



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2024 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Bygningers rolle for økt fleksibilitet i kraftnettet

The Role of Buildings in Enhancing Flexibility in the
Power Grid

Ine Kyllingstad

Fornybar energi

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen for Fornybar energistudiet mitt og fem flotte år på Agrarmetropolen i Ås. Arbeidet omhandler å benytte programvaren SIMIEN som simuleringsverktøy for fleksibilitetsmuligheter i bygg som en avlastning for kraftnettet og er gjennomført våren 2024 ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) ved fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA).

Jeg ønsker å takke medstudenter og professorer ved NMBU for fem innholdsrike år. Jeg vil også rette en spesiell takk til Thomas Martinsen som har veiledet meg gjennom oppgaven.

Ønsker å takke rådgiver innen eiendom ved Vestfold fylkeskommune Kaveh Emami for tilgang og informasjon om skolebygg i Vestfold fylke.

I tillegg vil jeg rette en takk til Kjell Arild Dokka for utfyllende og informative e-poster og videosamtale rundt programvaren SIMIEN.

Ås, 15. Mai 2024

Ine Kyllingstad

Sammendrag

Overgangen til et grønnere Europa og økningen i energibehov det medfører gjør at vi også får et økt effektbehov. Norge går inn mot perioder med underskudd av effekt der vi kan bli avhengige av import fra andre land for å vedlikeholde forsyningssikkerheten.

Forbrukerfleksibilitet og samhandling med kraftnettet kan bli en viktig faktor i fremtidens smarte kraftnett. Bygninger er også en del av dette og kan tilby fleksibilitet i form av utkoblede oppvarmingsselement over en gitt tidsperiode. Det er knyttet usikkerhet til varigheten og mengden effektfleksibilitet et bygg kan tilby.

Denne oppgaven undersøker om det er mulig å identifisere fleksibilitetspotensialet i bygninger ved bruk av simuleringsverktøyet SIMIEN for å kunne å melde inn fleksibilitet til kraftnettet og tilby effektavlastning ved utkobling av varmeapparatet i bygget.

En CASE-studie av fire skolebygg der energiattesten for hvert bygg blir brukt som grunnlag for å simulere energibehovene og bygningskvalitetene til det respektive bygget er gjennomført. Hensikten er å simulere responstiden for byggene. Ut fra dette utledes hvor stort energibehovet og dermed energitapet fra bygningen er under hendelsen med utkoblet oppvarmingsselement. Ut fra dette identifiseres fleksibilitets potensialet til bygningene på bakgrunn av simulerte energidata ved bruk av SIMIEN.

Resultatene og simuleringene som er utført i denne oppgaven identifiserer at det er stor usikkerhet knyttet til varigheten og mengden fleksibilitet et bygg kan tilby. Det er identifisert et behov for mer detaljerte data og finere timesoppløsning for å gi fleksibilitetspotensialet i bygg mer tyngde og verdi i en effektavlastningssammenheng.

Abstract

The transition to a more sustainable Europe and the increase in energy demand it entails leads to an increased demand for power. Norway is entering periods of power deficit where the power grid may be reliant on import to meet the demand.

Consumer flexibility and consumers ability to interact with the power grid can become important factors in the future smart grids. Buildings has a role in this and can offer flexibility in the form of disconnecting electric heating appliances over a period. There is uncertainty associated with the duration and amount of power flexibility a building can provide.

This study investigates whether it is possible to identify the flexibility potential in buildings using SIMIEN as a simulator to report flexibility from disconnecting the heating system of the building to the power grid operators.

A CASE-study of four school buildings where the energy certificate for each building is used as a basis to simulate the energy needs and building qualities of the respective building has been conducted. The purpose of the simulation is to identify the response period and estimate how much energy demand and thus energy loss from the building, occurs during the event. Based on this, the flexibility potential of the building is identified using SIMIEN.

The simulations and results in this study identify that there is significant uncertainty associated with the duration and amount of flexibility a building can offer. There is a need for more detailed data and finer time resolution to give the flexibility potential in buildings more weight and value in a power grid relief context.

Innhold

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract	3
1 Innledning	5
2 Kunnskapsgrunnlag	6
2.1 Energieffektivisering og effektflexibilitet.....	6
2.2 Energibalanse i kraftnettet.....	6
2.3 Forbrukerflexibilitet.....	7
2.3.1 Responstid og gjenopprettingstid	8
2.4 Transmisjonstap i bygninger.....	8
2.5 Varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi)	9
2.6 Innendørstemperatur.....	10
2.7 Reboundeffekt.....	10
2.8 SIMIEN.....	11
3 Metode	11
3.1 Transmisjonsvarmetapet gjennom yttervegg	12
3.2 Metode for å avdekke fleksibilitetspotensialet i bygninger med SIMIEN	13
3.3 Metode for responstid, utkoblet effekt og fleksibilitetspotensial.....	17
4 Skolebygg CASE-studie	19
4.1 Klimasone.....	19
4.2 Inndata fra energiattest	20
4.3 Metode for SIMIEN modellering for skolebyggene.....	20
5 Resultat	21
5.1 Transmisjonsvarmetapet fra konstruksjonsdelen	21
5.2 SIMIEN som fleksibilitetsindikator	22
5.3 Flexibilitetsmuligheter i skolebygg	25
5.3.1 Sammenligning av skolebygg	28
6 Diskusjon	29
6.1 Grovutregning av transmisjonsvarmetap.....	29
6.2 SIMIEN som simuleringsverktøy for flexibilitet	30
6.3 CASE-studie: Forbrukerflexibilitet fra skolebygg	32
6.4 Videre forskning	33
7 Hovedkonklusjon	34
8 Litteraturliste	35
9 Vedlegg	37

1 Innledning

Energimiksen i Norge er variabel, og kraftnettet har behov for utbygging for å kunne håndtere fremtidens energibehov. Ifølge (Vagner et al.) går Norge inn mot et underskudd i energibalansen innen 2027. I tillegg vil det bli større sesongvariasjoner. I dag er Norge selvforsynt med kraft selv i de mest kritiske timene på vinteren. Samtidig er effektbehovet i Norge økende og vil uten fleksibilitet eller økt kraftproduksjon føre til en økning i import for å dekke effektbehovet fremover (Buvik et al., 2022).

Forbrukerfleksibilitet kan være avgjørende for å vedlikeholde effektbalansen fremover. Det stilles krav til reservemarkedene om å ha nok reserver til å dekke den største endringen som kan oppstå i kraftsystemet. Fremover blir det stilt krav til at hvert prisområde skal tilby reserver for sitt område. Endringen fra reservekrav for hele landet til hvert prisområde fører til en økning i behovet for reserver (Dalen et al., 2023). Bygninger kan være en del av reservemarkedet ved å tilby fleksibilitet og er representert i EU gjennom Bygningsenergidirektivet. I direktivet er det en frivillig ordning med «Smart Readiness Indicator» (SRI) som gir en indikasjon på hvor godt rustet et bygg er for fremtidens kraftnett (EØS-notat, 2023).

Energiforbruket til skolebygg består primært av oppvarming (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2016). Når på døgnet man velger å varme opp et rom har mulighet til å være mer fleksibelt enn for eksempel når på døgnet man trenger strøm til en prosjektor i undervisningssammenheng. Avhengig av bygningens materiale, areal og energidata kan oppvarmingsselementet kobles ut og fortsatt holde en akseptabel innendørstemperatur (Homæi & Hamdy, 2021). I denne oppgaven er hendelsen utkoblet oppvarmingsselement og en CASE-studie av skolebygg valgt.

Det er knyttet usikkerhet til varigheten på fleksibiliteten bygg kan tilby (Buvik et al., 2022). Programvaren SIMIEN fremskriver et byggs energibehov basert på byggets kvaliteter og benyttes i dag til å blant annet simulere årlig energibehov og til energimerking av bygg (ProgramByggerne, u.å.-a). I denne oppgaven utforskes det om SIMIEN kan benyttes til å utlede fleksibilitetspotensiale i bygg knyttet mot utkobling av oppvarmingsselementet i bygget. Dette utleder problemstillingen:

«Kan simuleringsverktøyet SIMIEN benyttes til å identifisere fleksibilitet knyttet til utkobling av varmeapparatet i bygg for å avlaste kraftnettet?»

2 Kunnskapsgrunnlag

Oppgaven utforsker hvordan et simuleringsverktøy kan belyse fleksibilitetspotensialet i bygg når det kommer til utkobling av oppvarmingselement i bygget. For å bygge kontekst rundt emnet fleksibilitet gir dette kapittelet en oversikt over energiforbruk, fleksibilitet og kraftnett.

2.1 Energieffektivisering og effektfleksibilitet

Energifleksibilitet kan anses som en forlengelse av energieffektivisering. Et av formålene med å utføre både energieffektiviseringstiltak og energifleksibilitetstiltak er å finne et alternativ til nettutbygging av kraftnettet gjennom avlastning av effekt. Energieffektivisering avlaster nettet permanent gjennom å redusere totalt energibehov, mens effektfleksibilitet avlaster nettet for en midlertidig tidsperiode (Buvik et al., 2022).

Bygninger kan ta en mer aktiv rolle i kraftsystemet og EU har opprettet en frivillig ordning for å vise hvor klart et bygg er for å samhandle med kraftnettet. Ordningen kalles Smart Readiness Indicator (SRI) og viser til en bygnings evne til å optimalisere energibruken i bygget, tilpasse seg beboernes behov og å tilpasse seg signaler fra kraftnettet (European Commission, u.å.).

EU har et satt mål om å oppnå karbonnøytralitet i kraftsystemet innen 2050 gjennom «Fit for 55» pakken. Dette stiller økte krav til kraftnettet også i Norge (NOU 2023: 3, 2023). Omleggingen fra fossile energikilder til grønne energikilder gir mange muligheter og forbrukerne blir forventet å kunne ta en mer aktiv rolle i kraftnettet.

2.2 Energibalanse i kraftnettet

Kraft er ferskvare og kan ikke lagres, men må forbrukes i samme takt som det produseres. Kraftsystemet må derfor hele tiden være i balanse mellom produksjon og forbruk inkludert tap i nettet. Det er Statnett som har systemansvaret, noe som innebærer ansvar for at kraftnettet er i balanse mellom forbruk og produksjon til enhver tid. Å holde kraftnettet i balanse vil bli mer utfordrende fremover ettersom det produseres mer uregulerbar fornybar energi som vind- og solkraft og de stabile fossile energikildene avvikles (Dalen et al., 2023). Det ofte observert lite vind under kalde perioder på vinteren hvor etterspørselen etter elektrisitet er økende ettersom oppvarmingsbehovet i Norge er størst vinterstid (C. Ahrens & R. Henson, 2017; Buvik et al., 2022).

Tradisjonelt i Norge har kraftmiksen bestått i hovedsak av vannkraft som har gode lagringsmuligheter i vannmagasinene. Det at kraftproduksjonen tilpasser seg forbrukernes

behov gjennom vannmagasinene er i ferd med å snu ettersom effektproblemer blir mer fremtredende (Dalen et al., 2023).

Utfordringen knyttet til effekt oppstår når det er kraft under- eller overskudd over en kort tidsperiode. Underslike forhold må systemoperatør ta i bruk reservemarkeder for å dekke behovet slik at forbrukeren har tilgang på strøm til enhver tid (Statnett, 2018). Fremover kan det bli nødvendig å importere kraft fra andre land i kritiske perioder (Buvik et al., 2022).

For å opprettholde balansen i kraftnettet benyttes reserver som er et samlebegrep for fleksibelt forbruk eller produksjon av kraft (Dalen et al., 2023). Reservene er regulerbare og kan kobles inn eller ut på signaler når frekvensen i nettet avviker fra 50 Hz som er optimal frekvens i kraftnettet i balanse.

Reservemarkedene er i endring og ved utgangen av 2024 innføres en ny nordisk balanseringsmodell: Nordic Balancing Model (NBM)(Nordic Balancing Model, 2024). Modellen er laget med hensyn på å håndtere den økte u-regulerbare kraften og stiller økte krav til tidsoppløsning og automasjon i markedet (Dalen et al., 2023).

Det stilles nye tekniske krav for deltagelse i markedene. Bygninger har behov for økt automasjon og nøyaktig måling av potensiale for fleksibilitet for å kunne være en bidragsyter (Buvik et al., 2022).

2.3 Forbrukerfleksibilitet

Fleksibilitet defineres av (Dalen et al.) som «Den evnen produsenter, forbrukere og energilager har til å justere produksjon, forbruk og/eller lagring av energi som respons på tilstanden i kraftsystemet.». Forbrukerfleksibilitet referer dermed til forbrukerens evne til å justere energiforbruket etter signaler i kraftnettet. Flexibiliteten til forbruker kan aktiveres gjennom flere ulike former som overordnet kan deles inn i to kategorier: implisitt fleksibilitet og eksplisitt fleksibilitet.

Eksplisitt fleksibilitet innebærer en kompensasjon for å tilby fleksibilitet til lokale fleksibilitetsmarkeder eller reservemarkeder for kraftnettet. Her er det nødvendig med kontrakt og styringssystem for fleksibilitetsresponsen. Det er systemoperatøren som utløser et signal som forbruker responderer på ved hjelp av styringssystemet. Forbruker bestemmer ikke selv når og hvor mye som skal kobles ut eller flyttes, men styres av kontrakter mellom nettleverandør og systemoperatør.

Implisitt fleksibilitet referer til når forbruker responderer på prissignaler i markedet. Dette kan være å redusere maksimalt effektforbruk ved å lade elbil på redusert ladehastighet og dermed

oppnå en reduksjon i nettleiekostnadene. Et annet eksempel på implisitt energifleksibilitet er å redusere eller flytte forbruket på eget initiativ fra høylasttimer til lavlasttimer som en respons på høye kraftpriser i toppplasttimer (Dalen et al., 2023).

Bygninger kan bidra med både implisitt og eksplisitt fleksibilitet ved å redusere forbrukstoppene og flytte forbruket.

2.3.1 Responstid og gjenopprettingstid

Et bygg er en forbruker av elektrisitet til el-spesifikke formål som teknisk utstyr, men konsumerer også elektrisitet til oppvarming dersom oppvarmingsselementet krever strøm. Som nevnt kan forbrukeren bidra med fleksibilitet som respons fra markedet eller signal fra systemoperatør. Responstid eller respons periode henviser til den tiden en forbruker kan tilby en gitt mengde effekt ved å være utkoblet fra kraftnettet (Arteconi et al., 2019).

Når det kommer til bygninger som forbrukere er responstiden tidspunktet fra man kobler ut for eksempel varmeapparatet og til innendørstemperaturen har falt ned til en ikke akseptabel karakter. Denne temperaturen refereres til nedre temperaturgrense og når innendørstemperaturen er lik nedre grense er komforten i bygget komprimert til den grad at oppvarmingsapparatet må bli koblet inn på nettet igjen. Nå er man over i fase to av forbrukertilpasset etterspørsel der temperaturen i bygget varmes opp til en idealtilstand igjen. Oppvarmingsfasen kalles gjenopprettingstid og er gjeldende fra nedre temperaturgrense er nådd og til idealtilstand er gjenopprettet igjen (Arteconi et al., 2019).

Hvor lang responstid et bygg kan levere avhenger av hvor lenge bygget klarer å holde innendørstemperaturen på et akseptabelt komfortnivå. Når nedre temperaturgrense er nådd er forholdene inne i bygget av den karakter at det kan gå ut over bruken og komforten til bygget. I kapittel 2.6 utdypes innendørstemperatur og grenseverdier.

Hvor godt et bygg holder på varmen avhenger av hvor mye varme bygget taper til omgivelsene. Oppvarmingsbehovet i bygninger har nær sammenheng med forbruket av energi til oppvarming (Espedal, 2022).

2.4 Transmisjonstap i bygninger

Å opprettholde en behagelig innendørstemperatur i et rom er energikrevende ettersom det er varmetap knyttet til en bygning. Den største andelen av energibruken i bygg går til romoppvarming (Spilde et al., 2023). Varmetapet som skjer i forbindelse med romoppvarming er enkelt forklart et transmisjonstap mellom innendørstemperatur, yttervegg og

utendørstemperatur. Transmisjonstap defineres av (Geving) som en «fellesbetegnelse for varmetap fra en bygning ut mot ytre omgivelser eller uoppvarmede soner av bygget.»

Tapene som følger av en bygning, er en konsekvens av materialene bygget består av og utendørstemperaturen på lokasjonen. Ulike materialer har ulike varmeledningsevne og hvor mye varme som overføres til omgivelsene vil derfor avhenge av hvilket materiale som er benyttet i byggeprosessen (Blok & Nieuwlaar, 2017).

Varmeutvekslingen mellom byggets fysiske deler og omgivelsene består av tre grunnleggende termodynamiske mekanismer. Disse er henholdsvis stråling, varmeledning og konveksjon. Varmeledning er den dominante mekanismen i transmisjonstap og blir drevet av temperaturdifferansen mellom innerveggen og ytterveggen (Blok & Nieuwlaar, 2017).

Energitapet fra en bygning er direkte avhengig av energibruken som er nødvendig for å varme opp bygningen. Strømforbruket vil bli påvirket dersom bygningen benytter seg av elektrisk oppvarmingsselement. (Homaei & Hamdy, 2021) understreker at et bygg med lavere transmisjonstap vil kunne holde lenger på varmen som allerede er tilført bygget.

Bygningers evne til å holde på varmen er knyttet til kvalitetene til bygget og reflekterer hvor mye fleksibilitet som kan tilbys ved utkobling av oppvarmingsselement uten at det går utover komfort i for stor grad. Varmegjennomgangskoeffisienten er en sentral faktor når det kommer til transmisjonstapet i bygninger.

2.5 Varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi)

Varmegjennomgangskoeffisienten defineres av (Espedal) som «... hvor stor varmeeffekt som går gjennom konstruksjonen under visse forutsetninger». Koeffisienten blir også omtalt som U-verdi og har blant annet betydning for hvor stort varmetap det er i et bygg. U-verdiene til konstruksjonskomponentene i et bygg summeres ofte opp for å uttrykke hele konstruksjonens varmegjennomgang (Geving, 2021).

U-verdiene til et bygg er mulig å regne ut ved hjelp av detaljerte håndregnemetoder eller ved bruk av energistrømsprogram for det enkelte bygget. En annen mulighet er å benytte seg av oppslagsverk som inneholder verdier for ulike ytterkonstruksjonsvegger. Leverandører av byggkonstruksjoner har ofte tilgang til dokumenterte U-verdier som også er mulig å benytte seg av (Geving, 2021).

Isolasjonen i bygget har betydning for verdien til varmegjennomgangskoeffisienten. Et bygg som er godt isolert vil holde mer på varmen og ha en lavere U-verdi enn et bygg som er

dårligere isolert (Espedal, 2022). Hvilket materiale selve veggen består av har også betydning for U-verdi som nevnt i 2.4.

2.6 Innendørstemperatur

Innendørstemperaturen måles ofte med termostater som tar mål av lufttemperaturen i rommet. Operativ temperatur er et annet mål for termisk komfort som inkluderer mer enn bare temperaturen på luften i rommet, men tar også hensyn til midlere overflatetemperatur på vegger, møbler og lignende som oppholder seg i rommet. Operativ temperatur er middelverdier av lufttemperaturen og overflatetemperaturen i sonen og kalles for følt temperatur (Dokka, 2024a).

Teknisk byggeforskrift har ingen absoluttmål for akseptabel temperatur i bygg, men uttrykker at det skal tilrettelegges etter helsemessige forhold og tilfredsstillende komfort (Byggteknisk forskrift, 2017). For høy innetemperatur kan føre til hodepine, nedsatt konsentrasjonsevne og tretthet. I vinterhalvåret bør ikke innendørstemperaturen overstige 22 grader for å unngå helsemessige plager. Når det kommer til nedre grense for temperatur er det heller ikke satt noen absoluttverdi, men på lik linje med øvre grense er det anbefalt temperaturkrav på 20 grader. Anbefalingene på 24 grader og 20 grader er angitt i Norsk standard: NS-EN ISO 7730. Fluktuerende temperaturer rundt 22 grader med +/- 2 grader er optimalt (Nasjonalt Folkehelseinstitutt, 2015).

2.7 Reboundeffekt

Rebound-effekten er når virkningen av å effektivisere fører til økt konsum av energi og dermed utnyttes ikke det fulle teoretiske potensialet. Et eksempel på dette er mer effektive biler som utnytter drivstoffet bedre. Dette åpner for at sjåføren kan kjøre lengre distanser på samme drivstoffbruk som før. Man skulle tro at mer effektiv motor ville føre til mindre forbruk av drivstoff. Dette er derimot ikke alltid tilfellet og man opplever en økning i kjørte kilometer som følge av billigere drivstoff (Sorrell, 2007).

Dette prinsippet er også gjeldende når det kommer til energieffektivisering i bygninger. Et energieffektiviserende tiltak er å installere varmepumper som er mer effektive i energibruken enn tradisjonelle oppvarmingsmetoder. Dette fører til at man utnytter energien mer effektivt ettersom man får ut mer varme for samme mengde energi. Samtidig blir en andel av energibesparelsen brukt opp på at man tillater seg en mer komfortabel innetemperatur som følge av lavere energikostnader. På denne måten ser man at effektiviseringen ikke oppnår sitt fulle teoretiske potensial.

Ifølge (Sorrell) har private husholdninger en rebound-effekt på mindre enn 30% for oppvarming og nedkjøling i bygninger. Likevel er ofte nettogevinsten av god nok størrelse til at det er gunstig å gjennomføre energieffektiviseringstiltaket (Blok & Nieuwlaar, 2017).

Reboundeffekten er viktig å ta hensyn til ettersom gevinsten fra tiltaket ikke nødvendigvis blir av den forventede størrelsen. Dette kan igjen påvirke fleksibilitetspotensialet ettersom en godt isolert vegg har lavere U-verdi og dermed mindre varmetap. Et mindre tap av varme gir mindre forbruk å kunne flytte på og dermed et lavere fleksibilitetspotensiale for utkobling av varmeapparat i bygg.

2.8 SIMIEN

SIMIEN er et energisimuleringsprogram som blant annet benyttes til å beregne energimerking av bygg og evaluering av bygg opp mot byggetekniske forskrifter. SIMIEN benyttes også til å simulere inneklimate og dimensjonerer oppvarming, kjøling og ventilasjon. Versjon SIMIEN 6.017 er bygget på Norsk Standard NS3031:2014 og evaluerer mot tekniske byggeforskrifter for beregning av energimerking. Programvaren gir muligheter for helårs-, sommer- og vintersimulering (ProgramByggerne, u.å.-b; SIMIEN, u.å.).

Til grunn for simuleringen ligger en smi-fil som inneholder hvert spesifikke byggs fasade, energidata, konstruksjon og byggspesifikke data (Dokka, 2024b).

SIMIEN er en empirisk basert som gir en indikasjon på hvordan energiforbruket i et bygg vil bli seende ut med de gitte forutsetningene som er valgt. Simuleringen kommer med en utskrifts-fil der man kan filtrere på ønskede resultat. Når et bygg skal energimerkes er SIMIEN en godkjent programvare å benytte for kontrollregne opp mot eksisterende lovverk (Dokka, 2024b; ProgramByggerne, u.å.-a).

3 Metode

Dette kapitlet tar for seg metoden for grovestimering av transmisjonsvarmetapet til en yttervegg i en bygning i kapittel 3.1. Deretter utledes metode for simuleringsverktøy av det samme bygget i kapittel 3.2. Simuleringene er bakgrunnsdata for å utlede responstid og utkoblet effekt som sammen utgjør estimert fleksibilitetspotensiale for bygningen i kapittel 3.3.

3.1 Transmisjonsvarmetapet gjennom yttervegg

Liste over ligninger benyttet i metoden:

$$Q = k \cdot A(\Delta T) \quad (1)$$

$$\Delta T = T_{Inne} - T_{Ute} \quad (2)$$

$$Q_{diff} = Q_x - Q_y \quad (3)$$

Transmisjonsvarmetap gjennom yttervegg:

Formel (1) illustrerer varmetapet som følge av sammenhengen mellom varmeutveksling fra innendørs til utendørs gjennom byggets kvaliteter. Dette er en forenkling som ser bort fra faktorer som personer og møblement i rommet, orientering, solinnstråling, overflatens struktur og vindhastighet. Beregningene gir et grovestimat som kan sees på som en boks der arealet, temperatur og varmegjennomgangskoeffisienten gir ut et varmetap av den ene veggen (Geving, 2021).

Innendørstemperaturen i et rom er avhengig av effekt varme tilført fra indre omgivelser, fra varmeapparat, ventilasjon og hvor mye som blir ledet ut gjennom ytterveggene. Hvor stort varmetapet fra innendørs til utendørs blir avhenger av temperaturen inne og ute. Differansen mellom innendørstemperatur (T_{Inne}) og utendørstemperaturen (T_{Ute}) drives som nevnt i kapittel 2.4 primært av varmeutvekslingen gjennom varmeledning mellom innendørsluft – innervegg – isolasjon – yttervegg - utendørsluft (Blok & Nieuwlaar, 2017).

Formel (1) består av parameterne «Q», « ΔT », «k» og «A». Der «Q» representerer varmegjennomstrømmingen gjennom bygget og blir oppgitt i Watt [W]. « ΔT » representerer differansen mellom temperaturen inne i rommet og temperaturen utendørs på lokasjonen og oppgis i Kelvin [K]. Konstanten «k» representerer ledningsevnen til komponentene til bygget og er ofte omtalt som U-verdi som nevnt i kapittel 2.5 med enhet [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]. «A» representerer overflaten til ytterveggen og er oppgitt i kvadratmeter [m^2] (Blok & Nieuwlaar, 2017). For å få resultatet i Wattimer [Wh] istedenfor i ren effekt [W] er det mulig å legge til et tidselement for å utrykke hvor stort varmetapet til bygningen er over den gitte tidsperioden. Sammenhengen mellom energi, effekt og tid er utdypet i kapittel 2.1.

Regneeksempel med data fra Ensonebygg:

Benytter verdier fra ensonebyggfilen hentet fra undervisning i faget «Analyser av fornybare energisystemer» FORNY360 som ble undervist høsten 2023 ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet for å få verdier til å utføre et regneeksempel.

Når det kommer til temperatur settes høyeste T_{Inne} til 22 grader og reduseres med 0,1 grad til 18,9 grader på bakgrunn av kapittel 2.6. Utendørstemperaturen T_{Ute} blir satt konstant til -20 grader da det er i de kaldeste periodene at effektproblemene er størst som nevnt i kapittel 2.2. Benytter formel (2) for å finne temperaturdifferansen « ΔT ».

Videre benyttes formel (1) for å finne transmisjonsvarmetapet for ytterveggen.

Transmisjonsvarmetapet fra ytterveggen til ensonebygget med innendørstemperatur 22 grader er referansetapet og omtales videre som Q_{Ref} .

Videre regnes det ut transmisjonstapverdier for fallende innendørstemperaturer. Dette gjøres på samme måte som Q_{Ref} , men med fallende innendørstemperaturer med 0,1 grad reduksjon for hver nye Q .

Sammenhengen mellom temperatur og transmisjonstapet kommer frem av Figur 3 som er et diagram av de ulike transmisjonsvarmetapene opp mot ulike innendørstemperaturer med øvre og nedre temperaturgrense.

Videre benyttes formel (3) for å se hva effektdifferansen mellom de ulike transmisjonstapene (Q) er. Effektdifferansen mellom varmetapene indikerer hvilken effekt som er knyttet opp til hvilken reduksjon i innendørstemperatur.

3.2 Metode for å avdekke fleksibilitetspotensialet i bygninger med SIMIEN

I simuleringene vil det bli benyttet versjon: SIMIEN 6.017 med undervisningslisens og datafilen er et ensone testbygg. Ensone vil si at hele bygget regnes som en sone. Filen er også forenklet med fire yttervegger og fremstår mer som en firkantet boks og har ikke avansert konstruksjon, men operer som et vanlig bygg. Undervisningslisensen gir visse restriksjoner til programvaren med restriksjoner på blant annet energimerkesystemet (SIMIEN, u.å.).

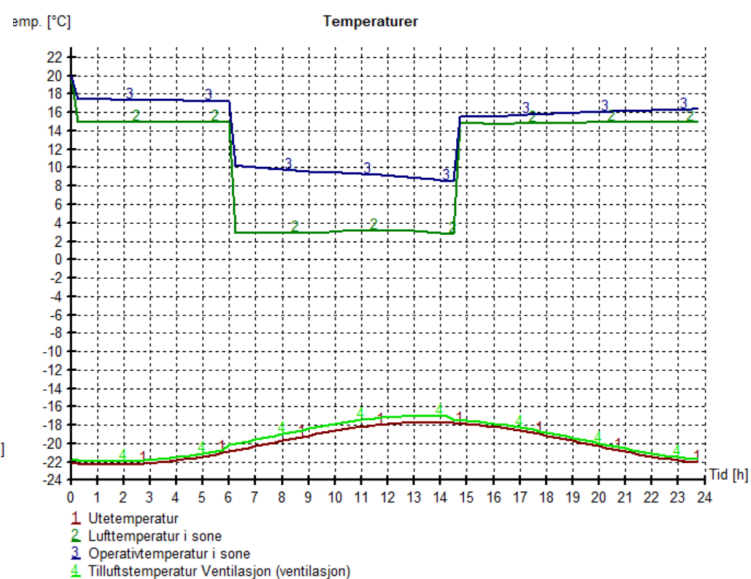
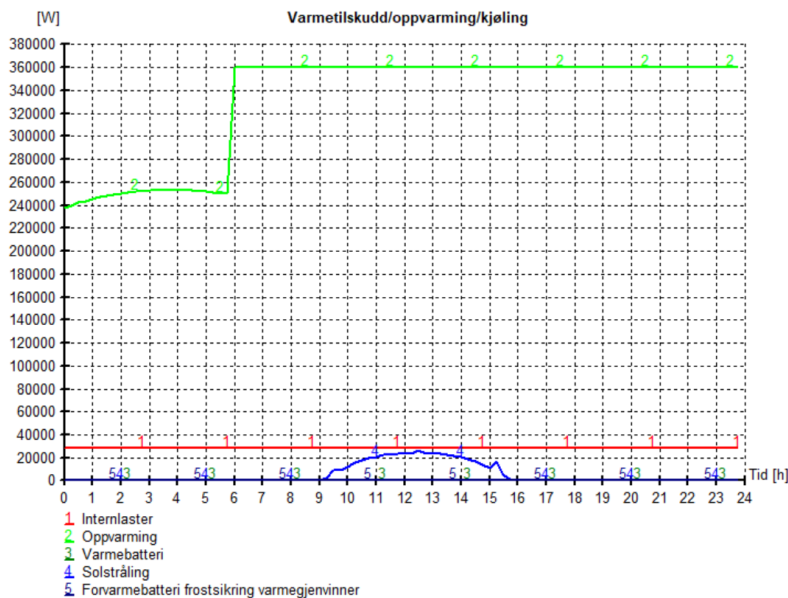
Ensonebygg smi-filen er hentet fra undervisning i faget FORNY360 fra høsten 2023 ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet og benyttes som en forenkling for å illustrere

temperatur og effektvariasjoner knyttet til utkobling av oppvarmingselementet i bygg etter endt driftstid.

Når man kontrollregner mot standarden skal man benytte flere soner for å fange opp områder der det er endringer i effekt i oppvarmingselementet eller for å understreke bygningsindividuelle kvaliteter som store vindusflater eller kuldebroer (ProgramByggerne, u.å.-a) Ettersom målet for oppgaven er å undersøke temperaturforandringer og effekter til oppvarming isolert sett benyttes et ensonebygg for å enklere gi en tilnærming til å analysere oppvarmingsbehovet. Kompleksiteten i simuleringen blir redusert slik at det blir tydeligere å illustrere og tolke resultatene for å få en indikasjon på om SIMIEN kan benyttes til å avdekke fleksibilitetspotensialet i bygninger.

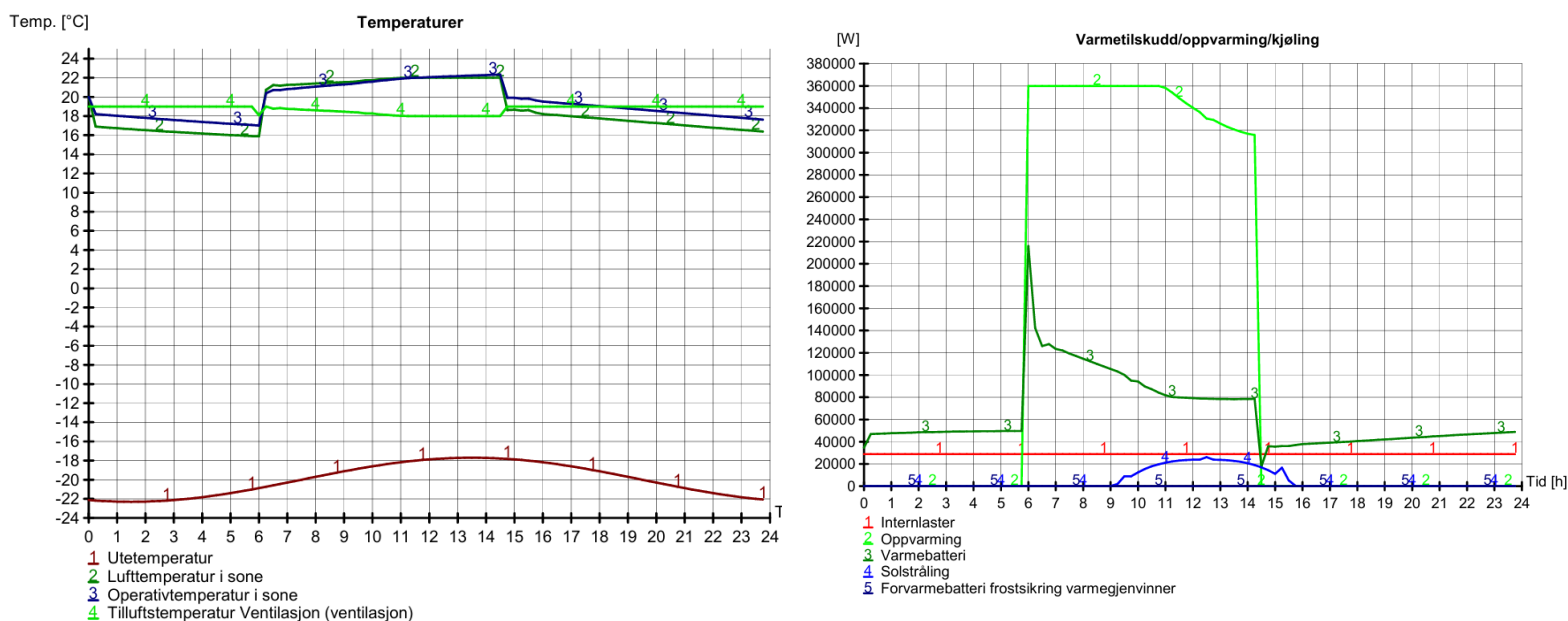
Vintersimuleringen benyttes vanligvis for å dimensjonere ventilasjon og oppvarmingsanlegg under lave utendørstemperaturer. Gjennom personlig korrespondanse med en av grunnleggerne av programvaren Kjell A. Dokka, ble det anbefalt å benytte vintersimulering for å se hvordan temperaturen og effekten på oppvarming i bygget oppfører seg etter avslått oppvarming (Dokka, 2024b). En annen fordel med vintersimuleringen er at man får data oppgitt for hvert 15. minutt istedenfor timesoppløsning som ved en årssimulering.

Ventilasjon er utenfor oppgavens omfang ettersom det er oppvarmingselementet som blir utforsket. Ventilasjon og oppvarming påvirker hverandre siden begge bidrar med effekter til innendørstemperaturen i et rom (Wigenstad et al., 2012). I SIMIEN-programmet er det en modul som heter «ventilasjon» og en for «oppvarming». I ventilasjonsmodulen kan man sette driftstid og skru av «Varmebatteri» og «Varmegjenvinner». Dette ble gjort for å isolere slik at simuleringene er gjelden for oppvarmingselementet. Resultatene fra temperatur og effekter under vintersimulering fikk en unormal karakter og simuleringen av bygget ble komprimert ved avslått varmebatteri.



Figur 1: Utklipp av vintersimuleringsrapporten for varmetilskudd og temperatur for Ensonebygg med avslått ventilasjon.

Fra vintersimuleringsrapporten for Ensonebygget med avslått ventilasjon er ikke oppvarmingselementet av den karakter at det klarer å holde settpunkttemperaturene som er satt for bygget og går for maksimal effekt og ikke vedlikehold av settpunkttemperatur (Figur 1). Når ventilasjon blir avslått vinterstid kommer det veldig kald luft inn i tillegg til problemer med kondens (Dokka, 2024b). På bakgrunn av dette er det valgt å ha på ventilasjon, men i videre arbeid med simuleringsdataene er det gjort en forenkling ved å kun benytte netto oppvarmingseffekter fra oppvarmingselementet. Vintersimuleringsutskrift med ventilasjonslaster gir en mer realistisk innendørstemperatur og et mer realistisk bilde av hvordan et bygg blir driftet. Figur 2 viser utskrift fra vintersimuleringen som er benyttet i oppgaven med ventilasjon.



Figur 2: Utklipp av vintersimuleringsrapporten for varmetilskudd og temperatur for Ensonebygg inkludert ventilasjon.

Simuleringene gjøres med en innendørstemperatur i sonen på 21 grader som anbefalt i kapittel 2.6 og driftstiden er satt til å gjelde fra 06:00 – 15:00 for å sikre at det er normal driftstilstand før utkobling av varmeelementet skjer kl 15:00. Det forutsettes at det ikke foregår andre aktiviteter på bygget på kveldstid. Settpunkttemperaturen utenfor driftstiden er satt til 15 grader for å kunne få et klart bilde av hva som skjer uten oppvarmingseffekter etter endt driftstid. Tidspunktet som er interessant å undersøke er fra 14:45 og til nedre temperaturgrense er nådd.

Antall simulerte døgn er satt til 1 for å kunne fange opp akkurat hva som skjer når oppvarmingen blir skrudd av uavhengig av hva som har skjedd tidligere i bygget. På denne måten har man kontroll på startbetingelsene for bygget. Valgt simulert dato er 20. januar. Eneste som påvirkes av valgt simulert dato er solhøyden (ProgramByggerne, u.å.-a). Energiforsyningen til bygget er satt til 100% elektrisk. Vintersimulering simulerer forhold under en kald norsk vinter der perioder med effektunderskudd kan oppstå og gjennomsnittlig utetemperatur som blir brukt i simuleringer er satt til – 20,2 grader.

Vintersimuleringsdataene blir kjørt i SIMIEN med de nevnte inndataene ovenfor. Simuleringsdataene er kopiert over i Excel-ark. Når det kommer til temperatur er den delt inn i fire underkategorier: lufttemperatur, operativ temperatur, ventilasjon og utendørstemperatur.

Operativ temperatur er opplevd temperatur i rommet. Dette er lufttemperatur inkludert varme fra overflater i rommet og er utdypet i kapittel 2.6. Når en nedre temperaturgrense på 20 grader er valgt er det tatt ut fra operativ temperatur og er den temperaturen som er gjeldende for metoden. Dette gir en temperaturdifferanse mellom øvre og nedre grense på 2 grader.

Grunnen til at det genereres egne grafer er for å tydeliggjøre temperaturforandringene fra et kvarter før driftslutt (kl 15:00) og til nedre temperaturgrense (20 grader) er nådd. I tillegg filtreres dataene til å gjelde for innendørstemperatur og effektene som oppgis er oppvarming fra elektrisitet. Eventuell tilført effekt fra ventilasjon og varmebatteri er utenfor denne oppgavens omfang og vil ikke bli inkludert. I vedlegg 2 viser totalt varmetilskudd til bygningen for vintersimulering og viser til at det er lav tilførsel av effekt fra internlaster og solinnstråling. Ventilasjon gir et middels godt varmeeffektbidrag, men blir sett bort fra ved denne forenklingen. Det er ingen tilleggseffekter knyttet til simuleringen fra kjøling ettersom kjøleelementet er avslått ved vintersimuleringer (Dokka, 2024b).

3.3 Metode for responstid, utkoblet effekt og fleksibilitetspotensial

Energibalanseprinsippet

Energibalanse er et grunnleggende prinsipp i fysikk og omhandler at energi kun kan endres fra en form til en annen. Endring i energi er lik energi tilført et system subtrahert med energi ut fra systemet (Boyle et al., 2018). Dette kan overføres til energibruk i bygninger ved å se på bygget som en boks. Energi inn, tilsvarer effekt tilført rommet, og energi ut er varmetapet fra bygget. Dette er en forenkling ettersom det er flere faktorer enn bare varmetap og effekt fra oppvarmingselement som påvirker innendørstemperaturen i et bygg. Noen av disse er ventilasjon, interne laster som mennesker som befinner seg i rommet og solinnstråling (Geving, 2021).

Det er ofte en nær sammenheng mellom strømforbruket knyttet til oppvarming og varmetapet til en bygning (Espedal, 2022). Av denne forenklingen utledes følgende formel:

$$\text{Energiforbruk til oppvarming} \approx \text{Varmetap fra bygningen} \quad (4)$$

Energibalanseprinsippet i denne sammenhengen går ut på at energiforbruk og energitap er tilnærmet like hverandre. Dette begrunnes med at tilført varme til et bygg er tilnærmet lik forbruket bygget har av varme. Dette forutsetter at varmeapparatet bygget benytter seg av bruker elektrisitet og ikke en annen energibærer.

Byggets kvaliteter og effektbehov simuleres for å finne responstiden som er tiden bygget bruker på å nå nedre temperaturgrense.

Responstid

Ettersom temperaturen faller, vil det ta lenger tid å tape samme mengde effekt. Dette kommer av at temperaturene (T_{Inne}) og (T_{Ute}) nærmer seg hverandre. Temperaturdifferansen ΔT er gitt i Formel (3) og er hoveddriveren for transmisjonsvarmetap i bygg (Blok & Nieuwlaar, 2017). Det vil derfor ta lenger og lenger tid å tape referanseeffekten for hvert minutt som går og dermed for hver grad som blir redusert (Figur 3).

For å kunne få et tidselement knyttet til responsen er man avhengig av å simulere eller direkte måle byggets kvaliteter, temperaturer og andre faktorer som spiller inn på varmetapet (Arteconi et al., 2019). SIMIEN benyttes som simuleringsverktøy for å få frem responstiden i denne oppgaven med en tidsoppløsning på 15 minutter der det simulerte bygget får en effekt og temperaturmåling hvert 15 minutt.

Ut fra simuleringen utledes responstiden fra driftsslutt til nedre temperaturgrense er nådd. Dette gir et tidsaspekt til temperaturnedgangen etter utkoblet varmeapparat for den enkelte bygningen.

Varmetap og effektgrenser

Responstiden benyttes for å finne øvre og nedre effektgrense. Øvre effektgrense er gitt ved å finne den gjennomsnittlige effekten som kreves for 22 grader i normaltilstand for bygget (SIM_{Ref}). På samme måte utledes nedre effektgrense ved å regne ut nødvendig gjennomsnittlig effekt under nedre temperaturgrense som er 20 grader innendørstemperatur. Gjennom energibalans prinsippet er energibehovet for øvre grense tilsvarende varmetapet fra bygget ved 22 grader innendørstemperatur.

Videre simuleres bygget for reduserte innendørstemperaturer mellom øvre og nedre grense, henholdsvis 22 grader med en reduksjon på 0,5 og ned til 20 grader. Ut fra dette utledes gjennomsnitts effektverdier for oppvarmingsselementet og knyttes til de ulike temperaturverdiene som vist i Tabell 3.

Effektbehovet til bygget tilsvarer varmetapet (Formel 4) og blir redusert som følge av reduksjonen i innendørstemperatur.

Utregning av fleksibilitetspotensiale

Når man har utleder fleksibilitetspotensialet for bygget benyttes arealutregning av øvre og nedre grense. Formel (5) viser hvordan arealet av øvre og nedre grense i Figur 5 regnes ut:

$$\text{Fleksibilitet [kWh]} = \text{Responstid [h]} * (\text{Øvre grense [kW]} - \text{Nedre grense [kW]}) \quad (5)$$

Tiden ved øvre grense tilsvarer øyeblikket varmeapparatet blir koblet ut og responstiden er 0. Tiden når det simulerte effektbehovet som tilsvarer varmetapet når ned grense er den totale responstiden. Effektbehovet for øvre grense subtrahert med effektbehovet for nedre grense gir effekten som kan kobles ut. For å finne varigheten til den utkoblede effekten multipliseres utkoblet effekt med responstiden. Resultatet gir arealet av firkanten mellom øvre grense, nedre grense og responstiden som er fleksibilitet potensialet for bygget.

4 Skolebygg CASE-studie

Det gjennomføres en CASE-studie for å avdekke hva responstiden og effektutkoblingsmulighetene og dermed fleksibilitetspotensialet for fire ulike videregående skolebygg er. Inndataene er hentet fra energiattesten for hvert av byggene og Ensonefilen fra SIMIEN er manipulert til å representere hvert enkelt bygg. Resultatene er ikke representative for skolebyggene i Vestfold siden det er gjort antagelse om 100% energiforbruk til oppvarming fra elektrisitet som gjør at simuleringen ikke er representativ for slik byggene driftes. Simuleringsdataene kopieres over i Excel-ark og metoden er den samme som i kapittel 3.3. Skolene befinner seg i samme klimasone.

4.1 Klimasone

Alle skolebyggene klassifiserer seg til samme klimasone Dfb etter Köppens klassifiseringssystem for klimasoner. Systemet er et vidt brukt klassifiseringssystem over verdens klimasoner (Mamen, 2021).

Klassifiseringen er et bokstavsystem der man først bestemmer klimasone (D) som deretter deles inn i klimatyper (f) og til sist inndeling i undertyper (b). Klimasone «D – kaldtemperert klima» klassifiserer til at temperaturen i den kaldeste måneden er under -3 grader og over 10 grader i den varmeste måneden. Klimatype «f – fuktig» klassifiseres til fuktig hele året og med klimaundertype «b» som defineres mild sommer med middeltemperatur på 22 grader (C. Ahrens & R. Henson, 2017) .

På bakgrunn av dette klassifiseringssystemet faller alle skolebyggene under klimasone Dfb og oppgitte data har derfor ikke behov for temperaturjustering i sammenligningen.

4.2 Inndata fra energiattest

Dataene som er brukt til å manipulere ensonefilen for å representere de ulike skolebyggene er hentet fra energiattestene som er oppsummert i Tabell 1. Energiattestene fra byggene er fra 2012 og 2013 og er ikke i samsvar med energidata fra nyere tid, da det sannsynligvis er gjort utvidelser og andre tiltak på byggene. Derfor vil ikke de resultatene som kommer frem her være representative for slik skolebygget er i dag. Energiattestene er tilsendt av eiendomsrådgiver i Vestfold fylkeskommune etter forespørsel om innsikt i energidata for skolebygg i Vestfold fylke (Emami, 2024).

Tabell 1: Data fra energiattest brukt i ensone-filen for å representere skolebyggene i simuleringene.

	Skolebygg	Re VGS	Færder VGS	Greveskogen VGS	Th. Heyardahl VGS
	Oppvarmet luftrom	26067	21103	36764	97000
	Oppvarmet BRA [m ²]	7375	6780	11587	25616
	Energimerke	Rød C	Rød D	Rød C	Rød C
	Byggeår	1981	1969	1975	2009
U-verdier	Yttervegg	0,26	0,43	0,30	0,21
	Tak	0,30	0,23	0,32	0,11
	Gulv	0,10	0,22	0,04	0,10
	Vindu, dører	2,17	2,48	1,47	1,50
Areal	Yttervegg	2835	1788	2361	4241
	Yttervegg/4 + vindu /4	834	670	967	1799
	Tak	4257	2025	6241	6528
	Gulv	4268	2025	6161	7280
	Vindu, dører	501	893	1507	2954
	Totalt areal	11861	6731	16270	21003
	Lekkasjetall	2,42	3,00	2,11	1,00

4.3 Metode for SIMIEN modellering for skolebyggene

Prinsippet om å finne ut fleksibilitetsmuligheter fra SIMIEN ved å skru av oppvarming overføres til CASE-studien for skolebygg. Her er metoden den samme som i kapittel 3.3, men med inndata hentet fra energiattesten til de respektive skolebyggene. Dette gir en indikasjon på hvordan de ulike skolebyggene kan levere fleksibilitet.

Hvert skolebygg blir plottet inn i SIMIEN med sine respektive verdier for U-verdi yttervegg, gulv, tak, vindu og dører. Dette er en forenkling og hele bygget blir regnet under en sone og antas at det består av fire yttervegger. Fra energiattesten er det oppgitt totale tall og har derfor valgt å fordele yttervegg-, vindu- og dørarealet jevnt utover fire yttervegger for å passe

ensonebygget. Det antas også at all forbruk til oppvarming kommer fra elektrisitet og energiforsyningen til bygget settes til 100% elektrisitet, selv om dette ikke er tilfelle for byggene i realiteten. Driftstiden for oppvarming og ventilasjon er satt lik som Ensonebygg fra 06:00-15:00.

Modelleringen er en forenkling av bygget og tar ikke i like stor grad hensyn til en rekke faktorer som SIMIEN har mulighet til ved bruk av en mer detaljert og bygningsspesifikk simulering for det spesifikke bygget. Formålet med denne oppgaven er å utforske mulighetene for å benytte SIMIEN som allerede er en etablert programvare til å gi en indikasjon på fleksibiliteten til bygget.

Formel (5) og energibalanssprinsippet benyttes for dataene fra simuleringene for å komme frem til totalt estimert fleksibilitetspotensiale.

5 Resultat

Her fremstilles resultatene fra metoden beskrevet ovenfor. I kapittel 5.1 presenteres manuell utregning av formler for transmisjonsvarmetapet til ytterveggen i Ensonebygget. Deretter simuleres bygget i sin helhet ved bruk av simuleringsverktøyet SIMIEN og det utledes responstid, varmetap og fleksibilitet indikasjon for Ensonebygget. Til slutt presenteres resultatene fra CASE-studien med hvert skolebyggs respektive responstid og estimert fleksibilitetspotensiale.

5.1 Transmisjonsvarmetapet fra konstruksjonsdelen

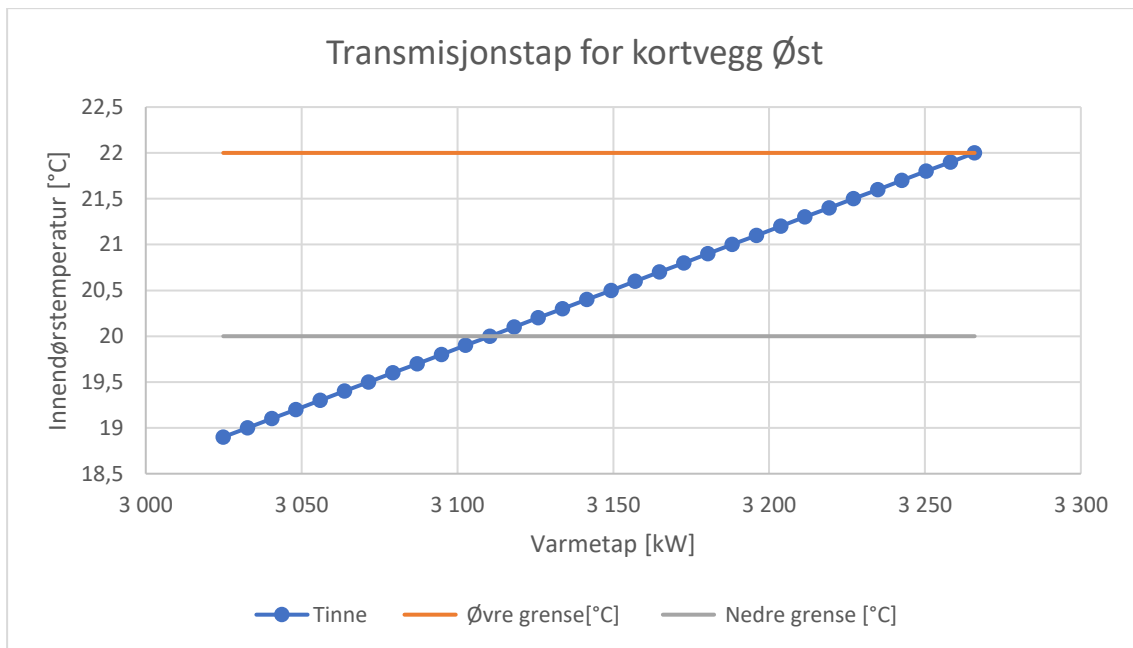
Transmisjonsvarmetapet til yttervegg Øst for bygget Ensone estimeres ved bruk av Formel (1) og byggekvalitetsdata hentet fra ensonebygg-filen fra programvaren SIMIEN.

Verdier fra Ensonebygg SIMIEN:

Kortvegg mot øst:

U-verdi = 0,18 W/m²K

Totalt areal inkludert vinduer = 432 m²



Figur 3: Sammenhengen mellom endring i innendørstemperatur og varmetap for kortvegg Øst fra grovestimatutregning. Med øvre temperaturgrense (22. [°C]) og nedre temperaturgrense (20 [°C])

Grovutregning for yttervegg Øst i Ensonebygget med bruk av Formel (1) gav et resultat på 3,27 kW med en innendørstemperatur på 22 grader og utendørstemperatur på -20 grader. Mer utfyllende utregning finnes i vedlegg 1. Kortvegg Øst har et varmetap på 3,27 kW. Veggens taper 3,27 kW varme når innendørstemperaturen er 22 grader. Ut fra Figur 3 observeres det en lineær sammenheng mellom fallende innendørstemperatur og varmetapet til bygget.

Beregninger av Formel (3) uttrykker en effektdifferanse på 7,78 W. Figur 3 illustrerer sammenhengen mellom varmetap og innendørstemperatur og viser at ved 0,1 grad nedgang i T_{Inne} oppstår et varmetap fra Ensonebygget på 7,78 W. Effektdifferansen mellom øvre og nedre grense er 0,16 kW.

5.2 SIMIEN som fleksibilitetsindikator

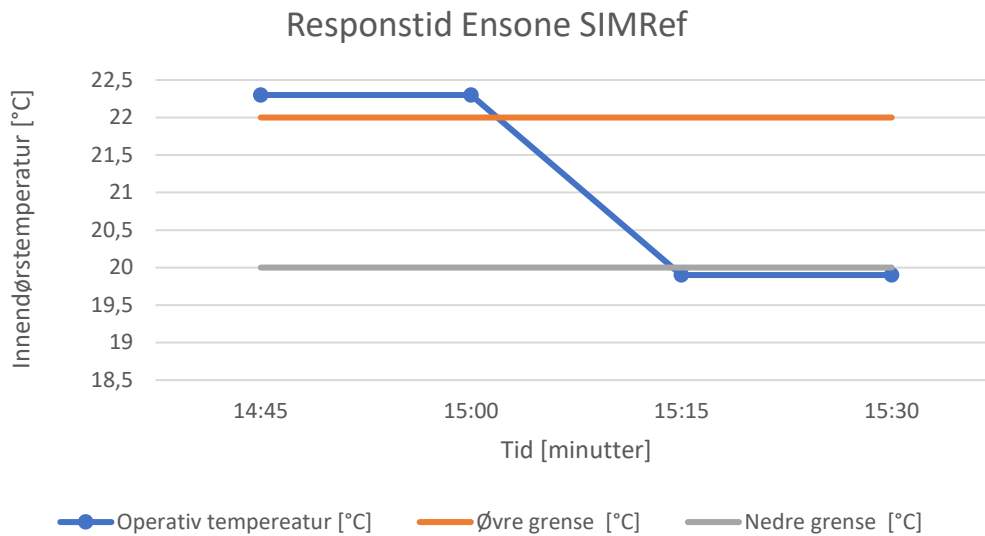
Responstid

Ut fra resultatene fra Figur 4 tilsvarer responstiden mindre enn 15 minutter.

For hvert femtende minutt er det registrert en måling med temperaturregistreringer som vist i Tabell 2. Her faller temperaturen med en ukjent hastighet og nedre grense nås i løpet av 15 minutt. Oppvarming blir avslått kl 15:00 og faller til under akseptabelt nivå mellom 15:00 og 15:15.

Tabell 2: Responstider for Ensonebygg SIMIEN med tilhørende simulert innendørstemperatur.

Tid klokke	Operativ temperereatur [°C]
14:45	21,8
15:00	21,8
15:15	19,7
15:30	19,6



Figur 4: Responstid for Ensonebygg med øvre og nedre temperaturgrense.

Varmetap og effektgrenser

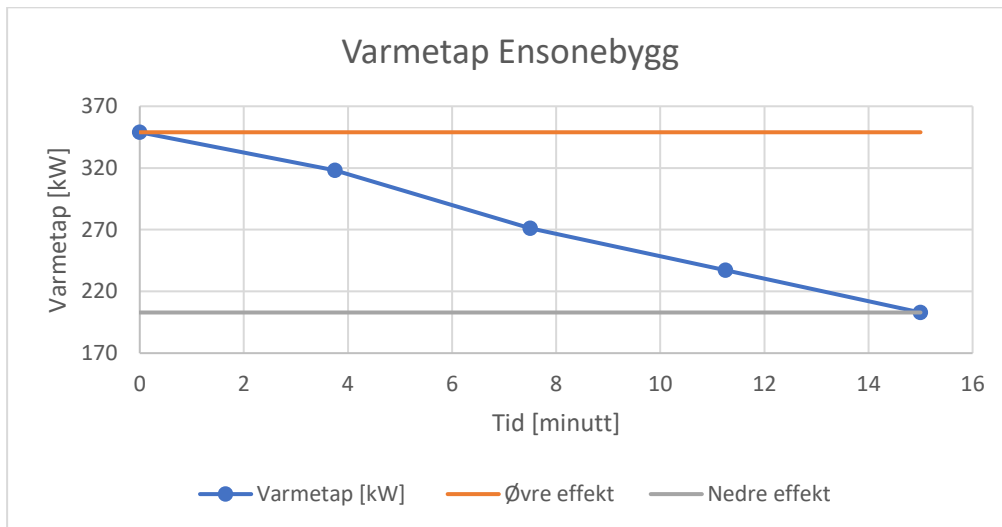
Varmetapet for Ensone utledes ved bruk av gjennomsnittseffektverdier for fallende innendørstemperaturer og sees i sammenheng med energibalanseprismippet utledet av Formel (4). En oversikt over gjennomsnittstemperaturer og øvre og nedre effektgrense vises i Tabell 3.

Tabell 3: Oversikt over varmetap for fallende innendørstemperatur for å utlede øvre og nedre effektgrense.

Navn	Tinne	Gj. Temperatur	Gj. Effekt [W]	Øvre effekt [kW]	Nedre effekt [kW]	SIMIEN tid	Tid estimert
SIM Ref	22	21,75	348962	349	203	0	0
SIM 1	21,5	21,22	318010	349	203	0	4
SIM 2	21	20,81	271273	349	203	0	8
SIM 3	20,5	20,40	237302	349	203	0	11
SIM 4	20	19,97	202938	349	203	15	15

Ut fra resultatene fra simuleringene får man en «Øvre effektgrense» på 349 kW og en «Nedre effektgrense» på 203 kW. På grunn av tidsopløsningen på dataene er det ikke mulig å simulere nøyaktig hvilket tidspunkt innendørstemperaturen i bygget er 20 grader siden kl

15:00 er det 21,8 grader i bygget som er når varmeapparatet blir avslått og nedre temperaturgrense er nådd før neste tidsintervall. Varmetapet er forenklet illustrert ved å fordele responstiden jevnt utover innendørstemperaturene (Figur 5). Og responstiden rundes grovt opp til å være gjeldende for første måling, altså 15 minutter.



Figur 5: Varmetap for Ensonebygg med tilhørende øvre og nedre effektgrense.

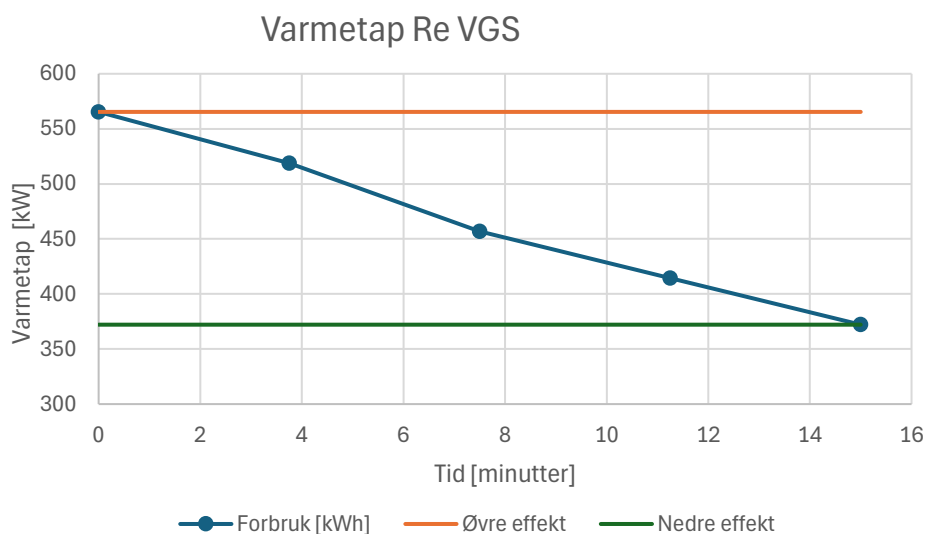
Ensongbygget med en responstid på $15 \text{ min}/60 = 0,25 \text{ [h]}$ og varmetap utledet fra simulering i SIMIEN som gir effektdifferanse mellom øvre og nedre grense på 146 kan bygget tilby et totalt fleksibilitetspotensial på 36,5 kWh.

5.3 Flexibilitetsmuligheter i skolebygg

For CASE-studien er samme fremgangsmåte som fra kapittel 3.3 benyttet. For hvert skolebygg har ensonefilen blitt manipulert til å tilsvare bygget gjennom energidata fra energiattesten til det respektive bygget. Responstid og varmetap har videre blitt utledet og til slutt estimeres totalt fleksibilitetspotensiale for bygningen. I vedlegg 3 presenteres en oversikt over utdata fra simuleringen som er grunnlaget for responstiden og varmetapet for skolebyggene fra CASE-studien. I vedlegg 2 er utskriftdata fra simuleringsverktøyet SIMIEN.

Re VGS

Byggets kvaliteter er av den karakter at nedre temperaturgrense blir nådd innen 15 minutter tilsvarende 1 måling etter endt driftstid for varmeapparatet. Varmetapene for fallende innendørstemperaturer er knyttet opp mot responstiden for å utlede øvre og nedre effektgrense og dermed det totale fleksibilitetspotensialet (Figur 6).



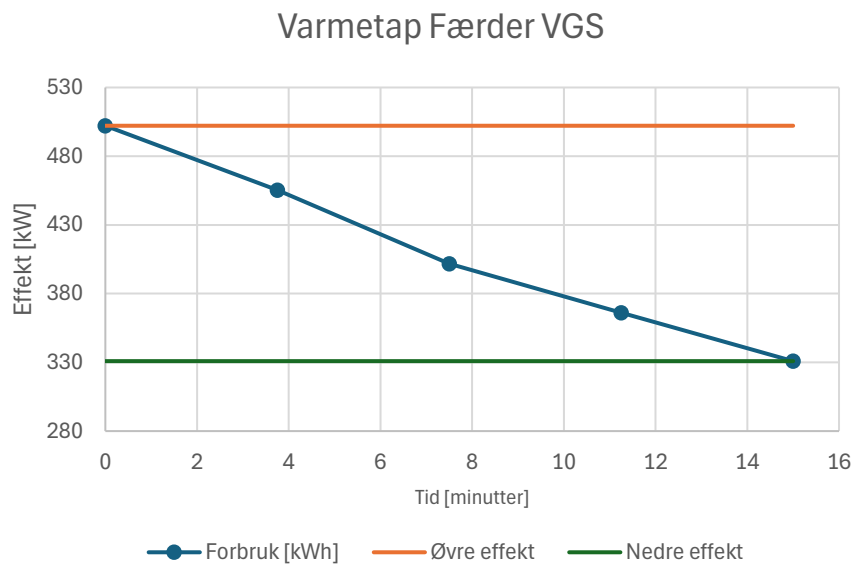
Figur 6: Simulert varmetap for Re VGS med øvre og nedre effektgrense.

Øvre effektgrense er 565 kW og nedre effektgrense er 372 kW. Dette gir en effektdifferanse mellom øvre og nedre grense på 193 kW.

Skolebygget Re kan med en responstid på 0,25 [h] og med en effektdifferanse for akseptabelt temperaturintervall på 193 kW tilby et totalt fleksibilitetspotensial på 48,25 kWh.

Færder VGS

Byggets kvaliteter er av den karakter at nedre temperaturgrense blir nådd innen 15 minutter tilsvarende 1 måling etter endt driftstid for varmeapparatet. Varmetapene for fallende innendørstemperaturer er knyttet opp mot responstiden for å utlede øvre og nedre effektgrense og dermed det totale fleksibilitetspotensialet (Figur 7).



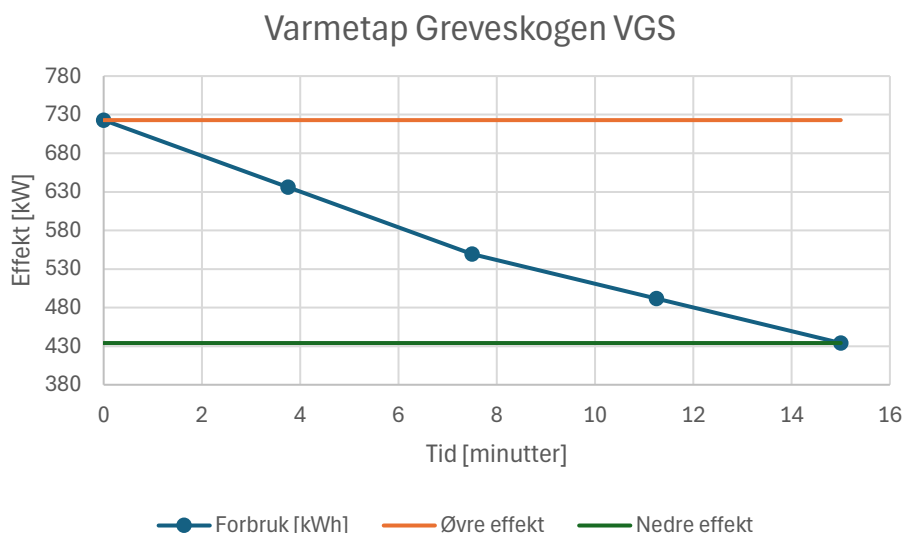
Figur 7: Simulert varmetap for Færder VGS med øvre og nedre effektgrense.

Øvre effektgrense er 565 kW og nedre effektgrense er 372 kW. Dette gir en effektdifferanse mellom øvre og nedre effektgrense på 171 kW.

Skolebygget Færder kan med en responstid på 0,25 [h] og med en effektdifferanse for akseptabelt temperaturintervall på 171 kW tilby et totalt fleksibilitetspotensial på 42,82 kWh.

Greveskogen VGS

Byggets kvaliteter er av den karakter at nedre temperaturgrense blir nådd innen 15 minutter tilsvarende 1 måling etter endt driftstid for varmeapparatet. Varmetapene for fallende innendørstemperaturer er knyttet opp mot responstiden for å utlede øvre og nedre effektgrense og dermed det totale fleksibilitetspotensialet (Figur 8).



Figur 8: Simulert varmetap for Greveskogen VGS med øvre og nedre effektgrense.

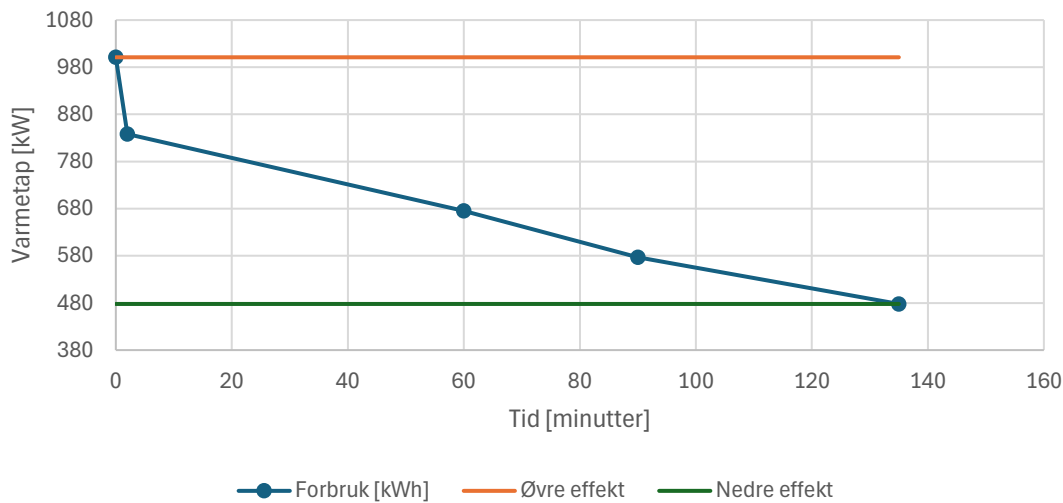
Øvre effektgrense er 723 kW og nedre effektgrense er 434 kW. Dette gir en effektdifferanse mellom øvre og nedre grense på 289 kW.

Skolebygget Greveskogen kan med en responstid på 0,25 [h] og med en effektdifferanse for akseptabelt temperaturintervall på 289 kW tilby et totalt fleksibilitetspotensial på 72,25 kWh.

Th. Heyerdahl VGS

Byggets kvaliteter er av den karakter at nedre temperaturgrense blir nådd innen 135 minutter tilsvarende 1 måling etter endt driftstid for varmeapparatet. Varmetapene for fallende innendørstemperaturer er knyttet opp mot responstiden for å utlede øvre og nedre effektgrense og dermed det totale fleksibilitetspotensialet (Figur 9).

Varmetap Th. Heyerdahl VGS



Figur 9: Simulert varmetap for Th. Heyerdahl VGS med øvre og nedre effektgrense

Øvre effektgrense er 1 001 kW og nedre effektgrense er 478 kW. Dette gir en effektdifferanse mellom øvre og nedre grense på 523 kW.

Skolebygget Th- Heyerdahl kan med en responstid på 2,25 [h] og med en effektdifferanse for akseptabelt temperaturintervall på 523 kW tilby et totalt fleksibilitetspotensial på 1 177 kWh.

5.3.1 Sammenligning av skolebygg

En vurdering av oppvarmet BRA, U-verdier og estimert fleksibilitetspotensiale for hvert bygg er sammenstilt i Tabell 4. Hvor grønn farge representerer den beste verdien og rød farge representerer den dårligste verdien i sammenlignet med de andre skolebyggene.

Tabell 4: Sammenligning av U-verdi, oppvarmet BRA og estimert fleksibilitetspotensial for de ulike skolebyggene.

	Skolebygg	Re VGS	Færder VGS	Greveskogen VGS	Th. Heyerdahl VGS
U-verdier	Yttervegg	0,26	0,43	0,30	0,21
	Tak	0,30	0,23	0,32	0,11
	Gulv	0,10	0,22	0,04	0,10
	Vindu, dører	2,17	2,48	1,47	1,50
	Oppvarmet BRA [m ²]	7375	6780	11587	25616
Fleksibilitetspotensial [kWh]		48,45	42,82	72,25	1 177

Skolebygget Th. Heyerdahl har størst oppvarmet areal og gjennomsnittlig lavest U-verdi for de ulike bygningselementene. Færder har minst oppvarmet areal og de høyeste U-verdiene. Resultatene viser at Th. Heyerdahl har størst fleksibilitetspotensial på 1 177 kWh, mens Færder VGS har lavest totalt fleksibilitetspotensial på 42,82 kWh.

6 Diskusjon

Når man generer simuleringer og grafer er det viktig å huske på at en simulering er et estimat av virkeligheten og er avhengig av kvaliteten på dataene som er lagt inn og antagelser og forenklinger som er lagt til grunn (Skirbekk, 2021). I dette kapittelet diskuteres resultatene og kvaliteten til inndata og simuleringen, og til slutt videre forskning.

6.1 Grovutregning av transmisjonsvarmetap

Resultatene viser at det er en lineær sammenheng mellom temperatur og varmetap. For hver reduksjon i innendørstemperatur på 0,1 grad, endres varmetapet fra veggen med 7,78 W. Her er det differansen mellom innendørs og utendørstemperatur, « ΔT » som er avgjørende. I regneeksempelt er det benyttet konstant utetemperatur på -20 grader som en forenkling. I realiteten vil også utetemperaturen fluktuerer med tid og kunne virke inn på « ΔT », ikke bare innendørstemperaturen. Figur 3 knytter ikke varmetap og temperatur opp mot et tidselement, men er en sammensetning av varmetap fra konstruksjonen knyttet mot fallende innendørstemperaturer for bygget.

En effektdifferanse på 0,16 kW mellom øvre og nedre grense for det akseptable temperaturintervallet kan tyde på at det totale fleksibilitetspotensiale for bygget vil være av en lavere kvalitet. Dersom temperaturintervallet mellom øvre og nedre temperaturgrense utvides vil man kunne tilby mer fleksibilitet (Buvik et al., 2022). Figur 3 bekrefter at en økning i temperaturintervall fører til en økning i effektdifferansen. Dersom nedre grense ble forskjøvet til 19 grader ville yttervegg Øst, ut fra grovestimatet, få en effektdifferanse mellom nedre og øvre grense på 0,23 kW. På en annen side er det viktig at bygget formål ikke blir komprimert som følge av fleksibilitetshendelsen og temperaturintervallet bør ikke bli satt til en uakseptabel lav innendørstemperatur for driften av bygget.

Varmetapet fra resultatet som er funnet med grovestimat på 7,78 W ser på veggen til bygget som en boks. De interne lastene som varme fra mennesker og møblement i rommet er ikke

inkludert, heller ikke solinnstråling, ventilasjon eller andre effekttilskudd utover oppvarming fra varmeelement i bygget. Simuleringsverktøyet SIMIEN tar i større grad hensyn til disse faktorene og vil kunne gi et mer representativt netto energibehov (Geving, 2021).

6.2 SIMIEN som simuleringsverktøy for fleksibilitet

I denne oppgaven er det forsøkt å benytte en simuleringsmodell som er ment til å estimere ventilasjons og oppvarmingsdimensjoner under vinterforhold i Norge til å simulere responstid. Programvaren er ikke programmert til å generere et fleksibilitetspotensial for oppvarmingselementet i bygninger. Det er derfor viktig å stille seg kritisk til resultatene og ikke gi dem for mye tyngde.

Samtidig er SIMIEN en anerkjent programvare som har kvaliteter til å kunne gi et tydelig bilde av hvordan et byggs energibehov og tekniske kvaliteter utfolder seg. Et ensonebygg er benyttet som en forenkling og smi-filen som bygger opp bygget inneholder fire vegger. Dersom man har tilgang til de originale smi-filene til de respektive byggene, eller utarbeider filen fra bunn av, vil man kunne få en mer representativ simulert fremstilling av hvert byggs energi- og byggkvaliteter. Dette vil igjen kunne gi mer representative data.

En annen faktor som ligger til grunn for resultatene er at energibehovet til oppvarmingselementet er tilnærmet lik varmetapet til bygget. Dette er en forenkling som gjør det mulig å benytte vintersimuleringen i SIMIEN til å sette tilnærmet likhetstegn mellom netto effektforbruk for varmeelement og varmetapet til bygget. Det er andre faktorer som påvirker oppvarming i bygg, eksempler på dette er internlaster som mennesker i rommet, belysning, teknisk utstyr og ventilasjon. Særlig ventilasjon vil kunne påvirke oppvarmingsbehovet for bygget og det er derfor størst usikkerhet knyttet til effektbehovet for oppvarming i resultatene.

Samtidig ligger internlaster og ventilasjon til grunn i SIMIEN og er inkludert i simuleringen av innendørstemperaturen. Når effektgrensene er satt er det valgt en forenkling med å bare se på effekter knyttet til oppvarmingselementet. Følsomheten rundt temperatur, ventilasjon, internlaster og oppvarmingselement kunne med fordelt blitt utforsket mer, men ble ikke prioritert i denne oppgavens omfang.

Det er knyttet stor usikkerhet til de simulerte resultatene når det gjelder varighet.

Responstiden for hendelsen utkoblet varmeapparat kommer ned til under 15 minutter for Ensonabygget, men det er usikkert om dette er gjeldende for det første minuttet eller det fjortende minuttet. Varigheten til responstiden er et viktig element i fleksibilitetspotensial for

bygninger (Buvik et al., 2022). Hvor lenge bygget klarer å holde på temperaturen uten tilførsel av varme fra varmeapparatet før nedre akseptable temperaturgrense er nådd er avgjørende for tilbudt fleksibilitet fra bygget. I denne oppgaven er en forenkling av usikkerhetsmomentet gjort og det antas enn responstid på nøyaktig 15 minutter i utregningen av fleksibilitetspotensialet. Dette fører til enda mer usikkerhet knyttet opp mot potensialet. For å kunne levere fleksibilitet er det satt en rekke tekniske krav til fleksibiliteten. Noen krever opp mot ti målinger i sekundet for å få riktig estimat av fleksibiliteten (Dalen et al., 2023). En måling hvert kvarter er ikke god nok tidsoppløsning til å gi et solid estimat av responstiden til å kunne melde inn fleksibilitet. SIMIEN er en empirisk modell og inneholder kompromiss i oppbygningen og grunnet usikkerhetene knyttet til dataene ville det vært misvisende å simulere med finere tidsoppløsning (Dokka, 2024b). Det er derfor behov for en ny modul i SIMIEN som tilrettelegger for tidsoppløsning ned på et lavere mål for å kunne ta i bruk programvaren som en indikasjon på fleksibilitetspotensialet i bygg.

Et annet element er gjenopprettingstiden til bygget. Hvor lang tid bygget bruker på å gjenopprette akseptabel innendørstemperatur etter en hendelse har innvirkning på det totale effektbehovet (Arteconi et al., 2019). Dette kan føre til at man blir nødt til å benytte seg av mer effekt ved et senere tidspunkt, enn om temperaturen hadde blitt vedlikeholdt. Det krever eksempelvis mer effekt å varme opp et bygg fra 12 grader til 20 grader enn fra 19 grader til 21 grader innenfor samme tidsrom. Gjenopprettingstiden er ikke tatt hensyn til i denne oppgaven når fleksibilitetspotensialet blir regnet ut grunnet oppgavens omfang. Den reelle fleksibiliteten til bygget vil kunne være av en annen kvalitet dersom gjenopprettingstiden også hadde blitt tatt hensyn til i resultatene.

Simuleringen er utført med en settpunkttemperatur i sonen på 21 grader. Hvilken innendørstemperatur det er i bygget før hendelsen inntreffer har betydning for hvor lenge bygget kan holde på varmen (Homaei & Hamdy, 2021). Dette kan å utover tidspunkt på døgnet bygget kan levere fleksibilitet. Etter helger, ferier eller natt kan det være at innendørstemperaturen i et bygg er for lav til at fleksibilitetspotensialet er av den forventede størrelsen.

Temperatur utenfor driftstiden er satt til 15 grader for å illustrere utkoblet oppvarmingselement. Dette får betydning for resultatene av simulert innendørstemperatur på grunn av at bygget varmer seg opp og oppnår ikke naturlig gjennomsnittlig effektbehov for oppvarming før temperaturen ligger jevnt på settpunkttemperaturen innenfor driftstiden. Dette

knyttet usikkerhet til hvor representative effektbehovene som er satt for de ulike simuleringene og som er bakgrunnen for øvre og nedre effektgrense. Dette er forsøkt kompensert for ved å sette driftstid til kl. 06:00 istedenfor 08:00 som er vanlig åpningstid for videregående skole.

6.3 CASE-studie: Forbrukerfleksibilitet fra skolebygg

Varmegjennomgang for yttervegger er begrenset av U-verdien til veggen og hvilket materiale den er bygget opp av. For et vindu er det varmegjennomgang til og fra overflatene som er den begrensende faktoren (Blok & Nieuwlaar, 2017). Prinsippet om at U-verdien er en begrensende faktor på varmegjennomgangen kan være en forklaring på hvorfor Th. Heyerdahl VGS kan tilby en lenger varighet på responstiden enn de andre skolebyggene. U-verdiene til Th. Heyerdahl er lavest sammenlignet med de andre byggene for tak og yttervegger. Når det kommer til U-verdiene for vindu, dører og gulv har Th. Heyerdahl nest lavest U-verdi (Tabell 4).

Samtidig har Th. Heyerdahl et betydelig større oppvarmet bruksareal enn de andre byggene. Av forenklingen i simuleringen er hvert av byggenes energidata fordelt på et ensonebygg bestående av fire vegger. Ved bruk av hvert byggs enkelte smi-fil vil man kunne gjenskape byggets egenskaper og energibehov mer nøyaktig. Oppvarmet BRA har betydning for varmetapet og varmeforbruket i et bygg (Espedal, 2022). Med en mer korrekt fremstilling av byggets kvaliteter vil noe av usikkerheten knyttet til oppvarmingsareal være mindre fremtredende. Th. Heyerdahl har en betydelig lenger responsperiode enn de andre byggene og får dermed en høyere effektdifferanse. Dette er utslagsgivende for den store forskjellen i estimert fleksibilitetspotensial.

Resultatene fra CASE-studien er ikke representative for dagens skolebygg med tilhørende navn. Dette kommer av at simuleringen er gjort med en annen smi-fil enn den som ligger til grunn for byggene. I tillegg er energiattesten som inndataene er hentet fra gjennomført i 2012 og 2013. Et bygg kan forandre seg mye på over ti år og de kvalitetene bygget hadde da kan være endret nå. Påbygg, driftsstrategi og energieffektiviseringstiltak er elementer som kan påvirke en bygnings energi- og konstruksjonskvaliteter over tid. Energieffektivisering påvirker energifleksibilitet gjennom flere elementer. Energieffektivisering vil kunne endre en bygnings energibehov permanent og dermed redusere mengden energi som er tilgjengelig i bygget for fleksibilitet. Samtidig vil energieffektivisering føre til en rebound-effekt for

fleksibilitet gjennom å styrke bygningens evne til å holde på varmen som er tilført bygningen ved bedre isolasjon og mindre varmetap når bygningskroppen oppdateres (Buvik et al., 2022).

Selv om denne oppgaven har tatt utgangspunkt i skolebygg er SIMIEN en programvare som regner ut energidata for flere bygningskategorier. Det vil derfor være mulig å benytte samme metode for andre typer bygg. Noen av bygningskategoriene som er tilgjengelige i SIMIEN er: kontorbygg, boligblokk, sykehjem, hotell og lett industri (ProgramByggerne, u.å.-a).

6.4 Videre forskning

Fremover vil det være nødvendig å samle inn mer detaljert data rundt hva som skjer i bygget etter effektutkoblingshendelsen. Å utføre målinger og utforske hvordan ulike konstruksjoner av bygg responderer på utkoblet varmeelement også i sammenheng med ventilasjon gjennom fysiske målinger i et kontrollbygg vil gi mer tyngde til resultatene. Å legge til en egen modul i SIMIEN som er bygget spesifikt med tanke på fleksibilitet og bygger på flere målinger i ulike typer bygg vil være nødvendig for å oppnå nødvendig detaljnivå.

Et annet element som med fordel kan utforskes videre er virkningen av mennesker i rommet. Dette er særlig interessant i offentlige bygninger som skoler og kontorer der det befinner seg flere mennesker over tid som også tilfører varmeeffekter til bygget og hvor stor virkning det har på operativ temperatur knyttet til fleksibilitetspotensiale og varmetap av bygg.

For å redusere omfanget av oppgaven ble skolebygg valgt som bygningskategori. Å kunne opprette en større database knyttet opp mot bygningskategori, TEK-standard eller energimerkingen for å estimere fleksibilitet er også noe som hadde vært interessant å utforske videre.

7 Hovedkonklusjon

SIMIEN som simuleringsverktøy er anerkjent til å utlede energibehov for bygg basert på energiforsyning og en bygnings kvaliteter. På grunnlag av dette har SIMIEN potensiale til å kunne simulere responstid for bygg. Simuleringen gir ikke ut et estimat på fleksibilitet og må bearbeides videre for å kunne tilby estimerte fleksibilitetseffekter for bygg.

Begrenset tilgang på data og mangel av fysiske kontroll målinger i bygg fører til store usikkerheter knyttet til resultatet. Det er derfor viktig å være forsiktig med å trekke endelige konklusjoner. Tidsoppløsningen i SIMIEN med målinger hvert 15 minutt gir et overordnet resultat for responstid, men det kreves mer detaljerte data for å kunne estimere fleksibilitet på et nivå som har verdi for innmelding til kraftnettet. Dersom det opprettes en modul med godt databasegrunnlag og som er utviklet spesifikt med tanke på fleksibilitet knyttet til elektrisk oppvarming i bygg, er det mulig at SIMIEN kan være relevant for å identifisere fleksibilitetspotensiale for bygg.

Det at usikkerhetene knyttet til varigheten på responstidene og mengde utkoblet effekt ikke er bekreftet med et kontrollbygg, fører til at fleksibilitetspotensialet til bygg som presenteres i denne oppgaven ikke er av den kvalitet at det kan benyttes til å estimere fleksibiliteten i bygg på et nivå til å kunne melde inn fleksibilitet til kraftnettet.

Selv om resultatene i denne oppgaven ikke er av nødvendig kvalitet, kan SIMIEN som simuleringsverktøy, med modifisering knyttet til tidsoppløsning og måledata i kombinasjon med fremtidens teknologi og kraftnett, kunne bli mulig å benytte til å simulere data av den kvalitet at knyttes mindre usikkerhet til fleksibilitetspotensialet i bygninger.

8 Litteraturliste

- Ahrens, C., & Henson, R. (2017). Air Temperature. In J. Chaffin (Red.), *Essentials of Meteorology - An invitation to the Atmosphere* (Utg. 8., s. 54-78). Cengage Learning.
- Ahrens, C., & Henson, R. (2017). Global Climate. In *Essentials of Meteorology - An invitation to the Atmosphere* (Utg. 8., s. 350-379). Cengage Learning
- Arteconi, A., Mugnini, A., & Polonara, F. (2019). *Energy flexible buildings: A methodology for rating the flexibility performance of buildings with electric heating and cooling systems*. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191931061X?via%3Dihub> (Lest: 23.04.2024)
- Blok, K., & Nieuwlaar, E. (2017). Energy services and energy demand. In *Introduction to energy analysis* (Utg. 4., s. 40-60). Routledge.
- Boyle, G., Donnison, C., Duckers, L., & Elliot, D. (2018). Introducing Renewable Energy. In S. Peak (Red.), *Renewable Energy - Power for a sustainable future* (Utg. 4., s. 1-7). Oxford University Press.
- Buvik, M., Cabrol, J., Spilde, D., Skaansar, E., Roos, A., & Tveten, Å. G. (2022). *Norsk og nordisk effektbalanse fram mot 2030*. Norges vassdrags- og energidirektorat. Hentet fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2022/rapport2022_20.pdf (Lest: 28.04.24)
- Byggteknisk forskrift. (2017). *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*. Hentet fra: <https://lovdata.no/pro/#document/SF/forskrift/2017-06-19-840> (Lest: 26.04.2024)
- Dalen, K., Sæle, H., & Bakken, B. H. (2023). *Fleksibilitet som kilde til verdiskaping og forretningsutvikling* Hentet fra: <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemedlinger/nyhetsarkiv-2023/okt-behov-for-fleksibilitet-gir-nye-muligheter-til-store-og-sma-aktorer/> (Lest: 15.04.2024)
- Dokka, K. A. (2024a). Programvaren SIMIEN. In E-post fra Kjell A. Dokka
- Dokka, K. A. (2024b). SIMIEN som fleksibilitetssimulator. In Digitalt møte Kjell A. Dokka
- Emami, K. (2024). Energiattest skolebygg Vestfold. In E-post fra Kaveh Emami
- Espedal, K. J. (2022). Varmeisolering. In A. J. Gåserud (Red.), *Bygningfysikk* (s. 75-110). Fagbokforlaget.
- European Commission. (u.å.). *Smart readiness indicator*. Hentet fra: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en?prefLang=sv (Lest:25.04.2024)
- EØS-notat. (2023). *Forslag til revidert bygningsenergidirektiv*. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/no/sub/eos-notatbasen/notatene/2022/des/forslag-til-revidert-bygningsenergidirektiv/id2959442/> (Lest:22.04.24)
- Geving, S. (2021). Varmetransport og varmetap - teori. In *Praktisk Bygningfysikk* (s. 17-36). Fagbokforlaget.
- Homaei, S., & Hamdy, M. (2021). *Thermal resilient buildings: How to be quantified? A novel benchmarking framework and labelling metric*. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321004200#dfig1> (Lest:24.04.2024)
- Mamen, J. (2021). Köppens klimaklassifikasjon. In *Store norske leksikon*. Hentet fra: https://snl.no/K%C3%B6ppens_klimaklassifikasjon (Lest: 20.04.2024)
- Nasjonalt Folkehelseinstitutt. (2015). *Anbefalte faglige normer for inneklime, Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer - 2015*. Nasjonalt Folkehelseinstitutt. Hentet fra: <https://www.fhi.no/publ/2015/anbefalte-faglige-normer-for-innekl/> (Lest: 15.05.2024)
- Nordic Balancing Model. (2024). *BSP - Implementation Guide – mFRR energy activation market*. Hentet fra: <https://nordicbalancingmodel.net/updated-version-of-implementation-guide-mfrr-eam-april-2024/> (Lest:14.05.2024)

- Norges vassdrags- og energidirektorat. (2016). *Analyse av energibruk i yrkesbygg*. Norges vassdrags- og energidirektorat. Hentet fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_24.pdf (Lest: 04.04.2024)
- NOU 2023: 3. (2023). *Mer av alt raskere - Energikommisjonens rapport*. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/pdfs/nou202320230003000dddpdfs.pdf> (Lest: 12.04.2024)
- ProgramByggerne. (u.å.-a). *Generelt om bruk av programmet*. Hentet fra: <https://www.programbyggerne.no/SIMIEN/doku.php?id=bruk> (Lest:19.04.2024)
- ProgramByggerne. (u.å.-b). *Introduksjon til SIMIEN*. Hentet fra: <https://www.programbyggerne.no/SIMIEN/doku.php?id=introduksjon> (Lest:19.04.2024)
- SIMIEN. (u.å.). *SIMIEN 6*. Hentet fra: <https://simien.no/home/produkt/simien-6/>(Lest:19.04.2024)
- Skirbekk, S. (2021). Simulering - samfunnsvitenskap. In *Store norske leksikon*. Hentet fra: https://snl.no/simulering_-_samfunnsvitenskap (Lest:21.04.2024)
- Sorrell, S. (2007). *The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy - Wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*. Hentet fra: https://www.researchgate.net/publication/258260565_The_Rebound_Effect_An_Assessment_of_the_Evidence_for_Economy-Wide_Energy_Savings_from_Improved_Energy_Efficiency (Lest: 15.05.2024)
- Spilde, D., Sævoid, M. H., Tuset, J. K., & Magnussen, I. H. (2023). *Energibruksrapporten 2023*. Hentet fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2023/rapport2023_35.pdf (Lest 11.04.2024)
- Statnett. (2018). *Fleksibilitet i det nordiske kraftmarkedet 2018-2040*. Hentet fra: <https://www.statnett.no/globalassets/for-aktorer-i-kraftsystemet/planer-og-analyser/2018-Fleksibilitet-i-det-nordiske-kraftmarkedet-2018-2040/> (Lest: 20.04.2024)
- Vagner, D., Gunnerød, J., Kringstad, A., Korneliussen, R., Christiansen, L., & Hytten, L. M. (2022). *Kortsiktig markedsanalyse 2022-27*. Hentet fra: <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemeldinger/nyhetsarkiv-2022/kortsiktig-markedsanalyse-okende-forbruk-gir-kraftunderskudd-fra-2027/>(Lest: 04.04.2024)
- Wigenstad, T., Schild, P. G., Klinski, M., & Simonsen, I. (2012). *Ventilasjons- og varmeløsninger i boliger med lavt energibehov*. Hentet fra: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2421976/Prosjektrapport110.pdf>(Lest: 13.05.2024)

9 Vedlegg

1. Vedlegg 1:

Utrekning av ligning 2:

$$Q = k \cdot A \cdot (\Delta T)$$

$$k = U\text{-verdi} = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta T = T_{Inne} - T_{Ute} = (22 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15) - (-20 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15) = 295,15 - 285,13 = 10 \text{ K}$$

$$A = 432 \text{ m}^2$$

$$Q_{Ref} = 0,18 * 432 * 10 = \mathbf{3\ 266\ W}$$

Utrekning for fallende innendørstemperatur:

Q₁ med 21,9 grader innendørstemperatur:

$$Q = k \cdot A \cdot (\Delta T)$$

$$k = u\text{-verdi} = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta T = T_{Inne} - T_{Ute} = (21,9 \text{ }^\circ\text{C} + 273) - (-20 \text{ }^\circ\text{C} + 273) = 294,9 - 285 = 9,9 \text{ K}$$

$$A = 432 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = 0,18 * 432 * 9,9 = \mathbf{3\ 258\ W}$$

Q₂ med 21,8 grader innendørstemperatur:

$$Q = k \cdot A \cdot (\Delta T)$$

$$k = u\text{-verdi} = 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\Delta T = T_{Inne} - T_{Ute} = (21,8 \text{ }^\circ\text{C} + 273) - (-20 \text{ }^\circ\text{C} + 273) = 293 - 285 = 9,8 \text{ K}$$

$$A = 432 \text{ m}^2$$

$$Q_2 = 0,18 * 432 * 9,8 = \mathbf{3\ 250\ W}$$

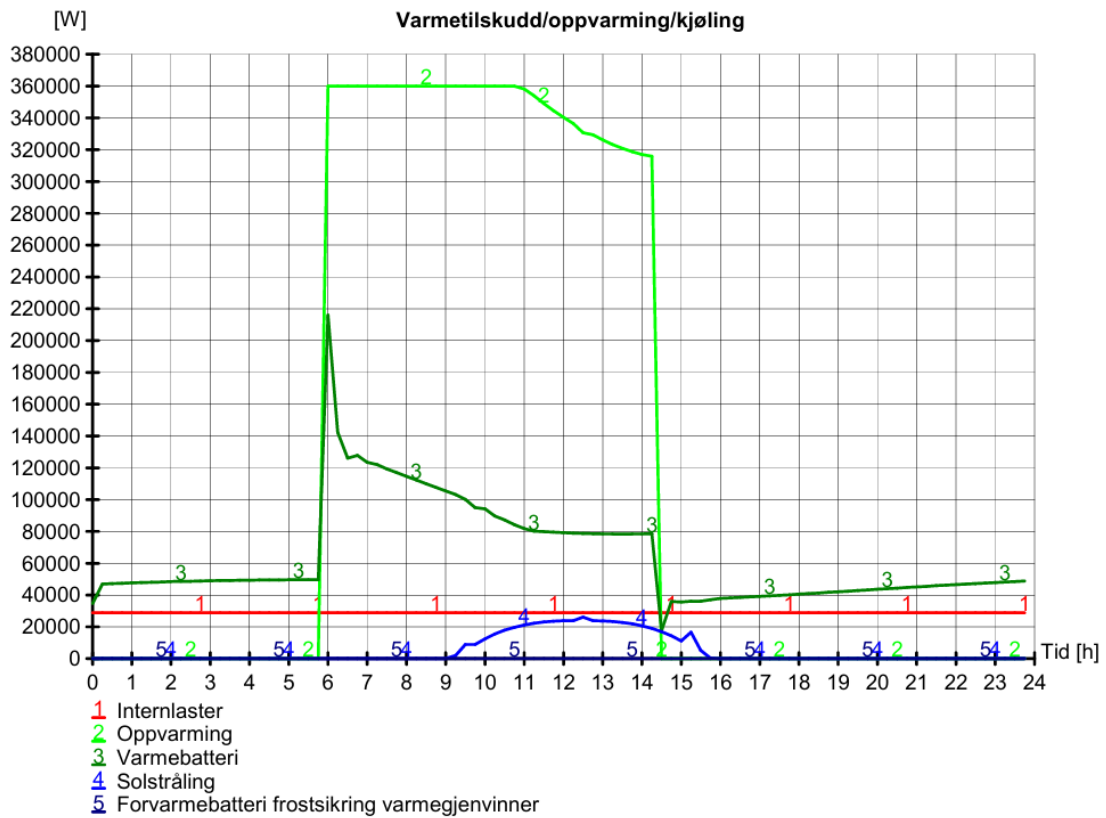
Effektdifferansen mellom transmisjonstapene:

$$Q_{ref} - Q_1 = 3\ 266 \text{ W} - 3\ 258 \text{ W} = 7,78 \text{ W}$$

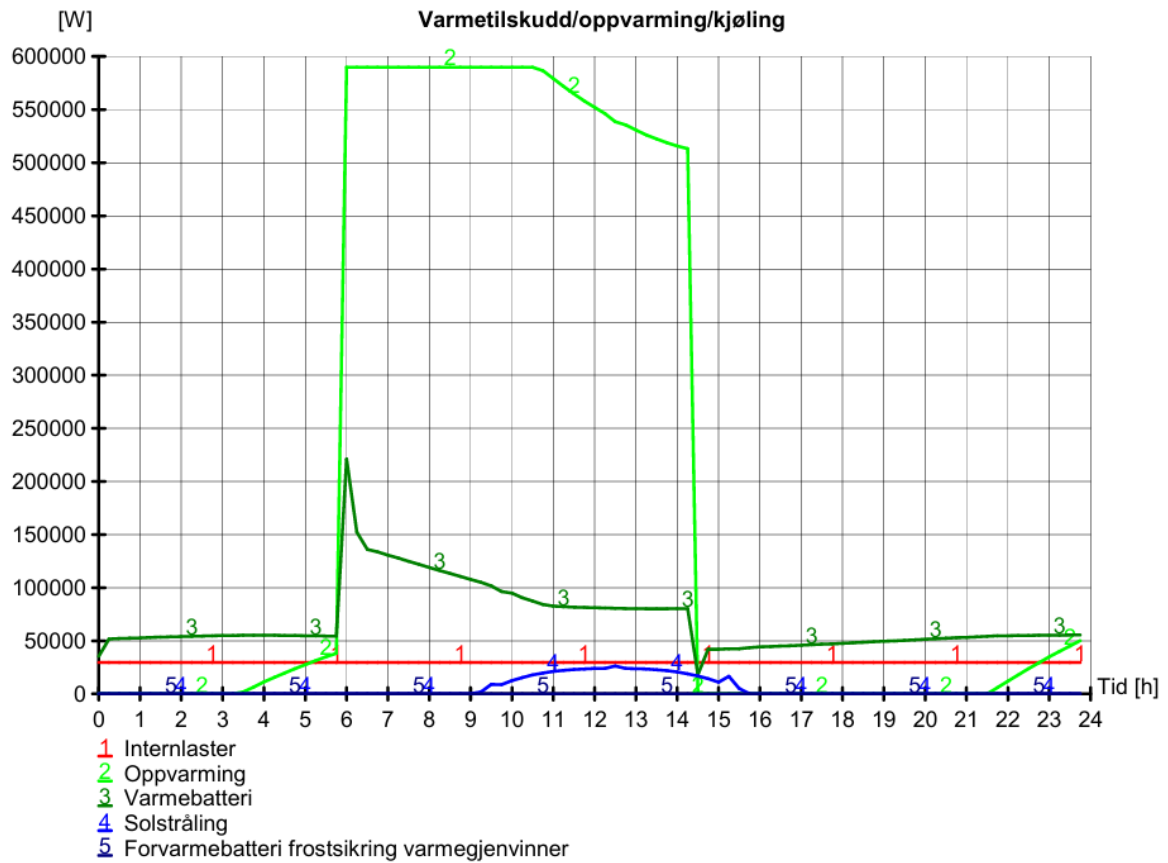
$$Q_1 - Q_2 = 3\ 258 \text{ W} - 3\ 250 \text{ W} = 7,78 \text{ W}$$

Ut av beregningene kommer det frem at det er en effektdifferanse på 7,78 W.

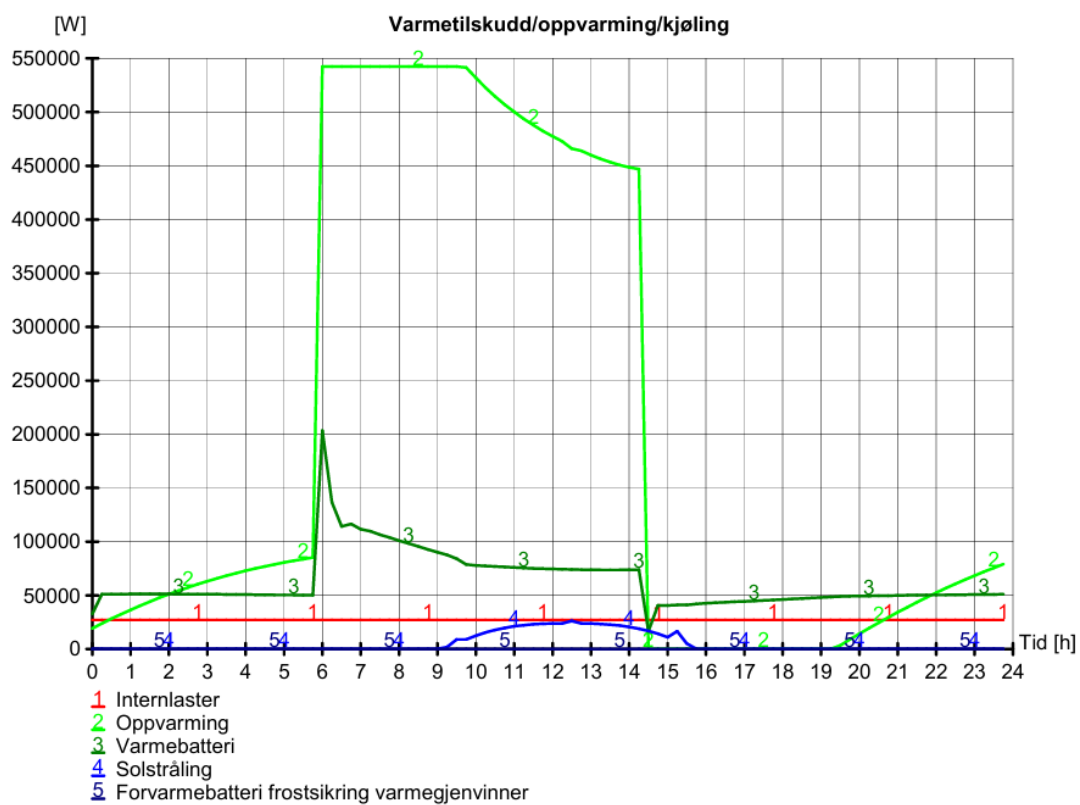
2. Vedlegg: Varmetilskudd under vintersimulering for Ensonebygg og skolebyggene
Ensone:



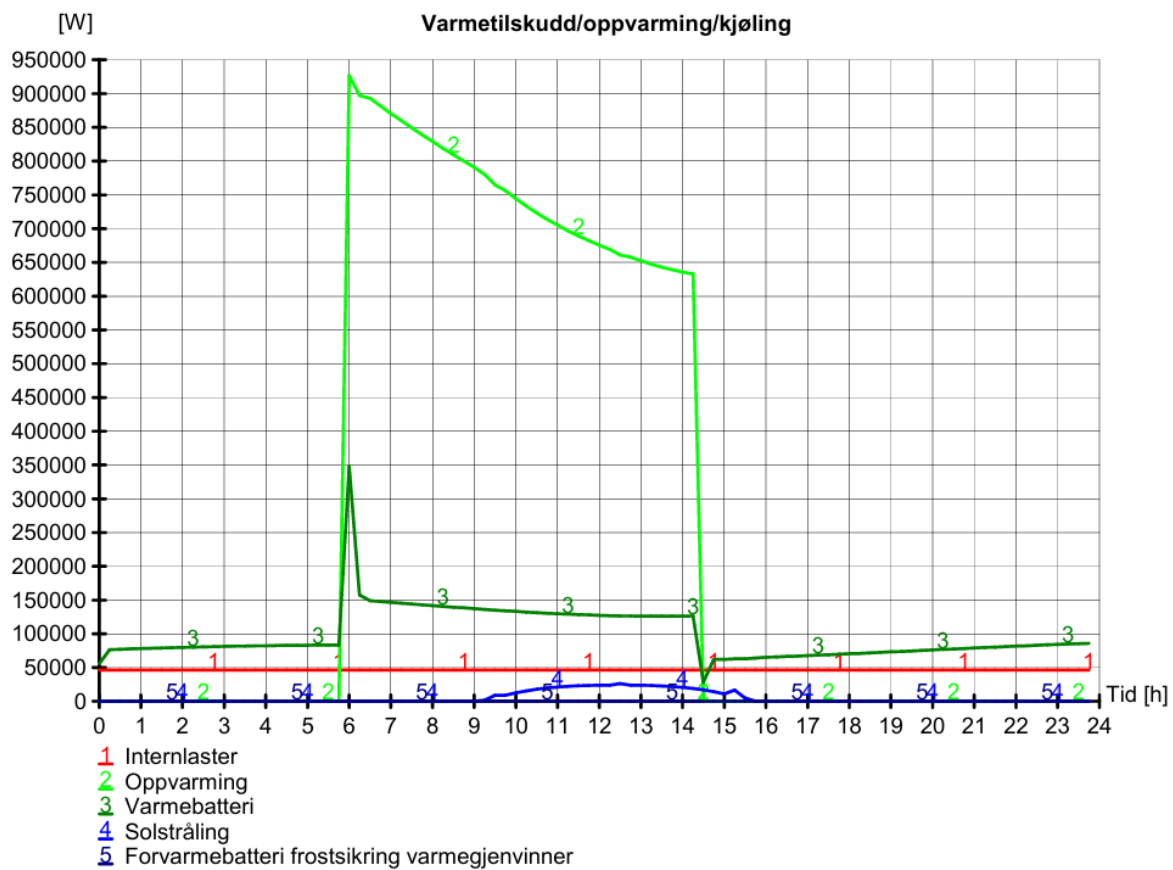
Vintersimuleringsutskrift for SIMRef Re VGS:



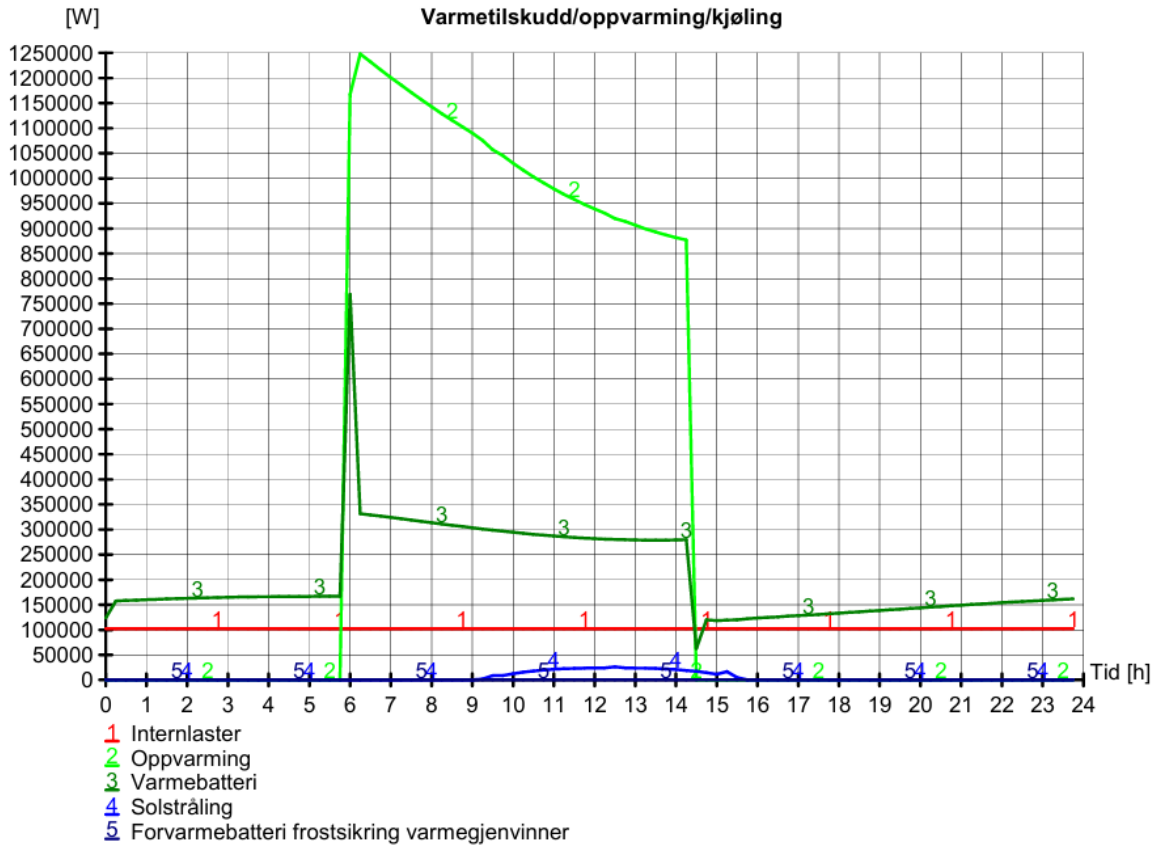
Vintersimuleringsutskrift for SIMRef Færder VGS:



Vintersimuleringsutskrift for SIMRef Greveskogen VGS:



Vintersimuleringsutskrift for SIMRef Th. Heyardahl VGS:



3. Vedlegg: Oversikt over utdata av simuleringen og grunnlaget for responstid og utkoblingsmuligheter for CASE-byggene.

Simulerte verdier for Færder VGS

Navn	Tinne	Gj. Temperatur	Gj. Effekt [W]	Øvre effekt	Nedre effekt	Estimert tid
Færder_SIMRef	22	22,0	502160,07	502	331	0
Færder_SIM1	21,5	21,6	455362,29	502	331	4
Færder_SIM2	21	21,1	401712,54	502	331	8
Færder_SIM3	20,5	20,7	366104,04	502	331	11
Færder_SIM4	20	20,3	330894,54	502	331	15
Fleksibilitetspotensial Færder VGS						
Fleksibilitetspotensial	1 284	kWh/min				
Effektdifferanse	171	kW				

Simulerte verdier for Th. Heyerdahl VGS

Navn	Tinne	Gj. Temperatur	Gj. Effekt [W]	Øvre effekt	Nedre effekt	Tid fra respons	Fordelte 15 minutter
Th_SIMRef	22	22,1	1001081,93	1001	478	0	0
Th_SIM1	21,5	21,5	838279,86	1001	478	0	34
Th_SIM2	21	21,0	675478,54	1001	478	0	68
Th_SIM3	20,5	20,5	576700,46	1001	478	15	101
Th_SIM4	20	20,0	477922,64	1001	478	15	135
Flexibilitetspotensial Th. Heyerdahl VGS							
Flexibilitetspotensial	35 313 kWh/min						
Effektdifferanse	523 kWh						

Simulerte verdier for Re VGS

Navn	Tinne	Gj. Temperatur	Gj. Effekt [W]	Øvre effekt	Nedre effekt	Estimert tid
Re_SIMRef	22	21,50	565381	565	372	0
Re_SIM1	21,5	21,24	518801	565	372	4
Re_SIM2	21	20,81	456973	565	372	8
Re_SIM3	20,5	20,39	414277	565	372	11
Re_SIM4	20	19,96	372126	565	372	15
Flexibilitetspotensial Re VGS						
Flexibilitetspotensial	1 449 kWh/min					
Effektdifferanse	193 kW					

Simulerte verdier for Greveskogen VGS

Navn	Tinne	Gj. Temperatur	Gj. Effekt [W]	Øvre effekt	Nedre effekt	Tid	Tid estimerst
Greveskogen_SIMRef	22	21,7	722923,54	723	434	0	0
Greveskogen_SIM1	21,5	21,2	636084,18	723	434	0	4
Greveskogen_SIM2	21	20,7	549472,29	723	434	0	8
Greveskogen_SIM3	20,5	20,3	491780,11	723	434	0	11
Greveskogen_SIM4	20	19,8	434087,68	723	434	0	15
Fleksibilitetspotensial Greveskogen VGS							
Fleksibilitetspotensial	2 166 kWh/min						
Effektdifferanse	289 kW						



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway