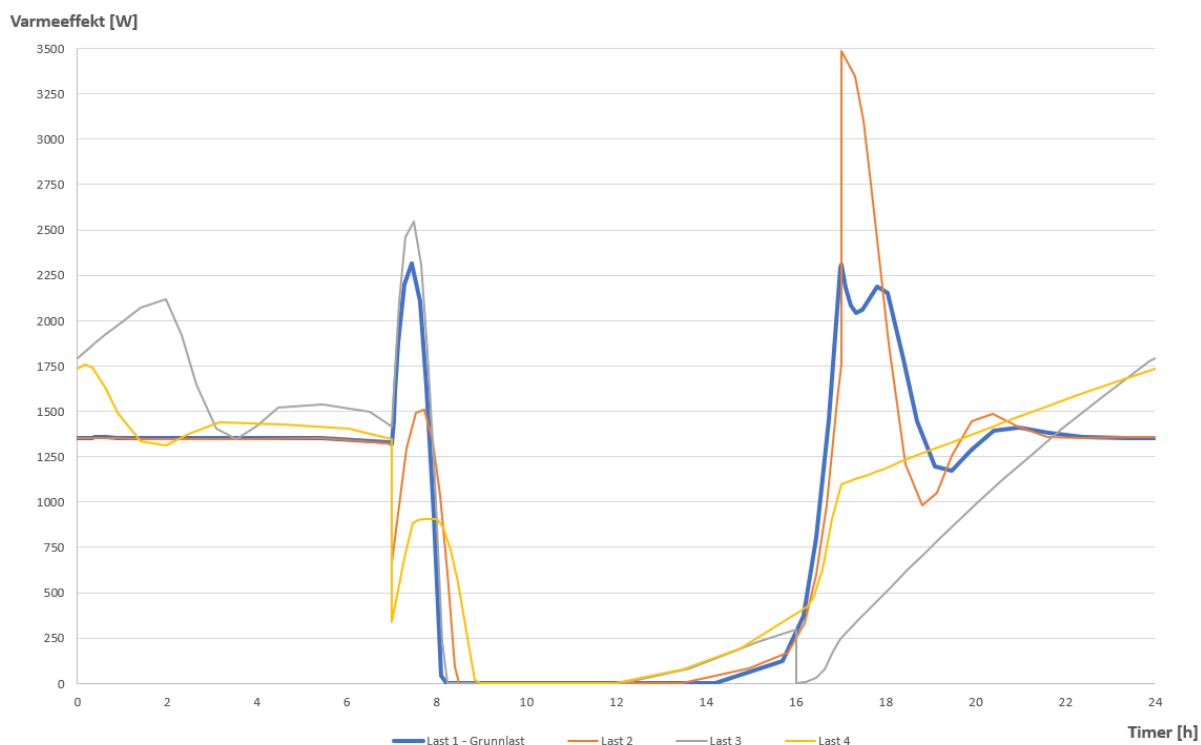
Figur 8.15.: Temperaturforløp gjennom et døgn for «Last 4». Operative temperatur (BLÅ) og gulvkonstruksjonens overflatetemperatur (RØD).



Figur 8.16.: Forventet prosentandel misnøye (PPD) i oppholdsperioden for «Last 4».

8.1.5. Sammenligning resultat IDA ICE

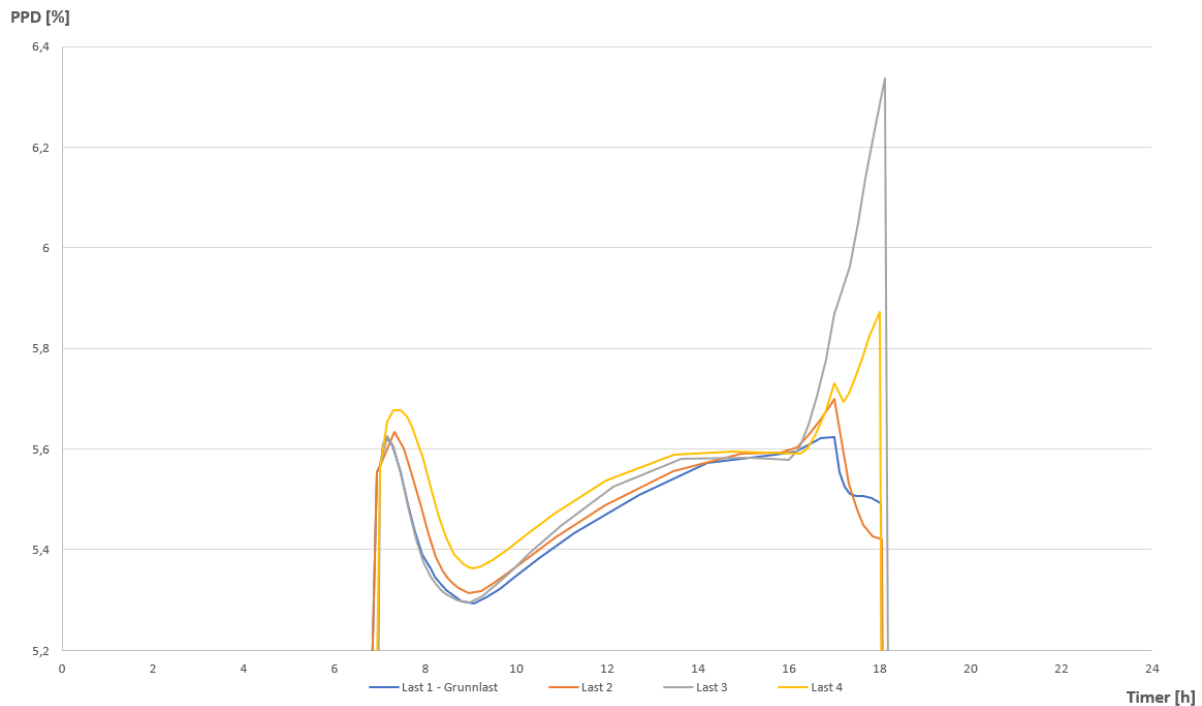
Oppgavens hovedhensikt er å se om effekttoppene fra «Last 1» i Figur 8.17 kan reduseres eller fjernes helt. I den nevnte figuren kommer det tydelig frem at «Last 2» ikke inneholder effekttoppen om morgenen og «Last 3» ikke får en effekttopp om ettermiddagen. Det medfører at det er mest relevant å sammenligne den første grunnlasten med den siste lasten for å se det optimale situasjonsbilde. Ved å se en sammenligning mellom grunnlasten «Last 1» og «Last 4» er det tydelig at effekttoppene ved start og slutt på arbeidsdagen er forsvunnet, men at «Last 4» får et maksforbruk ved midnatt som en del av lastforskyvningen. Når man ser på dataene har effekttoppen på «Last 1» et maksimalt effektforbruk på 2300 W, mens «Last 4» har et maksimalt effektforbruk på 1750 W. Det betyr at i denne simuleringen er det maksimale effektforbruket redusert med 24 % og at det høyeste effektforbruket skjer kun ved midnatt i motsetning til «Last 1» som har én effekttopp ved arbeidsdagens start og en ved arbeidsdagens slutt.



Figur 8.17.: Sammenligning av levert varmeeffekt fra de simulerte lastene.

Figur 8.18 viser at alle de simulerte lastene holder seg godt innenfor opplevelsen av termisk komfort. PPD-verdien holder seg godt under 10 % og varierer mellom 5,3-6,3 %. Det er et

tydelig mønster mellom PPD-verdiene fra Figur 8.18 mot de temperaturforløpene presentert tidligere i kapittelet. Den termiske komforten er i høy grad avhengig av temperaturen i sonen og det vises at det er mot arbeidsløpene slutt at andelen misnøye øker. «Last 3» oppnår den høyeste verdien av den grunn at temperaturen i sonen synker ned mot $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ som er betraktelig mer enn de andre lastene.



Figur 8.18.: Sammenligning av PPD for de forskjellige lastene.

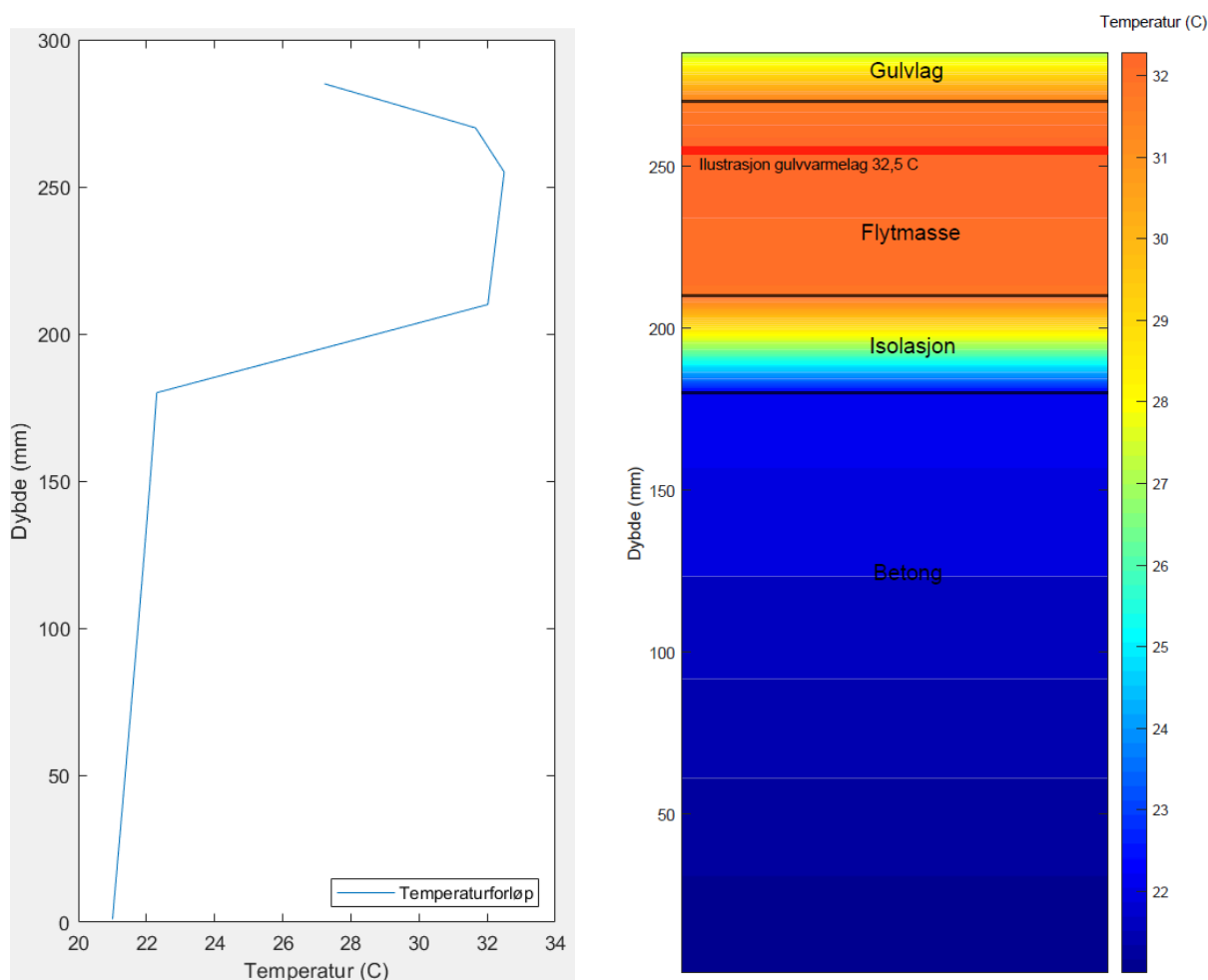
8.2. Resultat MATLAB

8.2.1. Gulvkonstruksjon etter NS-EN ISO 11855-2:2015

Temperaturendring

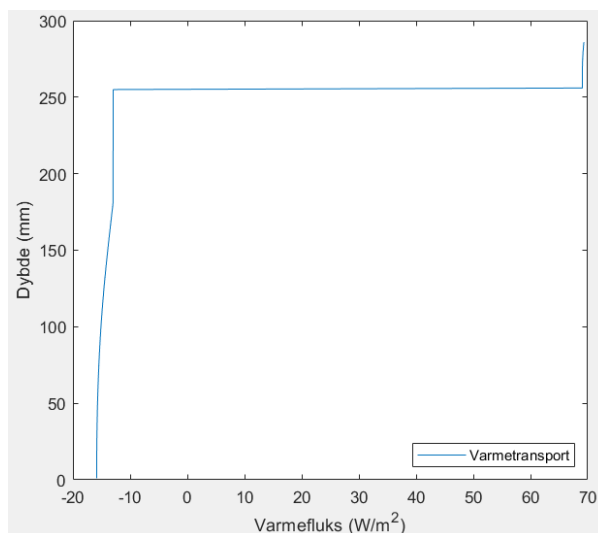
Figur 8.19 viser temperaturene gjennom gulvkonstruksjonen etter temperaturreduksjonen i varmemediet. Man får et klart bilde av hvor varmetransporten går fra et lag til et annet. De varierende lambda-verdiene i materialene gir markante endringer i grafen. Det nederste betonglaget får en slak endring i temperatur fra $21,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nederst opp til $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved isolasjonsskillet. Gjennom den tynne isolasjonen på 30 mm får man en drastisk temperaturendring fra $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. I flytmassen ligger gulvvarmeledningen.

Temperaturen synker mot neste lag både over og under gulvvarmeledningen, men siden temperaturforskjellen er større mot sonen blir grafen brattere over. I gulvdekket mot sonen får vi et temperaturfall fra $31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $27,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 8.19.: Temperatur gjennom gulvkonstruksjon i stabil tilstand.

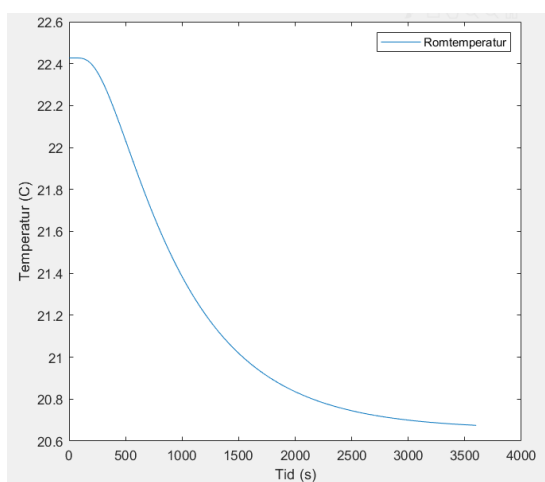
Figur 8.20 viser hvordan varmekraften oppfører seg gjennom gulvkonstruksjonen ved stabil tilstand. Det oppstår et kontinuerlig energitransport gjennom alle lagene før og etter gulvvarmeledningen, vist med negativt fortegn ned og positivt fortegn oppover i konstruksjonen. Mengden materiale mellom gulvvarmeledningen og rommet under gir en lav varmekraft nedover i gulvkonstruksjonen, $-15,6\text{ W/m}^2$ på det meste i betongen og opp til $-13,0\text{ W/m}^2$ i isolasjonen og flytmassen før gulvvarmeledningen. Etter gulvvarmeledningen blir varmekraften i flytmassen $69,0\text{ W/m}^2$ og øker til $69,3\text{ W/m}^2$ ved gulvoverflaten. Med stor temperaturdifferanse over en kort avstand blir varmekraften stor.



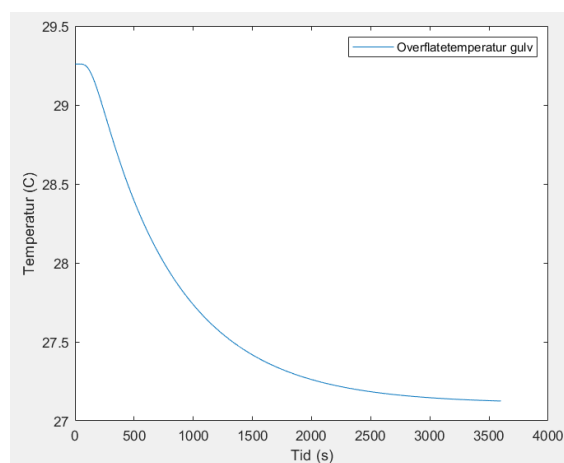
Figur 8.20.: Varmefluks gjennom konstruksjonen, stabil tilstand.

Figur 8.21 viser temperaturendringene i rommet etter gulvvarmen reduseres fra 35-32,5 °C. Romtemperaturen blir estimert til 22,4 °C før temperaturendringen igangsettes og romtemperaturen begynner å synke resulterende. Romtemperaturen begynner å stabilisere seg ved 20,7 °C.

Figur 8.22 viser temperaturendringene på overflaten av gulvkonstruksjonen som oppstår på samme grunnlag som romtemperaturendringene. Estimert blir overflatetemperaturen 29,3 °C og synker ned til 27,1 °C.



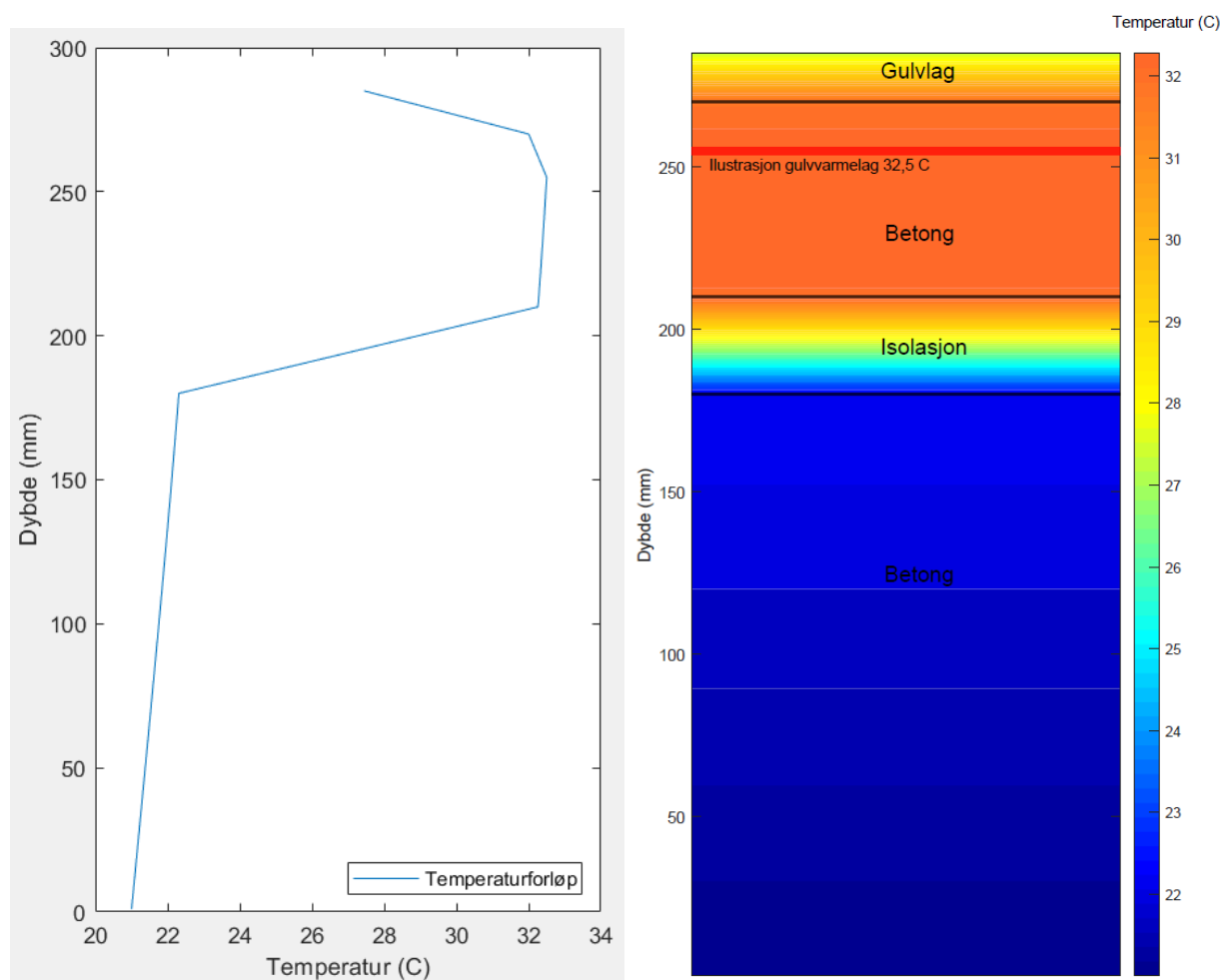
Figur 8.21.: Romtemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.



Figur 8.22.: Overflatetemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.

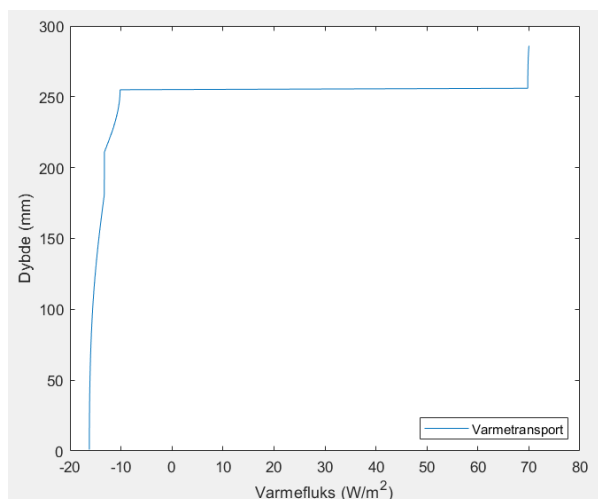
8.2.2. Tyngre konstruksjon

Figur 8.23 viser en svært lignende graf som Figur 8.19. Fra bunnen av det nederste betonglaget til toppdekket, oppstår det en lineær temperaturøkning fra $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ opp til $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Under gulvvarmeledningen faller temperaturen til $32,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ før isolasjonen, mens den faller til $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ før gulvdekket slik at overflatetemperaturen til slutt blir $27,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 8.23.: Temperatur gjennom konstruksjon i betong i stabil tilstand.

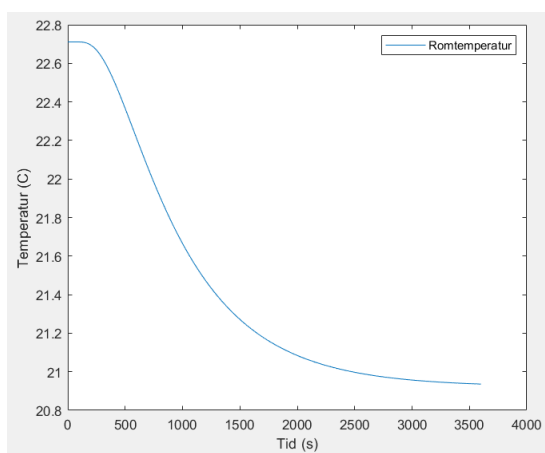
Figur 8.24 viser den stabiliserte varmekraften gjennom den tyngre konstruksjonen. Gjennom det nederste betonglaget øker varmekraften fra $-16,2\text{ W/m}^2$ til $-13,3\text{ W/m}^2$ opp til og igjennom isolasjonen. Gjennom det andre laget med betong øker varmekraften til $-10,2\text{ W/m}^2$. Etter gulvvarmeledningen, videre gjennom betongen holder varmekraften en stabil $69,8\text{ W/m}^2$ før den øker til 70 W/m^2 i gulvdekket.



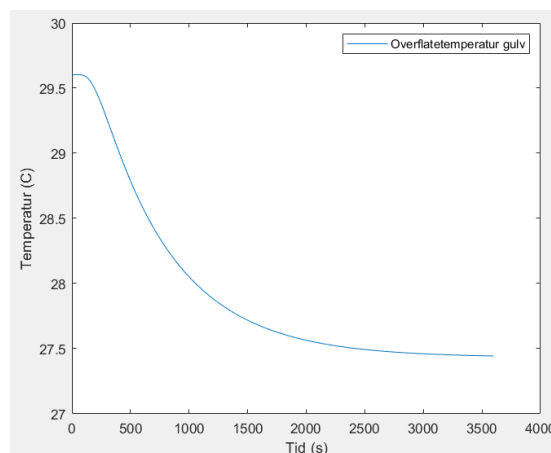
Figur 8.24.: Varmefluks gjennom konstruksjonen, stabil tilstand.

I Figur 8.25 kan man se hvordan romtemperaturen reagerer på en temperaturendring i gulvvarmen. Ved $35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gulvvarme stabiliserer romtemperaturen seg på $22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Etter temperaturendringen faller romtemperaturen ned $20,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I Figur 8.26 kan man se hvordan overflatetemperaturen reagerer på en temperaturendring i gulvvarmen. Ved $35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gulvvarme, stabiliserer overflatetemperaturen seg på $29,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Etter temperaturendringen faller overflatetemperaturen ned til $27,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



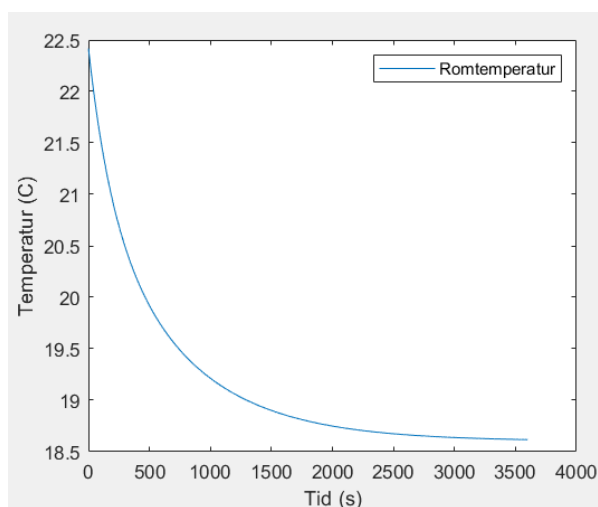
Figur 8.25.: Romtemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.



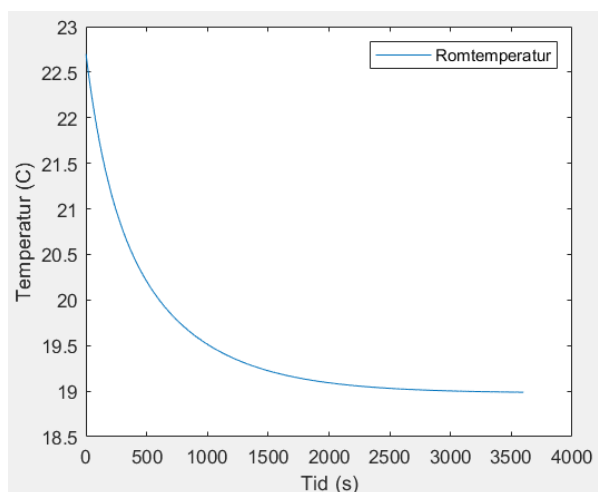
Figur 8.26.: Overflatetemperaturforløp ved endring av gulvvarmetemperatur.

8.2.3. Internlastendring

Figur 8.27 og 8.28 viser hvordan romtemperaturen endrer seg etter internlasten går fra $33,5 \text{ W/m}^2$ til 0 W/m^2 . Temperaturen i rommet, Figur 8.27, faller fra $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ og stabiliserer seg på $18,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen i rommet med den tyngre gulvkonstruksjonen, Figur 8.28, faller fra $22,7 \text{ }^\circ\text{C}$ og stabiliserer seg på $19,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Differansen mellom start og slutt temperaturen er svært lik begge figurene, men temperaturen i rommet med den tyngre gulvkonstruksjonen har en litt slakere kurve.



Figur 8.27.: Romtemperatur ved endring av interne laster ved standard gulvkonstruksjon.



Figur 8.28.: Romtemperatur ved endring av interne laster ved tyngre konstruksjon.

9. Diskusjon

9.1. Litteraturstudie

Det er studert litteratur med grunnlag fra vitenskapelige rapporter, masteroppgaver, doktorgradsavhandlinger, artikler, skolelitteratur og prosjektoppgaver. Alt er fra relevante webområder som Oria og Google Scholar med pålitelige kilder til informasjonen og teorien som er presentert. Denne oppgaven baserer seg på et utvalg av kilder, hvor et ledende prinsipp i utvelgelsen har vært å følge kildene lengst mulig tilbake til sin opprinnelse. Dette har medført at oppgaven i stor grad består av kilder med en bred dekning og solide referanser.

Kapittel 2 handler om introduksjonen til hvordan et gulvvarmesystem fungerer og er dimensjonert i dag. Dette gir simuleringen et grunnlag for hvordan «Last 1», omtalt i metoden, skal settes opp.

Termiske komfort, kapittel 3, gir et grunnlag for tolkningen av komfort og inneklime fra simuleringen i IDA ICE. Dette er et viktig kapittel som gir forståelse for hvilke faktorer som påvirker opplevelsen av den termiske komforten til okkupantene. Denne forståelsen gir grunnlag for hvilke av faktorene som er relevante å bruke i simuleringen for å få ut resultater som er av interesse for denne oppgaven.

Kapittel 4 og 5 omhandler de mest interessante resultatene fra litteraturstudiet. Det er undersøkt hvordan termisk energi lagret i termisk masse kan brukes til å optimalisere energitilførsel til rommet, minimere effekttopper og opprettholde et stabilt inneklime. Etter undersøkelse er det avdekket at en mulig løsning er å foreta en lastforskyvning, ved å bruke den naturlige tregheten i termisk masse slik at man utnytter den termiske energien ved et senere tidspunkt enn når den generes. Med denne strategien utnytter man overskuddsenergi fra perioder med lavt varmebehov i perioder med stort varmebehov. Denne driftsstrategien er det som oppgaven bygger på siden det krever at byggets termisk masse har mulighet for en midlertidig lagring av termisk energi. Oppgaven omhandler et system som kan implementeres i et allerede eksisterende bygg, og ved å utnytte den naturlige tregheten i det allerede eksisterende konstruksjonen gjør denne strategien nettopp

det. Dette gjør at litteraturstudiet er grunnlaget for oppbyggingen av styringssystemet til simuleringen i IDA ICE.

9.2. Simuleringsmodell i IDA ICE

For å få ut gode resultater med minst mulig unødvendig data ble det valgt å gjennomføre simuleringen med kun én enkel sone. IDA ICE benytter seg av dynamiske beregninger for inn klima og energibruk for hver enkelt sone og flere soner vil føre til en eksponentiell økning av tiden det tar å gjennomføre en simulering. Dette resulterte i en oversiktlig modell som var gjennomførbar uten tidligere kunnskap med IDA ICE. Bruk av én sone førte til en betraktelig reduksjon av kompleksiteten og muliggjorde et styrket fokus på å konstruere en god modell som ga relevante data til problemstillingen.

9.2.1. Inndata

Inndataene som er benyttet i IDA ICE er i hovedsakelig basert på standardverdier fra programmet, tekniske bestemmelser, og standarder fra NS-EN ISO 11855-2:2015.

Sonen er definert som et bygg med fire yttervegger og tak mot fri luft. Gulvet er definert ovenfor en annen sone med stabilt 21 °C romluft. Dette gjør at modellen kan tenkes er en etasje med en underliggende sone. Det at sonen har fire yttervegger er ikke en reell situasjon siden en virkelig sone ville mer reelt vært et rom i et større bygg med maksimalt tre yttervegger. Bygningskonstruksjonen har selvdefinert størrelse og utforming, og er dermed ikke hentet fra noe eksisterende bygg. NS-EN ISO 11855-2:2015 er standarden som blir fulgt når gulvvarme blir lagt i dag. Gulvkonstruksjonen fra standarden tas i bruk for at resultatene fra simuleringene skal bli så reelle som mulig. De resterende bygningsdelene som vegger, tak og vinduer er basert på standarder for tunge konstruksjoner tilgjengelig i IDA ICE med kun endring på U-verdier, slik at det stemmer overens med minimumskravet.

For å få en best mulig forutsetning er det valgt vinterdagsperiode med en utetemperatur på -20 °C. Hensikten her er å få frem perioden hvor varmebehovet er på sitt største og at simuleringen ville indikere en størst mulig oppnåelig reduksjon av maksimalforbruket. Oppgaven har et fokus på oppvarmingsbehov siden dette er mest relevant for Oslo området.

9.2.2. Simuleringsintervall

Ut ifra teorkapitlene og tidligere studier har det blitt gjort antagelser over hvor eventuelle effekttopper vil oppstå igjennom en driftsdag. Simuleringsresultatene fra «Last 1» har blitt brukt til å støtte opp antagelsene. Med forkunnskap fra litteraturstudiet ble det forsøkt å implementere varmelagrings- og lastforskyvningsstrategier til driftsstrategien for å redusere effekttoppene. De tre resterende lastene presentert i kapittel 6.4 er resultater av slike driftsstrategier og et produkt av prøve- og feile-metoden. Periodene de forskjellige strategiene er implementert, er valgt med grunnlag fra teorien, men for å optimalisere resultatene finjustertes pådragene frem til ønskelig resultat. På grunn av mangler og neglisjering av forskjellige faktorer i modellen, kan disse lastene mest sannsynlig ikke implementeres direkte i eksisterende bygg som de står nå.

«Last 4», vist i Figur 6.7, er basert på metodene fra «Last 2» og «Last 3». «Last 1» viser tydelig at klokken 07 oppstår det en effekttopp. Her øker gulvvarmepådraget for å motvirke den underkjølte luften fra ventilasjonen. For å motvirke denne effekttoppen tvinges gulvvarmen til å skru seg ned i denne perioden. Fra «Last 2» kan man se at en tvungen reduksjonen i pådraget reduserer effekttoppen på morgenen, men vil øke effekttoppen etter arbeidstid. Her benyttes en lastforskyvningsstrategi for å gradvis flytte effektpådraget utover og gjennom kvelden. Å opprettholde innertemperaturen er ikke nødvendig gjennom kvelden da ingen befinner seg i bygget. Dette gjør det mulig å fokusere på å fordele effektpådraget jevnt og redusere effekttoppen.

9.3. Simuleringsmodell i MATLAB

For å underbygge at oppbyggingen av modellen i IDA ICE har en god tilnærming til virkeligheten, benyttes MATLAB for å få ut data på et teoretisk grunnlag. Modellen benytter seg av formler fra NS-EN ISO 11855-2:2015 og termodynamikkens lover presentert i kapittel 2.

De to gulvkonstruksjonene brukt i beregningene har en svært lik oppbygging. Det er kun flytmasselaget som endres til betong, en tyngre masse. Dette resulterer i at profilene til temperaturen og varmefluksen gjennom gulvkonstruksjonen, romtemperaturen og

overflatetemperaturen også blir relativt like. Grunnlaget for dette valget er å minimere unødvendige data. Det interessant å se på hvordan rom- og overflatetemperaturen reagerer ved endringer av den termiske massen. Ved å kun forandre på tyngden til materialet, isolerer vi dette som den eneste faktoren som påvirker resultatet.

MATLAB bruker informasjon som varmetap ut av sonen, sonens internlaste og gulvets materialegenskaper fra modellen i IDA ICE. MATLAB skal underbygge og støtte opp simuleringmodellen i IDA ICE og sette spørsmål om modellen er satt opp korrekt. Hvis verdien tatt fra IDA ICE ikke er reelle, kan resultatene ha en viss usikkerhet ved seg.

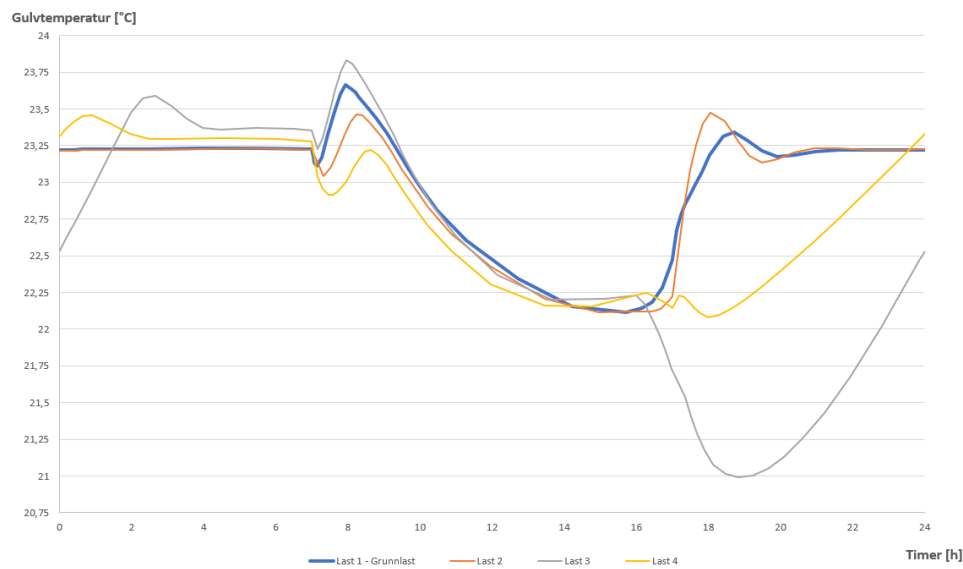
9.4. Resultatene fra simulering i IDA ICE

Simuleringsresultatene viser til at en kobling mellom en lastforskyvningsstrategi og tregheten i bygningsmassen vil føre til en reduksjon av de maksimale effekttoppene. Utfallet av simuleringen viser seg å stemme godt overens med det som ble presentert i teorien. Resultatene fra simuleringen kan derfor betraktes som pålitelige i den hensikt at de gir en indikasjon på hvordan et bygg kan respondere med de simulerte driftsstrategiene. Simuleringen har vist at det er gjennomførbart å kunne redusere effekttilførselen og samtidig opprettholde den operative temperaturen uten en for stor påvirkning av den termiske komforten.

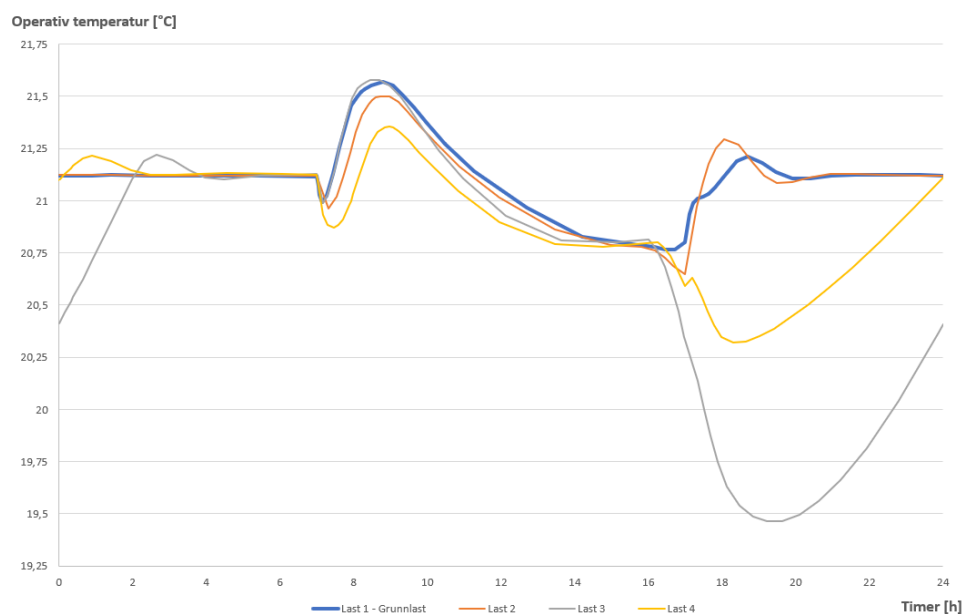
Fra effektpådraget slutter rundt 07:00 til 09:00 fra de forskjellige lastene kan man se en tydelig synkende operativ temperatur til pådraget begynner igjen. Dette kan tolkes som den termiske tregheten i bygningskonstruksjonen av den grunn at gulvtemperaturen synker gradvis fortere enn den operative temperaturen samtidig som den operative temperaturen ikke har like hyppige svinger. Hadde bygningen bestått av en termisk tyngre konstruksjon, ville vi sett en enda større forskjell etter at effektpådraget slutter. Ved å øke byggets tidskonstant vil man samtidig øke varmetregheten og dermed få en operativ temperatur som har en mindre variasjon.

Fra de påfølgende figurene Figur 9.1 og 9.2 observerer man at alle temperaturene synker i løpet av arbeidsdagen som er resultat av at varmepådraget fra de interne lastene og gulvvarmen ikke er nok til å opprettholde den operative temperaturen i seg selv. Den

termiske tregheten i bygningsmassen har en innvirkning på hastigheten temperaturen synker med som vises ved at gulvets temperatur synker fortere enn den operative temperaturen. Dette viser at varmetilskuddet fra byggets masse er med å hindre raske temperatursvingninger i sonen.



Figur 9.1.: Sammenligning av gulvvarmetemperaturen ved de forskjellige lastene.



Figur 9.2.: Sammenligning av den operative temperaturen ved de forskjellige lastene.

Simuleringsresultatet fra denne oppgaven viser at det er mulig å foreta en lastforskyvningsstrategi uten at det drastisk påvirker komfortnivået til personene i bygningen. Dette fører til at periodisk justering av effektpådraget resulterer i en redusert endring av lasteprofilen til varmesystemet. Teorien lagt frem i denne oppgaven viser til at en lastutjevning fører til et mer stabilt system med bedre utnytting av den tilførte energien til systemet. Dette er både miljøbesparende og en mer økonomisk måte å drifte et systemet på. En lastforskyvningsstrategi gir fleksibilitet til å kunne lagre varmeenergien i gunstige perioder og levere varmeenergi i perioder hvor det er strategisk lurt. Dette kan reflekteres tilbake til oppgavens introduksjon hvor det ble tatt opp innføringen av AMS-målere. Det betyr at man kan redusere effekttopper ved tidsrom hvor prisen på effekt er dyr, slik at man kan oppnå en mulig økonomisk besparelse. Denne oppgavens simulering gir ikke uttømmende resultater, men peker i retning av at det vil være mulig å bruke lastforskyvning som en strategi. Samtidig er et slikt system nødt til å tilpasses hvert enkelt varmesystem for å kunne brukes optimalt.

9.5. Resultat fra simulering i MATLAB

Simuleringsresultatene fra MATLAB viser at en konstruksjon med en høyere termisk masse vil ha en større tidskonstant med en tilsvarende treghet. Resultatet viser at temperaturendringen i gulvet skjer raskere enn temperaturen i rommet. Dette skjer som følge av den naturlige tregheten i den termiske massen. Ved å sammenligne romtemperaturendringene i de to gulvkonstruksjonene kan man observere at en termisk tyngre konstruksjon vil reagere tregere på en temperaturendring. Dette er i samsvar med den nevnte teorien i den første delen som viser at oppsettet og beregningene gjort i MATLAB kan tolkes å være korrekte.

Ved å redusere de interne lastene ser man et fall på rundt $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ i romtemperatur i begge simuleringene. Dette kommer av energitapet som gulvvarmen må motvirke når okkupantene forlater sonen og andre interne laster fjernes. Resultatene viser at rommet med den tyngre gulvkonstruksjonen opprettholder romtemperaturen bedre fordi temperaturen ikke endrer seg like hyppig. Grafene for varmeffluks, varmegjennomgang og gulvtemperatur ved en endring av de interne lastene ble ikke presentert i resultatet, fordi de gir gjentakende

resultater fra de tidligere simuleringene. Varmefluksen viser en økt varmetransport over konstruksjonen. Dette kommer av de økende temperaturdifferansen mellom gulvdekket og romluften.

Resultatene fra simuleringen med en variabel utetemperatur ga ikke dette forsøket vesentlige forskjeller. Dette kan være et utfall på grunn av begrensninger i MATLAB-skriptet. Det velges derfor å ikke fokusere på dette i oppgaven fordi tidligere studier, eksempelvis kapittel 5.4, har forskning som gir mer detaljerte svar på dette.

Varmetransporten fra Figur 8.19 og 8.23 viser tydelig hvordan de forskjellige lagene blir påvirket av en varmetilførsel. Man kan se at varmetransporten går tregt igjennom materialer med høy termisk konduktivitet, eksempelvis isoleringen og gulvdekket. Over dybden materialet strekker seg over synker temperaturen drastisk. Varmefluksen (7.1) bestemmes direkte av temperaturdifferansen mellom cellene, og er derfor svært stor opp mot gulvoverflaten og liten nedover gjennom konstruksjonen.

9.6. Oppsummering diskusjon

- IDA ICE er et komplekst program som har gitt oppgaven svar på problemformuleringen og oppgavens formål.
- Kvaliteten på utdata fra IDA ICE er påvirket av kvaliteten på inndata som har innvirkning på sluttresultatet. Resultatet belager seg på noen antatte verdier som regnes å være tilstrekkelig korrekte.
- MATLAB støtter at modellen i IDA ICE er satt opp korrekt, samt at formler og standarden NS-EN ISO 11855-2:2015 stemmer.
- Andre forskningsrapporter og avhandlinger som finner lignende resultater viser til at den valgte metoden er troverdig.

10. Konklusjon

Litteraturstudie i oppgaven viser til informasjon som gjør at driftsstrategier med lastforskyvning kan bidra til å redusere effekttopper uten at det går på bekostning av termisk komfort. Det kommer frem at ved å senke effektforbruket ikke nødvendigvis gjenspeiler det å redusere det totale energiforbruket. En lastforskyvning går ut på det å benytte konstruksjonen som termisk energilagring for å lagre den midlertidige varmen som tilføres massen slik at denne varmen kan utnyttes mer strategisk enn når varmen blir produsert. Hensikten her er å redusere effekttoppen som dukker opp om morgenen og ettermiddagen, og dermed mulighet for å neddimensjonere varmekilden ved å produsere varmen ved et lavere effektnivå. En effektreduksjon fører til at døgnvariasjonen i lastprofilen blir mindre og man oppnår et lavere maksforbruk av effekt. Litteraturstudiet viser videre til at konstruksjonens varmelagringspotensial øker med tyngden til materialet brukt.

Resultatene fra simuleringen i IDA ICE viser at den termiske tregheten i termisk masse kan utnyttes til å foreta en lastforskyvning uten at det har store påvirkninger på den termiske komforten. Resultatet fra simuleringen i IDA ICE underbygges av teorien fra litteraturstudiet og simuleringresultatene fra MATLAB. Resultatet fra simuleringen viser at en lastforskyvningsstrategi hvor effektpådraget tvinges til å reduseres mellom 07:00 til 09:00 og en gradvis oppvarming fra 16:00 til 24:00, fører til en lastforskyvning slik at det høyeste maksimale effektuttaket oppstår midt på natten med en oppnådd reduksjon på 24 %.

Simuleringen gjort i MATLAB støtter ytterligere opp funnene fra litteraturstudiet og IDA ICE-simuleringen. Resultatene fra MATLAB viser tydelig at å bruke tyngre materialer i gulvkonstruksjonen, vil resultere i et bedre varmelagringspotensial. Temperaturen i rommet ved bruk av den tyngste gulvkonstruksjonen, endres tregere ved temperaturendring på gulvvarmen. Dette resulterer i en mer stabil innetemperatur. Ved reduksjon av de interne lastene får man et temperaturfall. Dette skal simulere slutten av en arbeidsdag når alle okkupantene forlater bygget og andre interne laster skrur av. Energibehovet som oppstår her begrunner den siste effekttoppen som oppstår under IDA ICE-simuleringen.

Den oppnådde effektreduksjonen fra simuleringen viser at driftsstrategier kan brukes for å redusere effekttoppene og at en lastforskyvningsstrategi vil fungere som forventet. Om et gulvvarmesystem i et eksisterende bygg vil benytte seg av denne strategien, vil det være mulig å redusere effekttoppene. Dette forutsetter at styringssystemet blir regulert slik at det tilpasses bygget det er i og utnyttes på en best mulig måte.

En implementering av et slikt lastforskyvningssystem kan være en løsning som bidrar til senkning av maksimal effektbruk og reduksjon av varmebehovet. Dette kan videre føre til mulighet for en neddimensjonering av varmesystemet, og en miljømessig og økonomisk gevinst.

10.1. Videre studier

En mulig vei videre er å implementere metodene i et reelt bygg, både simulert og operativt. Et reelt bygg har flere faktorer som må tas med i betraktning når man gjennomfører simuleringer, i tillegg til at det er interessant å se i hvilken grad disse faktorene påvirker resultatene. Dette ville naturlig bygget videre på simuleringen i denne oppgaven, som er gjennomført med en simplere modell. Lastforskyvningsprinsippet er bevist, men det er fortsatt interessant å se hvilke resultater et operativt bygg vil gi ved å få tilgang til styringssystemet for endring av det eksisterende byggets driftsstrategi. Styringssystem er kompliserte og det er også interessant å se på andre måter å styre et varmesystem. Dette kan være forskjellen mellom et tradisjonelt vannbårent gulvvarmesystem og et elektrisk varmesystem som er styrt syklisk.

Med stadig utviklende bygningsstrategier og forskrifter, klare man å utnytte den tilførte varmen mer effektivt og kan derfor opprettholde en mer stabil innetemperatur. Metodene presentert i denne oppgaven er avhengig av en variasjon i romtemperatur som tilsier at en desto større temperaturforskjell, desto bedre. Her er det mulig å se på hvilken relevans et TES-system har i videre utvikling av bygningers krav mot varmetap.

Denne oppgaven har undersøkt effektbehovet til en enkel sone, hvor det er vist at det maksimale effektpådraget kan reduseres med 24 %. En videre studie kan være å gjennomføre en neddimensjonering av det maksimale effektpådrag til et helt bygg med mange soner,

uten at det går på bekostning av okkupantenes termiske komfort.

Et annet perspektiv er å se på den økonomiske gevinsten med effekt ved å neddimensjonere et anlegg samtidig som man ser på kvaliteten dette har for utstyret. Her går det også an å se på hvor mange prosent man kan neddimensjonere om man tillater seg en enda større andel misnøye og foretar en lastforskyvning slik at det maksimale effektuttaket skjer om nattet. For å få en videre økonomisk gevinst kan det være interessant å se på effektprising med innføring av AMS målere. Er det gunstig å flytte effekttopper til perioder med lave priser, kontra det å ha et stabilt pådrag over hele dagen?

Bibliografi

- [1] Eivind Reiten, Lars Sjørgard og Kristin Bjella mfl. *Et bedre organisert strømnett*. Tekn. rapp. Olje- og energidepartementet, 2014.
- [2] Lovinda Ødegården og Sajjan Bhandari. *Status og prognoser for kraftsystemet 2018*. Tekn. rapp. 2018. URL:
http://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018_103.pdf.
- [3] C. O'Dwyer. *Energy Affordability, Debt & the Needs of Low Income Consumers: Three Industry Perspectives*. (2013). URL:
http://defgllc.com/publication/%20energy-affordability-debt-the-needs-of-low-income-consumers_%20three-industry-perspectives/.
- [4] Hafslund Nett. *Nettleiepriser for bedrifter og næringsliv*. 2014. URL: http://www.hafslundnett.no/nett/artikler/les_artikkel.%20asp?artikkelid=239.
- [5] Lena Olsson Ingvarson og Sven Werner. «Building mass used as short term heat storage». I: *11th International Symposium on District Heating and Cooling, Reykjavik, Iceland, August 31–September 2, 2008*. 2008.
- [6] Sandy Halliday og Paul Jones. *Facilities Report 02 A designer's guide to underfloor heating in sports halls*. URL:
https://sportscotland.org.uk/documents/facilities/sports_halls/a_designers_guide_to_underfloor_heating_in_sports_halls.pdf.
- [7] Ingrid Mattsson og Gary Fries. «RADIANT HEAT WITH CONCRETE». I: bd. 18. 1. Portland Cement Association. 5420 Old Orchard Road Skokie, Illinois 60077-1083, apr. 1997.
- [8] Viega. *Concrete System: Installation Manual*. 2009. URL:
https://www.viega.net/cps/rde/xbcr/en-us/Viega_%20Concrete_Systems.pdf%EF%BF%BD.
- [9] Uponor. *Radiant Heating and Cooling Systems: Complete Design Assistance Manual (CDAM)*. 2011.
- [10] Henrik Gadd og Svein Werner. «Daily heat load variations in Swedish district heating systems». I: *Applied Energy* 106 (2013), s. 47–55.

- [11] Tor Helge Dokka, Michael Klinski og Matthias Haase mfl. «Kriterier for passivhus-og lavenergibygg–Yrkesbygg». I: (2009).
- [12] Warfvinge og Catarina. *Installationsteknik AK för V*. Studentlitteratur, 2007.
- [13] Norsk Standard. «NS 3700: 2013». I: *Kriterier for passivhus og lavenergihus–Boligbygninger* (2013).
- [14] Martin Andersen, Ole Larmerud og Rørentreprenørene Norge. *Rørhåndboka fagdel 2019*. 2019. utg. Oslo: VVS-foreningen/Skarland Press AS, 2018.
- [15] Vojislav Novakovic mfl. «Enøk i bygninger-Effektiv energibruk». I: *Oslo: Gyldendal undervisning* 63 (2007).
- [16] Henrik Karlsson. *Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems-supply temperature optimisation and self-regulating effects*. Chalmers University of Technology, 2010.
- [17] Leif I. Stensaas. *Inneklimateknikk*. mul;nor;nno. VVS-teknikk. Oslo: Gyldendal yrkesopplæring, 2000. ISBN: 8200451739.
- [18] Armaturjonsson AS. «Teknisk håndbok». I: *Arjonfloor*[®]. URL: <http://media.byggjtjeneste.no/media/dokument/325455>.
- [19] Variant VVS. «Boligsentral - gulvvarme gjort enkelt». I: Wirgenes vei 8B, 3157 Barkåker, 2017. URL: http://www.variantvvs.no/index.php/component/phocadownload/category/101-salgsbrosjyrer%5C%3Fdownload%5C%3D634:boligsentral&ved=2ahUKEwj9hav0-ojiAhURmIsKHQd7A_QQFjABegQIBRAC%5C%22%5C%3E%5C%3Ch3%5C%20class=%5C%22LC201b%5C%22.
- [20] Varians VVS. «Gulvvarme i betong / Gulvvarme påarmeringsnett». I: *Produktblad PB 2.A.1/3*. 2014. URL: <http://www.variantvvs.no/index.php/component/phocadownload/category/103-produktblad?download=402:pb-2-a-1-3%22>.
- [21] Robert Bean. *Modelling radiant tube patterns*. Aug. 2010. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=28489722>.
- [22] Tore Wigenstad. *Prosjektveileder. Forenklet anlegg for vannbåren oppvarming av bolige*. SINTEF Byggforsk, (2009).

- [23] David Zijdemans. *Vannbaserte oppvarmings- og kjølesystemer*. nor. Oslo: Skarland press, 2012. ISBN: 978-82-90033-31-1.
- [24] Jørn Stene og SINTEF Energiforskning AS. «Varmepumper for oppvarming og kjøling av bygninger». I: *SINTEF Energiforskning AS, avdeling enegiprosesser* (2000).
- [25] Jørn Stene. «Varmepumper: grunnleggende varmepumpeteknikk». I: *SINTEF Energi, Klima* (1997).
- [26] Judith Thomsen og Magnar Berge. *Inneklima i energieffektive boliger - en litteraturstudie*. (2012).
- [27] Vojislav Novakovic, Sten Olaf Hanssen og Jan Vincent Thue mfl. *Energy Management in Buildings*. Gyldendal Norsk Forlag AS, 2012. Kap. Chapter 4: Indoor enviroment, s. 113–156.
- [28] SINTEF Byggforsk. *421.501 Termisk inneklima. Betingelser, tilrettelegging og målinger*. nor. SINTEF byggforsk, 2017. URL: <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=193..>
- [29] *Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen, best.nr. 444*. nor. [Rev. oppl.]. Veiledning (Direktoratet for arbeidstilsynet). Oslo: Arbeidstilsynet, 2016. URL: <https://www.arbeidstilsynet.no/contentassets/3f86f6d2038348d18540404144f76a22/luftkvalitet-pa-arbeidsplassen.pdf>.
- [30] Leif I. Stensaas. *Ventilasjonsteknikk 1 : Grunnlaget og Systemer*. nor. 4. utg., nytt oppl. [i.e. Ny utg.]. Oslo: Skarland Press, 2008. ISBN: 9788290033298.
- [31] Catarina Warfvinge og Mats Dahlblom. *Projektering av VVS-installasjoner*. Studentlitteratur AB, 2010.
- [32] Charles og E. Kate. *Fanger's thermal comfort and draught models*. (2003).
- [33] Norsk Standard. *Ergonomi i termisk miljø - Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort (ISO 7730:2005)*. Mar. 2006, s. 64. URL: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=158329>.

- [34] EQUA Simulation AB. *Getting Started IDA Indoor Climate and Energy*. Bd. Version 4.5. (2013). URL: <https://www.equa.se/deliv/ICE45GettingStartedEng.pdf?lic=ICE40:4812>.
- [35] Johan Heier. «Energy Efficiency through Thermal Energy Storage: Possibilities for the Swedish Building Stock». Ph.d.-avh. KTH Royal Institute of Technology, 2013.
- [36] Harald Mehling og Luisa F. Cabeza. «Basic thermodynamics of thermal energy storage». I: *Heat and cold storage with PCM*. Springer, 2008, s. 1–10.
- [37] Jonathan Karlsson. *Possibilities of using thermal mass in buildings to save energy, cut power consumption peaks and increase the thermal comfort*. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 2012.
- [38] SINTEF. *Har du hørt om faseendringsmaterialer?* Sep. 2018.
- [39] *Termisk masse og klimatisering av bygninger - en oversikt tilrettelagt for byggherrer, arkitekter og rådgivende ingeniører*. Lastet ned 06.02.2019 fra <https://www.byggutengrenser.no/download/betong-energieffektive-bygninger/>. 2007. URL: <https://www.byggutengrenser.no/download/betong-energieffektive-bygninger/>.
- [40] Ibrahim Dincer. «On thermal energy storage systems and applications in buildings». I: *Energy and buildings* 34.4 (2002), s. 377–388.
- [41] O. Lars Andersson, Isfalt Engelbrekt og Axel Rosell. *Method and device for controlling the temperature in a premise*. US Patent 4,124,062. Google Patents, nov. 1978.
- [42] Johansson Vikström og Danielle. *TILLFÄLLIGA EFFEKTTOPPAR I FJÄRRVÄRMEN: Kan man med hjälp av lagrad värme undvika att de uppstår i betonghus?* 2013.
- [43] Iver Torstein Skari. «Reduksjon av energibruk i bygninger ved aktiv bruk av bygningens termiske masser og av et intelligent IKT-verktøy for tilbakemelding til bruker». Masteroppg. NTNU, 2016.

- [44] Betongföreningens hållbarhetsråd. *Beräkna tidskonstanten med simuleringsprogrammet VIP-Energy*. Apr. 2013. URL: http://betongforeningen.se/wp-content/uploads/2013/02/Berakna_tidskonstanten_med_simuleringsprogrammet_VIP-Energy.pdf.
- [45] Ibrahim Dincer og Marc A. Rosen. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Second. John Wiley & Sons, 2011.
- [46] Luisa F. Cabeza, I. Martorell og L. Miró mfl. *Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications*. Elsevier, 2015. Kap. Ch. 1. Introduction to thermal energy storage (TES) systems, s. 1–28.
- [47] Uponor. «Thermally Active Building Systems - Heating and cooling for offices and commercial buildings, cost- and energy-efficient». I: 2014. URL: <https://www.uponor.co.uk/-/media/country-specific/uk/download-centre/brochure/tabs-brochure.pdf>.
- [48] Robert Cubic. Jul. 2016. URL: https://web.uponor.hk/wp-content/uploads/2018/05/Diagram_showing_the_thermal_coupling_of_radiant_cooling_system_pipes_and_existing_building_concrete_mass_-300x249.jpg.
- [49] D. Basciotti og R. Schmidt. «Demand side management in district heating networks: Simulation case study on load shifting». I: *Euroheat Power* 10 (2013), s. 43–46.
- [50] Vittorio Verda og Francesco Colella. «Primary energy savings through thermal storage in district heating networks». I: *Energy* 36.7 (2011), s. 4278–4286.
- [51] Johan Kensby, Anders Trüschel og Jan-Olof Dalenbäck. «Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems—results from a pilot test». I: *Applied Energy* 137 (2015), s. 773–781.
- [52] Svend Frederiksen og Sven Werner. *District Heating and Cooling*. Bd. 579. Studentlitteratur Lund, 2013, s. 249–260.
- [53] Julien Eynard, Stéphane Grieu og Monique Polit. «Predictive control and thermal energy storage for optimizing a multi-energy district boiler». I: *Journal of Process Control* 22.7 (2012), s. 1246–1255.

- [54] Shahin Sajjadi, Shahaboddin Shamshirband og Meysam Alizamir mfl. «Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems». I: *Energy and Buildings* 122 (2016), s. 222–227.
- [55] Milan Protić, Shahaboddin Shamshirband og Dalibor Petković mfl. «Forecasting of consumers heat load in district heating systems using the support vector machine with a discrete wavelet transform algorithm». I: *Energy* 87 (2015), s. 343–351.
- [56] Shahaboddin Shamshirband, Dalibor Petković og Enayatifar mfl. «Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48 (2015), s. 760–767.
- [57] F. Hall. *Building Services and Equipment*. Bd. 1. Taylor & Francis Ltd, 5. apr. 1994. 168 s. ISBN: 0582236525. URL: https://www.ebook.de/de/product/3242487/f_hall_building_services_and_equipment.html.

Vedlegg

A. Forslag til populærvitenskapelig artikkel

Dette vedlegget inneholder et forslag til en populærvitenskapelig artikkel. Den viser kun en illustrasjon over hvordan en fremstilling av denne bacheloroppgaven kan bli presentert. Merk at kun to av de fire lastprofilene blir presentert for å holde rapporten kortfattet og strukturert.

Effektreduksjon med vannbåren gulvvarme ved aktiv bruk av bygningens termiske masse

Lars Eirik Bakkom og Martin Sande

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Institutt for energi og prosessteknikk, Trondheim

Det norske strømmettet blir presset av et stadig økende effektuttak. Hvis den maksimale samtidige effektbruken ikke reduseres, må strømmettet utbygges. Denne oppgaven utforsker potensialet til tregheten i termisk tunge konstruksjoner og muligheten for å aktivt bruke tregheten for å jevne ut effekttopper med bruk av vannbåren gulvvarme. Formålet er å bidra til å sette et større fokus på effektbruk og effekttopper, samt forsøke å finne løsninger slikt at man kan neddimensjonere gulvvarmesystemet for økonomiske og miljømessige hensyn. Det har blitt gjennomført simulering i IDA ICE, og med støtte fra teori og simulering i MATLAB har det blitt funnet muligheter for å redusere det maksimale effektuttaket med 24 % med liten påvirkning på termisk komfort.

1 Bakgrunn

Strømmettet i Norge blir presset av et stadig høyere forbruk. Et økt fokus på miljøproblemer får en større del av befolkningen til å vurdere miljøvennlige alternativer. Elektrisk transportmidler, hurtigludere og induksjonsapparater bidrar alle til å øke maksimalforbruket på strømmettet og setter dagens strømmett under press. Snart når det sin fulle kapasitet, og utbygning av strømmettet har en estimert kostnad på 140 milliarder kroner. Å drive et strømmett er billig og det er derfor ønskelig å forsinke utbygningen for å senke gjennomsnittskostnadene [1]. Innføringen av AMS (avanserte måle- og styringssystem) gjør at strømselskaper kontinuerlig kan måle hvor mye strøm som blir brukt og dermed regulere prisene deretter [2]. Dette er med på å øke fokuset på effektbruk i samfunnet. Store kontor og industribygg bruker store mengder effekt for å varme opp lokalene før arbeidstid. Dermed ser man at gulvvarmesystemer som brukes til oppvarming har potensiale til å bli styrt mer effektivt.

Tidligere studier og forskning finner at ved utnyttning av termisk tunge konstruksjoner (eksempel betong og murverk), kan man lagre termisk energi [3]. Den høye varmekapasitet og moderate konduktivitet til materialene gjør at store mengder energi kan lagres og frigjøres for å reagere og motvirke eventuelle tempera-

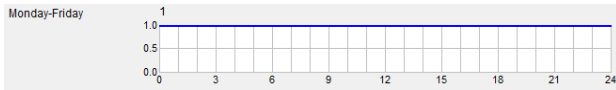
turendringer. Dette kalles en lastforskyvning og går ut på å benytte konstruksjonen som et termisk energilager. Tilført energi lagres midlertidig i massen slik at den kan utnyttes mer effektivt ved et senere tidspunkt [4]. Hensikten her er å utjevne effektpådraget gjennom dagen og redusere effekttopper uten at det påvirker termisk komfort.

Termisk komfort er et begrep som beskriver en persons tilfredshet med rommets termiske omgivelser. Dette er en sinnstilstand som varierer fra person til person. Faktorer som operativ temperatur, lufthastighet, luftfuktighet og temperaturdifferansen mellom gulv og hodehøyde er faktorer med stor påvirkning. Reduksjon av effekttopper bør derfor ikke gå på bekostning av den termiske komforten til okkupantene. [5]

2 Metode

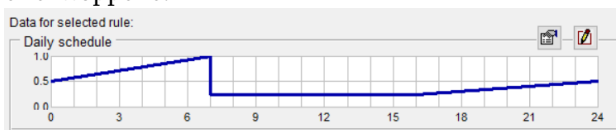
I IDA ICE er det satt opp som en enkel modell med fire yttervegger, gulv mot underliggende etasje på 21 °C, tak og standardstøpt gulvvarme fra NS-EN ISO 11855-2:2015. Et gulvvarmesystem i dag er tradisjonelt styrt med et pådrag på 100 % gjennom hele dagen. Dette er illustrert i Figur 1, som «Last 1». Med kunnskap fra teorien kan man anta at det oppstår en effekttopp ved arbeidshagens start og arbeidshagens slutt når

okkupantene forlater bygget. Det er ønskelig å redusere disse effekttoppene uten å gjøre drastisk endringer på gulvkonstruksjonen. Dette fører til at metoden for å redusere effekttoppene baserer seg på en driftsstrategi i form av lastforskyvning som endrer effektpådraget til gulvvarmen.



Figur 1: Døgnpådrag fra «Last 1».

«Last 4» illustrert i Figur 2, bruker en lastforskyvningsstrategi for å fordele effektpådraget og redusere effekttoppene.

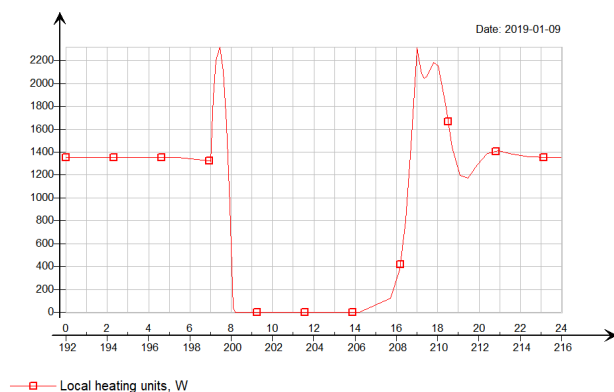


Figur 2: Døgnpådrag fra «Last 4».

3 Resultat

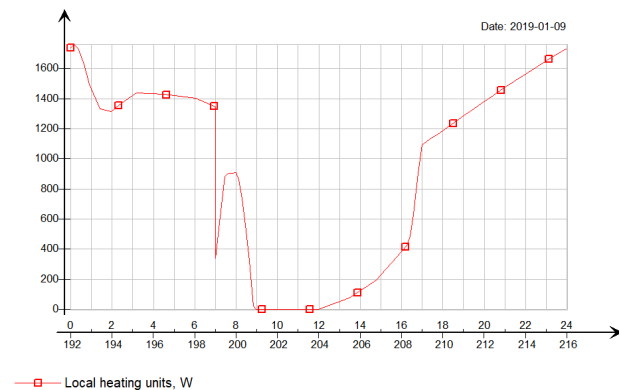
Simuleringsresultatene fra IDA ICE viser at en kobling mellom en lastforskyvningsstrategi og tregheten i bygningmassen vil føre til en reduksjon av de maksimale effekttoppene uten at det går på bekostning av termisk komfort. «Last 1» viser hvordan gulvvarmesystemet styres i dag, mens «Last 4» er et resultat av en lastforskyvningsstrategi for å minimere effekttoppen om morgenen og ettermiddagen.

Figur 3 viser tydelig en effekttopp klokken 07:30 og 17:00 med et maksforbruk på 2300 W. Dette kommer som en følge av at gulvvarmesystemet først må kompensere på grunn av at ventilasjonen skrur seg på, men så for å kompensere for manglende interne og personlige belastninger.



Figur 3: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet i «Last 1».

Figur 4 er en strategi som reduserer begge effekttoppene som oppstår i løpet av dagen. Her ble det brukt data og informasjon fra litteratursøket og laget et styringssystem med en driftsstrategi som reduserer effektpådraget slik at man unngår de to toppene som oppstår. «Last 4» reduserer det maksimale effektuttaket til 1750 W. Merk at denne effekttoppen oppstår klokken 24:00. Et tidspunkt det er svært usannsynlig at mange andre bruker strøm.



Figur 4: Effektpådrag fra gulvvarmen gjennom døgnet i «Last 4».

Gulvtemperaturen synker gradvis fortere enn den operative temperaturen som samtidig ikke har like hyppige svingninger. Det betyr at varmetilskuddet fra byggets masse hindrer raske temperatursvingninger i sonen. Dette tolkes å være den termiske tregheten, og betyr at det ville vært en større forskjell ved en enda tyngre konstruksjon enn det som er tatt hensyn til i simuleringen.

Resultatene fra MATLAB underbygger simuleringen i IDA ICE og stemmer godt overens med teorien presentert. Derfor betraktes resultatene som pålitelig.

- IDA ICE er et komplekst program som har gitt oppgaven svar på problemformuleringen og oppgavens formål.
- Kvaliteten på utdata fra IDA ICE er påvirket av kvaliteten på inndata som har innvirkning på sluttresultatet.
- MATLAB støtter at modellen i IDA ICE er satt opp korrekt, samt at formler og standarden NS-EN ISO 11855-2:2015 stemmer.
- Andre forskningsrapporter og avhandlinger som finner lignende resultater viser, og støtter at den valgte metoden er troverdig.

4 Konklusjon

Litteraturstudie, og resultatene fra simuleringen i IDA ICE og MATLAB viser at den termiske tregheten i termisk masse kan utnyttes til å foreta en lastforskyvning uten at det har store påvirkninger på den termiske komforten. Simuleringsresultatene fra IDA ICE viser at en lastforskyvningsstrategi vil fungere som forventet, og kan føre til en oppnådd effektreduksjon på 24 %.

Det vil være mulig å redusere effekttoppene i et eksisterende bygg som benytter seg av en lastforskyvningsstrategi, men det forutsetter at styringssystemet tilpasses bygget det er i. En implementering av et slikt system kan være en løsning som bidrar til en senkning av maksimal effektbruk og redusere varmebehovet. Videre kan dette føre til mulighet for en neddimensjonering av varmesystemet, og få en miljømessig og økonomisk gevinst.

Bibliografi

- [1] Reiten mfl. *Et bedre organisert strømnett*. Tekn. rapp. Olje- og energidepartementet, 2014.
- [2] C. O'Dwyer. *Energy Affordability, Debt & the Needs of Low Income Consumers: Three Industry Perspectives*. (2013). URL: http://defgllc.com/publication/%20energy-affordability-debt-the-needs-of-low-income-consumers_%20three-industry-perspectives/.
- [3] *Termisk masse og klimatisering av bygninger - en oversikt tilrettelagt for byggherrer, arkitekter og rådgivende ingeniører*. Lastet ned 06.02.2019 fra <https://www.byggutengrenser.no/download/betong-energieffektive-bygninger/>. 2007. URL: <https://www.byggutengrenser.no/download/betong-energieffektive-bygninger/>.
- [4] Ibrahim Dincer. «On thermal energy storage systems and applications in buildings». I: *Energy and buildings* 34.4 (2002), s. 377–388.
- [5] Leif I. Stensaas. *Inneklimateknikk*. mul;nor;nno. VVS-teknikk. Oslo: Gyldendal yrkesopplæring, 2000. ISBN: 8200451739.

B. Skript MATLAB

B.1. Gulvvarmesimulering etter ISO

B. Skript MATLAB

```
%Simulering av varmetransport gjennom gulvkonstruksjon med gulvvarme

%=====
%Egenskaper for gulvet:
%=====
x = zeros(4,1);%Tykkelse lag (m)
lambda = zeros(4,1);%Varmeledningsevne (W/m^2*K)
rho = zeros(4,1);%Massetetthet (kg/m^3)
cp = zeros(4,1);%Spesifikk varmekapasitet (J/kg*C)

%%Lag 1 (nederst) - betong:
x(1) = 0.18;
lambda(1) = 2.1;
rho(1) = 2400;
cp(1) = 920;
%%Lag 2 - isolasjon:
x(2) = 0.03;
lambda(2) = 0.04;
rho(2) = 20;
cp(2) = 750;
%%Lag 3 - flytmasse:
x(3) = 0.06;
lambda(3) = 1.2;
rho(3) = 500;
cp(3) = 1050;
%%Lag 4 (øverst) - gulvdekke:
x(4) = 0.015;
lambda(4) = 0.23;
rho(4) = 1100;
cp(4) = 920;

%Plassering gulvvarmerør
dybde=0.03; %Dybde senter gulvvarmerør (fra overflaten) (m)

%=====
%Veggkonstruksjonen deles inn i lag med uniform tykkelse (1 mm per lag)
%=====
Elementer = round((x(1)+x(2)+x(3)+x(4))*1000); %Antall lag i gulvkonstruksjonen
dx = (x(1)+x(2)+x(3)+x(4))/Elementer; %Tykkelse lag (m)
T = ones(Elementer,1); %Temperatur i hvert enkelt lag
Lambda = zeros(Elementer,1); %Varmeledningsevne for hvert enkelt lag
Rho = zeros(Elementer,1); %Massetetthet for hvert enkelt lag
Cp = zeros(Elementer,1); %Varmekapasitet for hvert enkelt lag
q = zeros(Elementer+1,1); %varmefluks mellom lag (W/m^2)

%=====
%Rammebetingelser for simulering
%=====
Trom = 21; %Romtemperatur (C) - initialverdi
Tvann = 35; %Temperatur gulvvarme (C)
Tunder = 21; %Temperatur underetasje (C)
Tute = -20; %Utetemperatur (C)
```

```

%----- Nødvendige konstanter/verdier for beregning -----
C1 = 2.53; %Varmegjennomgang konstruksjon rom (W/C*m^2 gulvflate); transmisjon,
infiltrasjon, ventilasjon
C2 = 33.5; %33.5;%Internlast (W/m^2 gulvflate); personer, utstyr, belysning
C3 = 3059.4; %Varmekapasitet rom (J/C*m^2 gulvflate); luft, møbler

%=====
%Utfylling av egenskaper for de ulike lagene
%=====
%Lag 1:
start = 1;
slutt = round(x(1)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(1);
Rho(start:slutt) = rho(1);
Cp(start:slutt) = cp(1);
%Lag 2:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(2)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(2);
Rho(start:slutt) = rho(2);
Cp(start:slutt) = cp(2);
%Lag 3:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(3)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(3);
Rho(start:slutt) = rho(3);
Cp(start:slutt) = cp(3);
%Lag 4:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(4)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(4);
Rho(start:slutt) = rho(4);
Cp(start:slutt) = cp(4);
%Gulvvarmelag:
gulvvarmelag = Elementer-dybde/dx; %Definerer gulvvarmen som et eget lag i
gulvkonstruksjonen
T(1) = Tunder; %Gir nederst lag samme temperatur som underestasjonen
T(gulvvarmelag) = Tvann; %Gir gulvvarmelaget samme temperatur som vannet

%=====
%%Initialisering før simulering - stasjonær tilstand (tilnærming)
%=====
%RA = (x(1)-dx/2)/lambda(1);

%Under gulvvarmerør:
RA = x(1)/lambda(1); %Termisk motstand lag 1
RB = x(2)/lambda(2); %Termisk motstand lag 2
%RC = (x(3)+x(4)-dybde-dx/2)/lambda(3);
RC = (x(3)+x(4)-dybde)/lambda(3); %Termisk motstand lag 3 (under gulvvarmerør)
qnedover = (Tunder-Tvann)/(RA+RB+RC); %Varmefluks nedover fra gulvvarmerør

%Over gulvvarmerør:

```

```

RD = (dybde-x(4)-dx/2)/lambda(3); %Termisk motstand lag 3 (over gulvvarmerør)
RE = x(4)/lambda(4); %Termisk mostand lag 4
RF = 1/8.92; %Termisk motstand gulvoverflate til rom (forenklet)
Tromestimert = (Tvann/(RD+RE+RF) + C2 + C1*Tute)/(C1+1/(RD+RE+RF)); %Estimert
romtemperatur
qoppover = (Tvann-Tromestimert)/(RD+RE+RF); %Varmefluks oppover fra gulvvarmerør

%Initialisering av temperatur i gulvvarmelag
for i = 2:(gulvvarmelag-1) %Temperatur under gulvvarmerør
    %T(i) = T(i-1)-qnedover*dx/((Lambda(i-1)+Lambda(i))/2);
    T(i) = T(i-1)-qnedover*dx/Lambda(i);
end
for i = (gulvvarmelag+1):Elementer %Temperatur over gulvvarmerør
    %T(i) = T(i-1)-qoppover*dx/((Lambda(i-1)+Lambda(i))/2);
    T(i) = T(i-1)-qoppover*dx/Lambda(i);
end

%Innstilling stasjonær tilstand
dt = 0.01; %Tidsintervall (s)
t = 3600; %Totaltid (s)
Tid = 0;
Romtemperatur = zeros(t,1);
Gulvtemperatur = zeros(t,1);
for j = 1:(t/dt) %simulering til tid t, med tidssteg dt

    %Beregner varmekulser mellom lagene basert på aktuelle temperaturer
    q(1) = -Lambda(1)*(T(1)-Tunder)/(dx/2); %Nederste lag, mot underetasje
    for i = 2:length(T)
        %q(i)=- (Lambda(i)+Lambda(i-1))/2*(T(i)-T(i-1))/dx;
        q(i) = -Lambda(i)*(T(i)-T(i-1))/dx;
    end
    q(end) = 8.92*(T(end)-Trom).^1.1; %Øverste lag, mot rom; NS-EN ISO 11855 ligning
(1)

    qrom = C1*(Tute-Trom); %Varmefluks gjennom konstruksjon
    qintern = C2; %Varmefluks internlast

    %Beregner ny temperatur for hvert lag
    for i = 1:length(T)
        T(i) = T(i)+(q(i)-q(i+1))*dt/(Rho(i)*Cp(i)*dx);
    end
    T(gulvvarmelag) = Tvann; %Korrigerer temperatur gulvvarmelag
    Trom = Trom+(q(end)+qintern+qrom)*dt/C3; %Beregner ny romtemperatur

    %=====
    %Plotter profil for romtemperaturen ved gitte intervaller
    %1,2 og 3 kan droppes da de viser initialberegningen til 4,5,6 og 7
    %=====
%     if mod(j,1000)==0
%         figure(1)
%         plot(T)
%         figure(2)
%         plot(q)
%         pause(0.01)

```

```

% end
% if mod(j,10)==0
%     Romtemperatur(j/10)=Trom;
%     figure(3)
%     plot(Romtemperatur)
% end

    Tid = Tid + dt;
end

%=====
%Transient simulering - ikke stasjonær (tilnærming)
%=====
Romtemperatur(:) = 0;
Tvann = 32.5; %Den gjennomsnittlige gulvvarmetemperaturen i rommet

dt = 0.01; %Tidsintervall (s)
t = 3600; %Totaltid (s)
Tid = 0;
for j = 1:(t/dt) %simulering til tid t, med tidssteg dt

    %Beregner varmekulser mellom lagene basert på aktuelle temperaturer
    q(1) = -Lambda(1)*(T(1)-Tunder)/(dx/2); %Nederste lag, mot underetasje
    for i = 2:length(T)
        %q(i)=- (Lambda(i)+Lambda(i-1))/2*(T(i)-T(i-1))/dx;
        q(i) = -Lambda(i)*(T(i)-T(i-1))/dx;
    end
    q(end) = 8.92*(T(end)-Trom).^1.1; %Øverste lag, mot rom; NS-EN ISO 11855 ligning (1)

    qrom = C1*(Tute-Trom); %Varmefluks gjennom konstruksjon
    qintern = C2; %Varmefluks internlast

    %Beregner ny temperatur for hvert lag
    for i = 1:length(T)
        T(i) = T(i)+(q(i)-q(i+1))*dt/(Rho(i)*Cp(i)*dx);
    end
    T(gulvvarmelag) = Tvann; %Korrigerer temperatur gulvvarmelag
    Trom = Trom+(q(end)+qintern+qrom)*dt/C3; %Beregner ny romtemperatur

%=====
%Plotter profil for rom- og gulvtemperaturen ved gitte intervaller
%=====
if mod(j,100)==0
    Romtemperatur(j/100)=Trom;
    Gulvtemperatur(j/100)=T(end);
end
if mod(j,1000)==0
    figure(4) %Temperatur gjennom gulvkonstruksjon
    plot(T)
    ylabel('Temperatur (C)'); %label y-akse
    xlabel('Dybde (mm)'); %label x-akse
    legend('Temperaturforløp','Location','southeast'); %Forklaring og plassering

```

```
view([90 -90]); %Roterer plottet

figure(5) %Varmefluksen gjennom gulvkonstruksjon
plot(q)
ylabel ('Varmefluks (W/m^2)'); %label y-akse
xlabel ('Dybde (mm)'); %label x-akse
legend('Varmetransport','Location','southeast'); %Forklaring og plassering
view([90 -90]); %Roterer plottet

figure(6) %Romtemperaturen
plot(Romtemperatur)
ylabel ('Temperatur (C)'); %label y-akse
xlabel ('Tid (s)'); %label x-akse
legend('Romtemperatur'); %Forklaring

figure(7) %Overflatetemperaturen
plot(Gulvtemperatur)
ylabel ('Temperatur (C)'); %label y-akse
xlabel ('Tid (s)'); %label x-akse
legend('Overflatetemperatur gulv'); %Forklaring

pause(0.1)
end

Tid = Tid + dt;
end
```

B.2. Gulvvarmesimulering med en tyngre gulvkonstruksjon

B. Skript MATLAB

```
%Simulering av varmetransport gjennom gulvkonstruksjon med gulvvarme

%=====
%Egenskaper for gulvet:%
%=====

x = zeros(4,1);%Tykkelse lag (m)
lambda = zeros(4,1);%Varmeledningsevne (W/m^2*K)
rho = zeros(4,1);%Massetetthet (kg/m^3)
cp = zeros(4,1);%Spesifikk varmekapasitet (J/kg*C)

%%Lag 1 (nederst) - betong:
x(1) = 0.18;
lambda(1) = 2.1;
rho(1) = 2400;
cp(1) = 920;
%%Lag 2 - isolasjon:
x(2) = 0.03;
lambda(2) = 0.04;
rho(2) = 20;
cp(2) = 750;
%%Lag 3 - betong:
x(3) = 0.06;
lambda(3) = 2.1;
rho(3) = 2400;
cp(3) = 920;
%%Lag 4 (øverst) - gulvdekke:
x(4) = 0.015;
lambda(4) = 0.23;
rho(4) = 1100;
cp(4) = 920;

%Plassering gulvvarmerør
dybde=0.03; %Dybde senter gulvvarmerør (fra overflaten) (m)

%=====
%Veggkonstruksjonen deles inn i lag med uniform tykkelse (1 mm per lag) %
%=====
Elementer = round((x(1)+x(2)+x(3)+x(4))*1000); %Antall lag i gulvkonstruksjonen
dx = (x(1)+x(2)+x(3)+x(4))/Elementer; %Tykkelse lag (m)
T = ones(Elementer,1); %Temperatur i hvert enkelt lag
Lambda = zeros(Elementer,1); %Varmeledningsevne for hvert enkelt lag
Rho = zeros(Elementer,1); %Massetetthet for hvert enkelt lag
Cp = zeros(Elementer,1); %Varmekapasitet for hvert enkelt lag
q = zeros(Elementer+1,1); %varmefluks mellom lag (W/m^2)

%=====
%Rammebetingelser for simulering%
%=====
= 21; %Romtemperatur (C) - initialverdi
T vann = 35; %Temperatur gulvvarme (C)
T under = 21; %Temperatur underetasje (C)
T ute = -20; %Utetemperatur (C)

Trom
```

```

%----- Nødvendige konstanter/verdier for beregning -----
C1 = 2.53; %Varmegjennomgang konstruksjon rom (W/C*m^2 gulvflate); transmisjon,
infiltrasjon, ventilasjon
C2 = 33.5; %33.5;%Internlast (W/m^2 gulvflate); personer, utstyr, belysning
C3 = 3059.4; %Varmekapasitet rom (J/C*m^2 gulvflate); luft, møbler

%=====
%Utfylling av egenskaper for de ulike lagene
%=====
%Lag 1:
start = 1;
slutt = round(x(1)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(1);
Rho(start:slutt) = rho(1);
Cp(start:slutt) = cp(1);
%Lag 2:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(2)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(2);
Rho(start:slutt) = rho(2);
Cp(start:slutt) = cp(2);
%Lag 3:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(3)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(3);
Rho(start:slutt) = rho(3);
Cp(start:slutt) = cp(3);
%Lag 4:
start = slutt+1;
slutt = slutt+round(x(4)/dx);
Lambda(start:slutt) = lambda(4);
Rho(start:slutt) = rho(4);
Cp(start:slutt) = cp(4);
%Gulvvarmelag:
gulvvarmelag = Elementer-dybde/dx; %Definerer gulvvarmen som et eget lag i
gulvkonstruksjonen
T(1) = Tunder; %Gir nederst lag samme temperatur som underestasjonen
T(gulvvarmelag) = Tvann; %Gir gulvvarmelaget samme temperatur som vannet

%=====
%%Initialisering før simulering - stasjonær tilstand (tilnærming)
%=====
%RA = (x(1)-dx/2)/lambda(1);

%Under gulvvarmerør:
RA = x(1)/lambda(1); %Termisk motstand lag 1
RB = x(2)/lambda(2); %Termisk motstand lag 2
%RC = (x(3)+x(4)-dybde-dx/2)/lambda(3);
RC = (x(3)+x(4)-dybde)/lambda(3); %Termisk motstand lag 3 (under gulvvarmerør)
qnedover = (Tunder-Tvann)/(RA+RB+RC); %Varmefluks nedover fra gulvvarmerør

%Over gulvvarmerør:

```



```

RD = (dybde-x(4)-dx/2)/lambda(3); %Termisk motstand lag 3 (over gulvvarmerør)
RE = x(4)/lambda(4); %Termisk mostand lag 4
RF = 1/8.92; %Termisk motstand gulvoverflate til rom (forenklet)
Tromestimert = (Tvann/(RD+RE+RF) + C2 + C1*Tute)/(C1+1/(RD+RE+RF)); %Estimert
romtemperatur
qoppover = (Tvann-Tromestimert)/(RD+RE+RF); %Varmefluks oppover fra gulvvarmerør

%Initialisering av temperatur i gulvvarmelag
for i = 2:(gulvvarmelag-1) %Temperatur under gulvvarmerør
    %T(i) = T(i-1)-qnedover*dx/((Lambda(i-1)+Lambda(i))/2);
    T(i) = T(i-1)-qnedover*dx/Lambda(i);
end
for i = (gulvvarmelag+1):Elementer %Temperatur over gulvvarmerør
    %T(i) = T(i-1)-qoppover*dx/((Lambda(i-1)+Lambda(i))/2);
    T(i) = T(i-1)-qoppover*dx/Lambda(i);
end

%Innstilling stasjonær tilstand
dt = 0.01; %Tidsintervall (s)
t = 3600; %Totaltid (s)
Tid = 0;
Romtemperatur = zeros(t,1);
Gulvtemperatur = zeros(t,1);
for j = 1:(t/dt) %simulering til tid t, med tidssteg dt

    %Beregner varmekser mellom lagene basert på aktuelle temperaturer
    q(1) = -Lambda(1)*(T(1)-Tunder)/(dx/2); %Nederste lag, mot underetasje
    for i = 2:length(T)
        %q(i)=- (Lambda(i)+Lambda(i-1))/2*(T(i)-T(i-1))/dx;
        q(i) = -Lambda(i)*(T(i)-T(i-1))/dx;
    end
    q(end) = 8.92*(T(end)-Trom).^1.1; %Øverste lag, mot rom; NS-EN ISO 11855 ligning
(1)

    qrom = C1*(Tute-Trom); %Varmefluks gjennom konstruksjon
    qintern = C2; %Varmefluks internlast

    %Beregner ny temperatur for hvert lag
    for i = 1:length(T)
        T(i) = T(i)+(q(i)-q(i+1))*dt/(Rho(i)*Cp(i)*dx);
    end
    T(gulvvarmelag) = Tvann; %Korrigerer temperatur gulvvarmelag
    Trom = Trom+(q(end)+qintern+qrom)*dt/C3; %Beregner ny romtemperatur

    %=====
    %Plotter profil for romtemperaturen ved gitte intervaller
    %1,2 og 3 kan droppes da de viser initialberegningen til 4,5,6 og 7
    %=====
    %
    if mod(j,1000)==0
    %
        figure(1)
    %
        plot(T)
    %
        figure(2)
    %
        plot(q)
    %
        pause(0.01)
    %

```

```

% end
% if mod(j,10)==0
%     Romtemperatur(j/10)=Trom;
%     figure(3)
%     plot(Romtemperatur)
% end

    Tid = Tid + dt;
end

%=====
%Transient simulering - ikke stasjonær (tilnærming)
%=====
Romtemperatur(:) = 0;
Tvann = 32.5;

dt = 0.01; %Tidsintervall (s)
t = 3600; %Totaltid (s)
Tid = 0;
for j = 1:(t/dt) %simulering til tid t, med tidssteg dt

    %Beregner varmekulser mellom lagene basert på aktuelle temperaturer
    q(1) = -Lambda(1)*(T(1)-Tunder)/(dx/2); %Nederste lag, mot underetasje
    for i = 2:length(T)
        %q(i)=- (Lambda(i)+Lambda(i-1))/2*(T(i)-T(i-1))/dx;
        q(i) = -Lambda(i)*(T(i)-T(i-1))/dx;
    end
    q(end) = 8.92*(T(end)-Trom).^1.1; %Øverste lag, mot rom; NS-EN ISO 11855 ligning (1)

    qrom = C1*(Tute-Trom); %Varmefluks gjennom konstruksjon
    qintern = C2; %Varmefluks internlast

    %Beregner ny temperatur for hvert lag
    for i = 1:length(T)
        T(i) = T(i)+(q(i)-q(i+1))*dt/(Rho(i)*Cp(i)*dx);
    end
    T(gulvvarmelag) = Tvann; %Korrigerer temperatur gulvvarmelag
    Trom = Trom+(q(end)+qintern+qrom)*dt/C3; %Beregner ny romtemperatur

%=====
%Plotter profil for rom- og gulvtemperaturen ved gitte intervaller
%=====
if mod(j,100)==0
    Romtemperatur(j/100)=Trom;
    Gulvtemperatur(j/100)=T(end);
end
if mod(j,1000)==0
    figure(4) %Temperatur gjennom gulvkonstruksjon
    plot(T)
    ylabel('Temperatur (C)'); %label y-akse
    xlabel('Dybde (mm)'); %label x-akse
    legend('Temperaturforløp','Location','southeast'); %Forklaringens plassering

```

```
view([90 -90]); %Roterer plottet

figure(5) %Varmefluksen gjennom gulvkonstruksjon
plot(q)
ylabel ('Varmefluks (W/m^2)'); %label y-akse
xlabel ('Dybde (mm)'); %label x-akse
legend('Varmetransport','Location','southeast'); %Forklaring og plassering
view([90 -90]); %Roterer plottet

figure(6) %Romtemperaturen
plot(Romtemperatur)
ylabel ('Temperatur (C)'); %label y-akse
xlabel ('Tid (s)'); %label x-akse
legend('Romtemperatur'); %Forklaring

figure(7) %Overflatetemperaturen
plot(Gulvtemperatur)
ylabel ('Temperatur (C)'); %label y-akse
xlabel ('Tid (s)'); %label x-akse
legend('Overflatetemperatur gulv'); %Forklaring

pause(0.1)
end

Tid = Tid + dt;
end
```

