



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2024 30stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Energieffektivisering for bygg og fleksibilitet i det norske strømmettet:

En analyse av hvordan energieffektiviseringstiltak for bygg virker inn på potensialet for lastforskyvning

Energy efficiency for buildings and flexibility in the Norwegian power grid:
An analysis of how energy efficiency measures for buildings affect the potential for load shifting

Guro Hovelstad

Master i Fornybar Energi

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på min mastergrad i Fornybar Energi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Masteroppgaven har et omfang på 30 studiepoeng og er skrevet ved fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA).

Arbeidet med masteroppgaven har gitt meg dyp faglig forståelse innenfor temaet energieffektivisering av bygg og sammenhengen mellom energieffektivisering og fleksibilitet i strømmettet. I takt med det krevende arbeidet det siste halve året har jeg også fått bedre innsikt i hvordan jeg håndterer en slik situasjon både psykisk og fysisk. Jeg er veldig fornøyd med muligheten jeg her fikk til å jobbe videre med resultatene fra sommerjobben ved Institutt for Energiteknikk (IFE) i 2023 og vurdere mine funn derfra i en større sammenheng i min masteroppgave. Videre gleder jeg meg til å ta med meg denne kunnskapen inn i jobben som ny energikartlegger og miljørådgiver hos Bergen og Omegn Boligbyggerlag (BOB BBL) fra august 2024.

Jeg vil gjerne takke Thomas Martinsen for gode innspill, faglig kompetanse og veiledning i perioden rundt arbeidet med masteroppgaven. I tillegg vil jeg takke Pernille Seljom og resten av gjengen ved Energisystemanalyse (ESA) hos IFE for god hjelp og veiledning. Og ikke minst en takk til Marit Sølsnæs som har guidet og støttet meg skrive teknisk gjennom hele perioden.

Videre vil jeg også benytte anledningen til å takke mine medstudenter, venner og familie for nyttige diskusjoner, innspill, god støtte og motivasjon underveis, og pappa for lånet av både hytta og familiehunden – jeg tenker alltid best i litt frisk luft.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 10.06.2024


Guro Hovelstad

Sammendrag

Flere prognoser viser økt energi- og effektetterspørsel i Norge i fremtiden. Av årlig elektrisitetsforbruk går litt under en fjerdedel til oppvarming av bygg, og i enkelte timer kan effektbehovet til oppvarming utgjøre opp mot en tredjedel av det nasjonale effektbehovet. Det store behovet for oppvarming fordrer forandringer og bedre løsninger, som for eksempel energieffektivisering og lastforskyvning (peak-shaving).

Hovedfokuset i denne masteroppgaven er å se på korrelasjonen mellom fleksibilitet (lastforskyvning) og energieffektiviseringstiltak. Lastforskyvning (responstid, restitusjonstid, effektreduksjon og energibesparelse) blir beregnet matematisk for oppvarming i bygg før og etter innføring av energieffektiviseringstiltak. Energieffektiviseringspotensialet blir også beregnet matematisk gjennom en kode jeg utarbeidet for IFE sommeren 2023. Helt til slutt sammenlignes forskyvningspotensialene med energieffektiviseringspotensialet for å finne effekten av ulike tiltak. Analysen, som blir gjort for seks ulike tiltakspakker, retter seg mot spørsmålet om tiltak på bygningskroppen eller tiltak på ventilasjonen vil være best egnet for både energieffektivisering og lastforskyvning.

Resultatene viser at energieffektiviseringstiltakene har et teoretisk potensial på 78 % av dagens oppvarmingsetterspørsel. Beregningene av lastforskyvningen viser at den matematiske tilnærmingen her ikke er god nok alene til å gi presise resultater på tider og effekter, men differansene før og etter innføring av tiltak anses som gode nok til å besvare problemstillingene.

Konklusjonen blir derfor at energieffektiviseringstiltakene vil minske den strøm-effekten i systemet som kan skrus av ved responstidens start, mens andelen som kan være skrudd av lengre utover i responsperioden, vil øke. Videre viser sammenligningen at tiltak på bygningskroppen har størst potensial for energieffektivisering, mens tiltak på ventilasjonen har størst potensial for effektreduksjon. Altså er ikke tiltakene som er best for energieffektiviseringen nødvendigvis også best for forskyvningspotensialet (fleksibiliteten). Ut fra denne oppdagelsen vil jeg med denne masteroppgaven oppfordre politikerne til å utforme virkemidler som også fordrer effektreduserende tiltak, ikke bare energieffektiviserende tiltak.

Abstract

Several reports show increasing energy- and power demand in Norway in the future. Almost a quarter of the annual electricity consumption is used for building heating. At certain times however, the power demand for heating can account for up to a third of the national power requirement. The high demand for heating requires better solutions, including energy efficiency and peak-shaving.

The aim of this master thesis is to study the correlation between flexibility (load shifting) and energy efficiency measures. Load shifting is calculated mathematically based on response time, recovery time, power- and energy reduction. Load shifting for building heating before and after the introduction of energy efficiency measures is compared. The energy efficiency potential is also calculated mathematically through a code I designed for IFE (summer 2023). Lastly, the load shifting potential is compared with the energy efficiency potential to find the effect of introducing various measures. The analysis is organized by using different scenarios, including measures done both on the building shell and the ventilation. Subsequently the two types of measures are compared in regard to energy efficiency and load shifting.

The results show that the energy efficiency measures can save up to 78% of today's heating demand. Calculation of the load shifting shows that there is something wrong with the mathematical approach used in this thesis. The results show unrealistic numbers in regard to calculations of time periods and power reductions. However, differences before and after the introduction of measures are considered good enough to answer the research questions.

As a conclusion, the energy efficiency measures will reduce the electricity-power in the system that can be turned off at the start of the response time. However, the electricity-power that can be reduced later in the response period will increase. Furthermore, the comparison shows that measures done on the building shell have the greatest potential for energy efficiency, while measures on the ventilation have the greatest potential for effect reduction. In other words, the measures that are best for energy efficiency are not best for load shifting (flexibility). Based on the discoveries in this master thesis I want to encourage politicians to also promote power-reducing measures and not only energy-efficient measures.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag	ii
Abstract.....	iii
Forkortelser	vi
Symboloversikt.....	vi
1. Introduksjon	1
1.1. Avgrensninger.....	2
1.2. Oppgavens oppbygning.....	3
2. Energieffektivisering og fleksibilitet	4
2.1. Det norske energisystemet.....	4
2.2. Energieffektivisering av bygg i Norge.....	7
2.3. Fleksibilitet i energisystemet.....	9
3. Teori og data.....	18
3.1. Bygningsfysikk	18
3.2. Varmetilskudd	18
3.3. NVE og Multiconsults SIMIEN-beregninger	19
3.4. IFEs videre bearbeiding av energieffektiviseringsdata	20
3.5. Temperaturer.....	21
3.6. Etterspørselsprofiler	22
3.7. Oppvarmingsteknologi.....	25
3.8. Fleksibilitetsindikator for bygg	26
4. Metode.....	28
4.1. Uthenting av data	28
4.2. Beregne responstid.....	31
4.3. Beregne restitusjonstid.....	34
4.4. Forskyvningsperiode – effektreduksjon og energibesparelse	35
4.5. Definere tiltakspakker.....	36
4.6. Regne ut energieffektiviseringspotensialet for tiltakspakker.....	37
4.7. Aggregering fra ett bygg til hele Norge.....	39
4.8. Regne ut samlet reduksjonseffekt og tid	39
4.9. Sammenligning av tiltakspakker.....	40
5. Resultater	41
5.1. Uthenting av data	41

5.2.	<i>Respons- og restitusjonstid</i>	45
5.3.	<i>Forskyvningsperiode – effektreduksjon og energibesparelse</i>	49
5.4.	<i>Definere tiltakspakker</i>	51
5.5.	<i>Energieffektiviseringspotensial for tiltakspakker</i>	53
5.6.	<i>Dagens forskyvningspotensial i Norge</i>	57
5.7.	<i>Forskyvningspotensialet med tiltakspakker</i>	67
5.8.	<i>Sammenligning av tiltakspakker ved energieffektivisering og forskyvning</i>	73
6.	Diskusjon	82
6.1.	<i>Diskusjon av data og metode</i>	82
6.2.	<i>Resultater i sammenheng med tilgjengelig litteratur</i>	85
6.3.	<i>Ekstra forutsetninger, begrensninger og usikkerheter</i>	87
7.	Konklusjon og videre arbeid	88
	Referanser	90
	Vedlegg	95

Forkortelser

Forkortelse	Forklaring
BRA	Bruksareal
BUILDopt	Energisimuleringsmodell for bygg
DIBK	Direktoratet for byggkvalitet
Elhub	Den sentrale datahuben (nettverksknutepunktet) for måleverdier og markedsprosesser i det norske kraftmarkedet
FPI	Flexibility Performance Indicator
IEA	International Energy Agency
IFE	Institutt for Energiteknikk
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
NS 3031	En Norsk Standard for metode og data for energiytelse i bygg.
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
OED	Olje- og energidepartementet
SSB	Statisk sentralbyrå
TEK	Forskrift om tekniske krav til byggverk, kommer i form av TEK** markert med årstall kravet ble innført
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System, er en teknologisk og økonomisk optimaliseringsmodell for energisystemet også kaldt IFE-TIMES-Norway

Symboloversikt

Symbol	Enhet	Forklaring	Bruksområde
A_{BRA}	m^2	Bruksareal	Brukes til å beregne Q_{int}
A_i	m^2	Arealet for hver konstruksjonsdel «i»	Brukes til å beregne H_{tr}
C	$Wh/(m^3K)$	Varmekapasitet	Er en konstant på 0,33 som brukes til å beregne H_{inf} og H_v
c_{luft}	$J/(kg\Delta T)$	Massetetthet luft	Er en konstant på 1006 som brukes til å beregne Q_{gen}
ΔT	$^{\circ}C$	Temperaturrendring til inneluft i bygget	Brukes til å beregne Q_{gen}
e	konstant	Terrengskjermings-koeffisient	Er en konstant på 0,07 som brukes til å beregne n_{inf}
E	Wh	Energibalanse	Brukes til å dimensjonere energibalansen
H	W/K	Total varmeeffekt	Brukes til å beregne ϕ
H_{inf}	W/K	Infiltrasjonstap, varmetap grunnet luft som kommer inn i bygget	Brukes til å beregne H

Symboloversikt fortsettelse:

Symbol	Enhet	Forklaring	Bruksområde
H_{tr}	W/K	Transmisjonstap, varmetap gjennom konstruksjon	Brukes til å beregne H
H_v	W/K	Ventilasjonstap, varmetap gjennom ventilasjon	Brukes til å beregne H
m	kg	Luftens masse	Brukes til å beregne Q_{gen} . Beregnes av oppvarmet luftvolum [m ³] og luftens masse ved gitt temperatur [kg/(m ³ K)]
η_{opv}	%	Virkningsgrad til oppvarmingskilde	Brukes til å beregne P_{rst}
n_{50}	1/h	Lekkasjetall ved 50Pa	Brukes til å beregne n_{inf}
n_{inf}	1/h	Luftskifte for infiltrasjon	Brukes til å beregne H_{inf}
n_T	%	Varmegjenvinningsandelen til ventilasjonsanlegget	Brukes til å beregne H_v
ϕ	W	Varmestrømmen ut av et bygg	Brukes til å beregne effekt i respons og restitusjonstiden
P_{for}	W	Effekt for respons og restitusjonstid samlet	Brukes til å beregne E
P_{ref}	W	Effekt for referansealternativet	Brukes til å beregne E
P_{rsp}	W	Kraft eller effekt i responstid	Brukes til å beregne responstiden
P_{rst}	W	Kraft eller effekt i restitusjonstid	Brukes til å beregne restitusjonstiden
P_{start}	W	Effektreduksjon	Brukes til å dimensjonere effektreduksjon
Q_{bel}	W	Varmetilskuddet fra belysning	Brukes til å beregne Q_{int}
Q_{gen}	J	Andelen varme nødvendig for å øke temperaturen til et legeme med en grad	Brukes til å regne ut responstiden
Q_{int}	W	Varmetilskuddet fra elementer i bygget	Brukes til å beregne effekt i respons og restitusjonstid
Q_{opv}	W	Varmetilførsel fra gitt varmekilde	Brukes til å beregne P_{rst}
Q_{per}	W	Varmetilskuddet fra personer	Brukes til å beregne Q_{int}
Q_{uts}	W	Varmetilskuddet fra utstyr	Brukes til å beregne Q_{int}
θ_i	°C	Innetemperatur	Brukes til å beregne ϕ
θ_u	°C	Utetemperatur	Brukes til å beregne ϕ
t_{rsp}	s	Responstid	Brukes til å dimensjonere responstid
t_{rst}	s	Restitusjonstid	Brukes til å dimensjonere restitusjonstid
U_i	W/m ² K	U-verdi for hver konstruksjonsdel «i»	Brukes til å beregne H_{tr}
V	m ³	Volum til det oppvarmede luftrommet	Brukes til å beregne H_{inf} og H_v

1. Introduksjon

Etterspørselen etter både energi og effekt forventes å øke i Norge fremover. En rekke prognoser fra blant annet Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), Statnett, THEMA Consulting Group (THEMA) og Multiconsult viser et økende kraftforbruk (Energikommisjonen, 2023). Dette kommer blant annet av tiltak for å redusere klimagassutslippene som følger av De forente nasjoners (FN) bærekraftsmål, deriblant mål 11 «bærekraftige byer og lokalsamfunn» (FN, 2023). Energikommisjonens kartlegging i Norges offentlige utredninger NOU2023:3 viser at det er grunn til å forvente en vekst i kraftforbruket på 21-35 TWh innen 2030 (Energikommisjonen, 2023). Maksimalt effektbehov i Norge øker mer enn tilgjengelig produksjonseffekt øker. Den gjeldende forbruksrekorden i Norge fra 12. februar 2021 mellom klokken 09 og klokken 10 på over 25 GW forventes å øke med 2 til 6 GW fram mot 2030 (NVE, 2022). For å møte økningen i effektbehovet uten å bygge ut ny kraftproduksjon, finnes det blant annet to smarte løsninger: energieffektivisering og forbedring av fleksibiliteten (Arteconi, 2019).

Av det totale elektrisitetsforbruket i Norge på 138 TWh går litt under en fjerdedel, 30-33 TWh, til oppvarming av bygninger (Energikommisjonen, 2023). Likevel kan etterspørsel etter oppvarming av norske bygg i enkelte timer utgjøre så mye som nesten en tredjedel av det nasjonale effektbehovet; dette viser at det store behovet for oppvarming fordrer både energieffektivisering og lastforskyvning (peak-shaving) (NVE, 2020).

For å øke fleksibiliteten på forbrukssiden kan man forskyve forbruket til tider hvor etterspørselen er lavere, såkalt lastforskyvning (Arteconi, 2019). Forskyvningspotensialet er et uttrykk for hvor lenge en oppvarmingskilde kan være skrudd av før temperaturen i bygget synker til en nedre komfortgrense og må bli skrudd på igjen for å øke temperaturen. Jo større forskyvningspotensial, desto lengre kan energitilførselen være skrudd av – og desto mer fleksibelt vil bygget være. Ved å forskyve forbruket vekk fra forbrukstoppen kan altså effektbehovet i forbrukstoppen minskes.

I min masteroppgave «*Energieffektivisering for bygg og fleksibilitet i det norske strømnettet: En analyse av hvordan energieffektiviseringstiltak for bygg virker inn på potensialet for*

lastforskyvning» vil jeg studere potensialet knyttet til fleksibilitet (lastforskyvning) ved oppvarming av bygg som et bidrag til pågående forskning om hvordan vi kan møte den forventede veksten i både kraftforbruk og effektbehov i fremtiden. Forskyvningspotensialet beregnes for ulike typer bygg før og etter innføring av ulike energieffektiviseringstiltak. Videre tar jeg stilling til følgende problemstillinger:

I hvilken grad påvirker energieffektivisering av bygg fleksibiliteten i det norske energisystemet?

&

Er de effektiviseringstiltakene som er mest energisparende også de beste for forskyvningspotensialet (fleksibiliteten)?

1.1. Avgrensninger

Problemstillingene over er analysert med bakgrunn i en rekke avgrensninger:

- Det er kun sett på forskyvningspotensialet i tilknytning til oppvarming, her finnes det også mange andre fleksible løsninger som er med på å danne sluttbrukerfleksibiliteten.
- Grunnet lite eller ingen forskning på forskyvningspotensialet ved renovering av bygg består litteraturstudien, som brukes til sammenligning i diskusjonsdelen, av andre studier på fleksibilitet hvor sluttbrukerfleksibilitet er inkludert. Det antas da at energieffektivisering og forskyvning regnes som en del av sluttbrukerfleksibiliteten.
- Det er kun gjort matematiske beregninger og ingen simuleringer i denne masteroppgaven. Dersom tiden hadde strukket til, ville dette ha blitt prioritert.
- Beregningene i denne oppgaven tar utgangspunkt i bygg i Norge og kun når det gjelder potensial og endring i fleksibilitet innad i Norge.
- Beregningene tar ikke hensyn til spesifikk varmekapasitet i inventar i bygg.
- Resultatene vil presenteres på et detaljert nivå for alle leddene ved beregning av forskyvningspotensialet for bygg i dag. Ved innføring av tiltakspakkene blir kun hovedresultatene presentert.

1.2. Oppgavens oppbygning

Masteroppgavens struktur med hovedkapitler beskrives kort her:

Energieffektivisering og fleksibilitet

I dette kapitlet presenteres temaer som er relevante for valg av oppgave og litteratur og for arbeidet og vurderingen av resultatene. Målet med denne delen er å gi en forståelse av det norske energisystemet, energieffektivisering i bygg samt fleksibilitet i det norske energisystemet og hvordan fleksibiliteten henger sammen med energieffektivisering i bygg.

Teori og data

Her presenteres teorier og data som blir brukt videre i metodedelen og beregningene. Målet med denne delen er å gi en grunnleggende forståelse for de elementene som påvirker resultatene.

Metode

I denne delen av oppgaven presenteres alle beregninger og vurderinger som er gjort for å kunne besvare de to innledende problemstillingene. Målet med denne delen av oppgaven er å gi en detaljert beskrivelse av hvordan resultatene fremkommer, der forskyvningspotensialet, energibesparelsen ved ulike energieffektiviseringstiltak og nytt forskyvningspotensial ved innføring av energieffektiviseringstiltak blir beregnet.

Resultater

I dette kapitlet presenteres alle resultatene som er relevante for diskusjonsdelen. Resultatene vil bygges opp på samme måte og i samme rekkefølge som metoden, og presenteres deretter. Målet med denne delen av oppgaven er å gi en detaljert forståelse av hva de ulike beregningene og vurderingene har resultert i.

Diskusjon, Konklusjon og videre arbeid

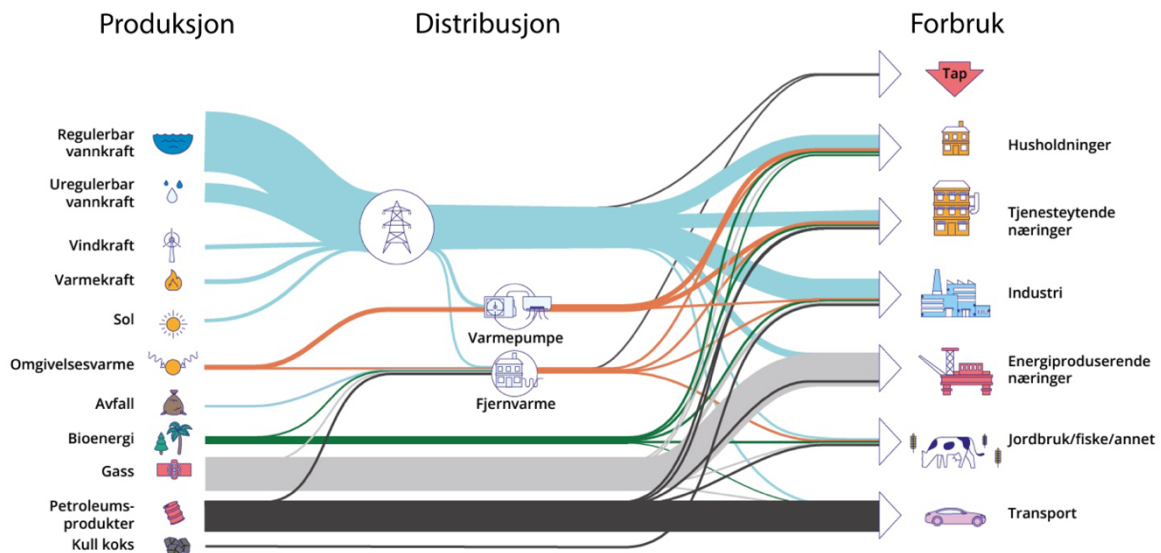
I de siste delene av masteroppgaven vil resultatene diskuteres, og på grunnlag av problemstillingene og noen ekstra kontrollspørsmål kan resultatet av drøftingen sammenfattes. Målet med denne delen av oppgaven er å trekke alle delene av oppgaven sammen for så å gi en helhetlig vurdering av resultatene.

2. Energieffektivisering og fleksibilitet

For å forstå omfanget av energieffektivisering og fleksibilitet inneholder dette kapittelet først en presentasjon av noen nøkkeltall i det norske energisystemet og videre en forklaring av hovedelementene. Deretter følger en gjennomgang av energieffektivisering i bygg og ulike kategoriseringer av tiltak som blir benyttet videre i masteroppgaven. Til slutt blir litteratur og sammenhenger tilknyttet fleksibilitet og energieffektivisering presentert for å utdype forståelsen av begrepet «fleksibilitet i bygg».

2.1. Det norske energisystemet

Energisystemet består i hovedsak av tre komponenter: produksjon, distribusjon og forbruk. Den norske energiflyten mellom disse tre komponentene for 2020 er illustrert i Figur 1.



Figur 1: Illustrasjon som viser energiflyten i det norske energisystemet, hvor bredden på linjene mellom komponentene viser den relative andelen energi som ble overført mellom hver aktør i 2020 (Klimautvalget, 2023)

2.1.1. Produksjon

Den totale produksjonen til det norske energiforbruket inkludert sokkelen var 326 TWh i 2021. Av dette var 138 TWh elektrisitet, 165 TWh fossil energi, 16 TWh bioenergi og 7 TWh fjernvarme (i hovedsak bioenergi) (Energikommisjonen, 2023). På produksjonssiden viser nyere data fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) at Norge i et normalår kan produsere opp mot 158 TWh elektrisk energi. Vannkraftproduksjonen bidrar med størst andel av samlet produksjon: Den midlere årsproduksjonen for vannkraft var på hele 137,3 TWh per 31.12.2023 (NVE, 2023c). Dernest bidrar vindkraft med en årlig middelproduksjon på 16,9

TWh (NVE, 2023a), og termisk kraft med en normalårsproduksjon på ca. 3,1 TWh (NVE, 2023d). Solkraft har en forventet årlig energiproduksjon på mer beskjedne 460 GWh, men utbyggingen av solkraft er for tiden i rask vekst (NVE, 2023b), og det forventes at solkraft vil bidra med langt mer energi i tiden fremover.

På produksjonssiden har vannkraftproduksjon æren av å bidra mest til fleksibiliteten i det norske energisystemet i dag. Magasinkraftverkene, som står for hele 77 % av den totale vannkraftproduksjonen, kan til en viss grad regulere produksjonen. Dette gir rom for høy grad av fleksibilitet (NVE, 2023e). Utover magasinkraftverkene bidrar ellers småkraftverk, elvekraftverk og andre uregulerbare kraftverk til resten av vannkraftproduksjonen, men da i liten grad til fleksibilitet i det norske energisystemet. Utenom fleksibiliteten fra magasinkraftverkene blir det norske strømmettet også mer fleksibelt på grunn av koblingen med det europeiske strømmettet via blant annet England og Tyskland. I 2021 var effekten ved maks netto eksport fra Norge til Europa på 7,5 GW og maks netto import fra Europa til Norge på 6,0 GW (Statnett, 2022). Som et godt bilde på betydningen av energiforbindelsen mellom Norge og kontinentet utgjør nevnte maksimale import på 6,0 GW omtrent 25 % av den historiske forbrukstoppen på 25,2 GW fra 12. februar 2021 (Statnett, 2022).

2.1.2. Distribusjon

Distribusjonsdelen i energisystemet kan deles inn i tre typer nett: transmisjonsnett, regionalnett og distribusjonsnett (Energidepartementet, 2024b). Transmisjonsnett binder sammen kraftprodusenter med store forbrukere som petroleumsvirksomhet og stor industri over hele landet, i tillegg til at det omfatter utenlandsforbindelsene. Transmisjonsnettet har et høyt spenningsnivå, vanligvis på rundt 300-420 kilo Volt (kV) (Energidepartementet, 2024b). Regionalnettet binder sammen transmisjonsnettet og distribusjonsnettet, og er koblet til noe storindustri. Spenningsnivået i regionalnettet varierer mellom 33 kV til 132 kV (Energidepartementet, 2024b). Distribusjonsnettet omfatter det lokale kraftnettet, og er koblet til alminnelig forbruk i husholdninger, tjenesteyting og småindustri. Spenningsnivået i distribusjonsnettet fordeles mellom høyspent og lavspenning. Høyspent har en spenning mellom 1 kV og 22 kV og lavspenning har en spenning normalt mellom 230 V og 400 V (Energidepartementet, 2024b). I distribusjonsdelen av energisystemet finner vi også fjernvarme som bidrar med fleksibilitet til energisystemet.

2.1.3. Forbruk

På forbrukssiden fordeles det elektriske forbruket med omtrent 50 % til bygninger og 40 % til industrien. Den siste andelen på 10 % fordeles på blant annet jordbruk, bygg- og anleggsbransjen, energiproduserende sektorer og transport (Energikommisjonen, 2023). På forbruks- og sluttbrukersiden finnes det fleksibilitet i form av teknologiske løsninger, som for eksempel tidsstyrte termostater på varmtvannstanker (Sartori, 2023) og fleksibel elbillading (Seljom, 2023).

2.1.4. Energisystemet og kraftmarkedet

Det norske energisystemet styres i stor grad av kraftmarkedet. Dette igjen blir styrt av kraftbørser. Prisene på børsene blir bestemt for hvert enkelt av de fem spotprisområdene (NO-områder) som finnes i Norge (Statnett, 2021).

Inndelingen i spotprisområdene kommer av begrenset overføringskapasitet mellom landsdelene og et effektbehov i samsvar med klimavariasjon og magasinkapasitet i de ulike landsdelene, se Figur 2 (Energidepartementet, 2024a). Ulike priser i ulike prisområder fungerer også som indikasjon på hvor flaskehalsene i strømmettet oppstår, og dette gir videre en indikasjon på hvordan energisystemet kan forbedres (Statnett, 2021).

De fem spotprisområdene er:

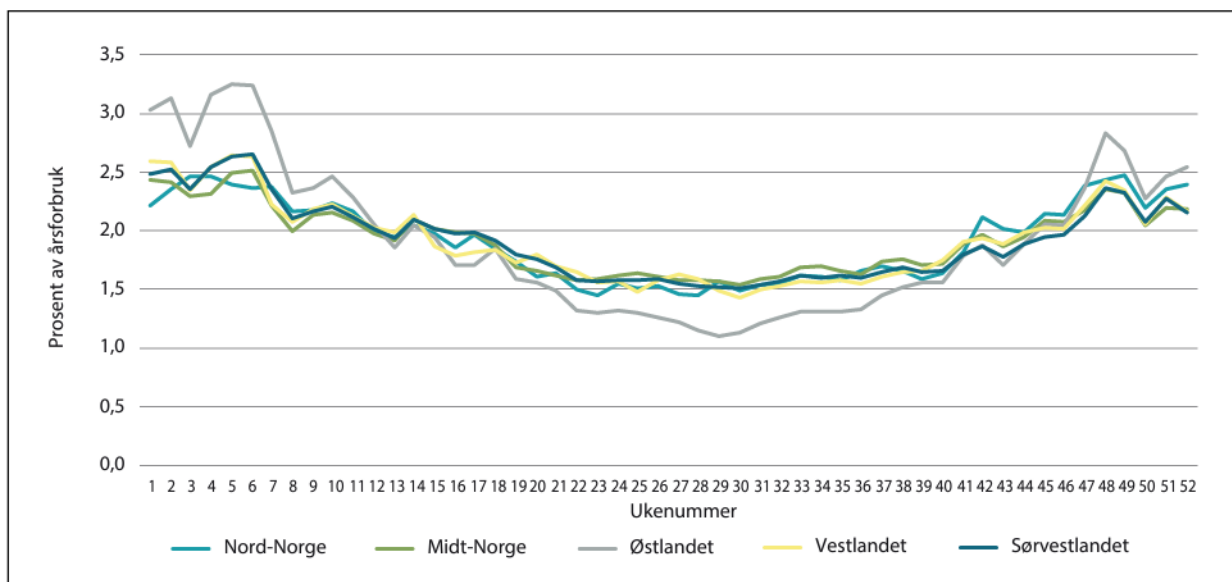
- NO1: Østlandet (Oslo)
- NO2: Sørlandet (Kristiansand)
- NO3: Midt-Norge (Trondheim)
- NO4: Nord-Norge (Tromsø)
- NO5: Vestlandet (Bergen)



Figur 2: Kart over de ulike spotprisområdene i Norge (Statnett, 2021)

2.2. Energieffektivisering av bygg i Norge

Energibruken i boliger i Norge står for rundt 48 TWh per år, og to tredjedeler av dette (32 TWh) går til oppvarming. Oppvarming ved bruk av elektrisitet utgjør 22-24 TWh, bioenergi (ved) utgjør 5-6 TWh og fjernvarme 1-2 TWh. Energibruken i tjenesteytende sektorer står for 40 TWh, hvor rundt 16 TWh (40 %) går til oppvarming. I yrkesbyggene utgjør oppvarming fra elektrisitet 8-9 TWh og fjernvarme 5 TWh, litt under 2 TWh er bioenergi (Energikommisjonen, 2023). Altså er en stor andel av oppvarmingen i Norge basert på elektrisitet, og dette tilsier at elektrisitetsetterspørselen er sårbar for temperatursvingningene gjennom året. I tillegg ser man at områder med mer boliger enn industri, påvirkes mer av temperatur da boliger bruker en større andel av totalen til oppvarming. Dette vil gi større svingninger i elektrisitetsprisen i områder med mye boliger. Det varierende forbruket gjennom året i forskjellige spotprisområder er illustrert i Figur 3.



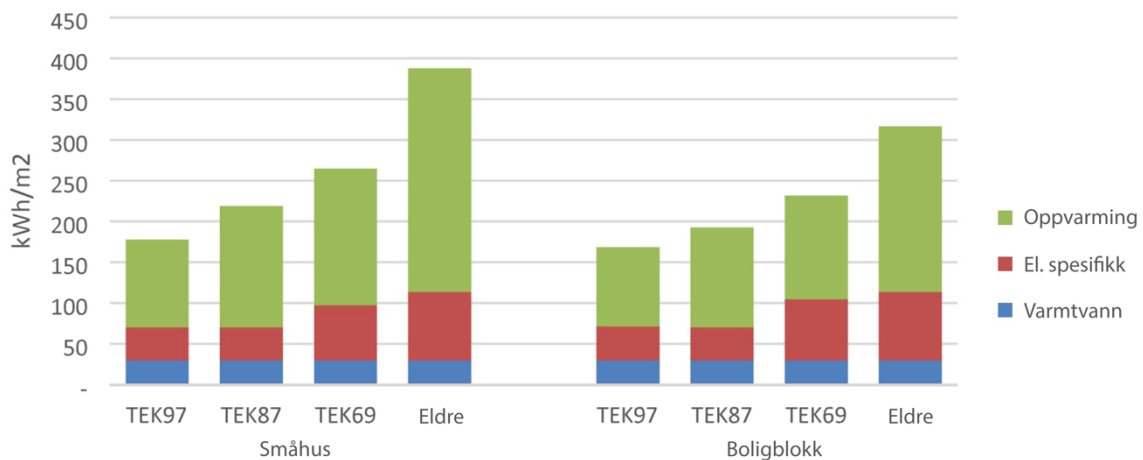
Figur 3: Prosentvis ukesfordeling av kraftforbruk 2021 for de fem spotprisområdene (Nordpool) (Energikommisjonen, 2023)

Dersom man energieffektiviserer boliger, vil elektrisitetsbehovet til oppvarming av bygg reduseres, følgelig også sårbarheten overfor svingningene i spotprisen.

På oppdrag fra NVE utførte Multiconsult i 2021 beregninger for 13 energieffektiviseringstiltak i bygg (Bøhn, 2021). Disse tiltakene viser et totalt teknisk effektiviseringspotensial i norske bygg på 37 TWh. Dette består av 43 % av den totale energietterspørsel i småhus (single-family houses), 36 % av den totale etterspørsel i boligblokker (multi-family houses) og 53 % av den

totale etterspørsel i yrkesbygg (non-residential buildings) (Rosenberg, 2023). Multiconsults beregninger er videre fordelt på byggstandard (TEK) og spotprisområder (NO-områder).

Figur 4 viser energietterspørselen i eneboliger og flermannsboliger, hvor Byggteknisk forskrift av 1997 (TEK97) representerer bygg som er bygget med standarden satt etter 1997, mens de som er markert som eldre, representerer bygg som er bygget med lavere standard enn standarden utgitt i 1969. Her ser man en tydelig sammenheng mellom alder på bygget og størrelsen på energietterspørselen (kWh/m²).



Figur 4: Energieterspørsel etter bygningsstandard for eneboliger og flermannsboliger i NO1 (kWh/m²), oversatt til norsk fra (Rosenberg, 2023). TEK69 er vurdert til å være den representative standarden samlet for alle norske bygg, da hele 32 % av byggene har standarden TEK69 (Bøhn, 2021).

De 13 tiltakene som blir vektlagt i studien, er:

1. Etterisolering av vegger
2. Etterisolering av tak
3. Etterisolering av gulv
4. Nye vinduer og dører
5. Redusert innendørstemperatur på netter og i helger
6. Forbedret varmegjenvinning ventilasjon
7. Forbedret vifteeffektivitet (SFP)
8. Behovsstyrt ventilasjon (DCV)
9. Styringsystem belysning
10. Energieffektivt belysningsutstyr
11. Automatisk solskjerming
12. Energioppfølgingsystem (EOS)
13. SD-anlegg

Virkemidler for energieffektivisering av bygg

I NVEs svar til Energikommisjonen i 2023 finnes en oversikt over og vurdering av eksisterende virkemidler og potensialstudier for energieffektivisering av bygg (NVE, 2023f) basert på NVE og Direktoratet for byggkvalitets (DIBK) rapport, *Underlag for langsiktig strategi for energieffektivisering ved renovering av bygninger* (2022), og Norges Boligbyggerlags Landsforbunds (NBBL) notat, *Energieffektivisering i bygg* (2022). De juridiske, økonomiske eller pedagogiske virkemidlene det kan være snakk om her, er offentlige og bare én av flere faktorer (NVE, 2023f). Fire av virkemidlene har hatt særlig betydning for eksisterende bygninger de siste årene, disse er:

- Økodesign, gjennom minimumskrav til apparater og komponenter
- Krav til tiltak på eksisterende bygg (pbl § 31-2)
- Forbud mot fyring med mineralolje, som har gitt byggeiere behov for å vurdere sin oppvarmingsløsning
- Enovas ulike støtteordninger

Videre pekes det på noen forutsetninger som vil være viktige for den videre bruken av virkemidler; slike som at lønnsomhet er viktig for yrkesbygg, men ikke alltid en tilstrekkelig betingelse for gjennomføring av ulike tiltak. For boliger er differansen mellom samfunnsøkonomisk lønnsomhet og praktisk gjennomføring enda større da ønsket om «noe synlig», som nytt kjøkken, ofte blir prioritert først. Derfor bør virkemidlene i fremtiden kategoriseres etter bygningstype (NVE & DIBK, 2022). Dette ble det også tatt hensyn til ved utvelgelsen av relevante tiltak per bygningskategori i Multiconsults beregninger for NVE (Bøhn, 2021), og likeledes ved utvelgelsen av tiltakspakkene som benyttes i denne masteroppgaven.

2.3. Fleksibilitet i energisystemet

Fleksibilitet kan defineres på mange måter. For eksempel definerer International Energy Agency (IEA) fleksibilitet i en bygning som “*evnen til å styre etterspørselen og produksjonen i henhold til lokale klimaforhold, brukerbehov og nettkrav*” (IEA, 2019). I denne delen av oppgaven vil jeg studere behovet for fleksibilitet samt løsninger for å imøtekomme fleksibilitetsbehovet, og videre vil jeg presentere relevant teori, litteratur og forskningsmateriale som skal brukes videre i diskusjonsdelen i masteroppgaven.

2.3.1. Dagens behov for fleksibilitet

Strøm er ekstrem ferskvare fordi den må lages i samme sekund som den blir brukt (RME, 2024). På grunn av dette er det viktig at kraftsystemet til enhver tid er i balanse. For å få til denne balansen trengs det fleksibilitet i alle de tre komponentene av energisystemet; produksjon, distribusjon og forbruk. Som nevnt i kap.2.1.1 står magasinkraftverkene våre og kraftforbindelsen mellom Norge og kontinentet for en stor andel av denne fleksibiliteten. Men nå som det grønne skiftet krever større mengder fornybar energi (og samtidig en nedtoning av fossil energi), vil vi få en kraftsituasjon som blir mer væravhengig og derved mindre stabilt (RME, 2024).

Fleksibilitet på forbrukssiden kalles sluttbrukerfleksibilitet. Sluttbrukerfleksibilitet styres i stor grad av forbrukernes interesser, og som et forsøk på å styre interessene til fordel for effektbehovet, er det i Norge innført effekttariffer og spotprisvariasjon.

Effekttariffer og spotprisvariasjon

En mulig løsning på fleksibilitetsbehovet finnes nemlig i sluttbrukerfleksibilitet og strømregningen til sluttbrukerne. 1. juli 2022 ble det innført en ny effektbasert modell for beregning av nettleie i distribusjonsnett (OED, 2022). Modellen innebærer at energiledet i nettselskapets inntekter skal utgjøre minimum 50 %, resten kan styres av tariffene.

Endringen kom for å motivere abonnemeter under 100 MWh per år, altså husholdninger, til å fordele strømforbruket jevnere utover døgnet (Thorvaldsen, 2024). Nettselskapene velger selv kostnadene tilknyttet effekttariffen, men grunnmodellen er ganske lik. Effekttariffen beregnes med bakgrunn i målinger for gjennomsnittseffekt per time fra el-hub, og deretter gjennomsnittet av de tre dagene med høyest effektuttak i en måned. Tabell 1 viser effekttrappen og effektprisen gitt av Fjordkraft for nettselskapet Glitre Nett AS for april 2024.

Tabell 1: Effekttrappen og effektprisen gitt av Fjordkraft for nettselskapet Glitre Nett AS for april 2024 (Sølsnæs, 2024)

Effektuttak	Effektpris
0 – 2 kW	155 kr/mnd
2 – 5 kW	195 kr/mnd
5 – 10 kW	335 kr/mnd
10 – 15 kW	690 kr/mnd
15 – 20 kW	900 kr/mnd
20 – 25 kW	1 125 kr/mnd
25 – 50 kW	1 745 kr/mnd
50 – 75 kWh	2 760 kr/mnd
75 – 100 kWh	3 680 kr/mnd
Over 100 kWh	5 980 kr/mnd

Denne effekttariffen kommer altså i tillegg til døgnvariasjon i spotpris (energipris) – spotprisen varierer med typisk to topper i døgnet, én topp på morgenen og én topp på ettermiddagen.

Ved toppene er etterspørselen etter effekt størst, og derved er også strømprisen høyest da (Dokka, 2023). Minker etterspørselen innenfor disse toppene, minker også effekttoppene; og hvis denne reduksjonen er nok til å senke effektuttaket i forhold til effekttrappen, minker også strømregningen som et resultat av dette.

2.3.2. Løsninger på fleksibilitetsbehovet

Der magasinkraftverk og utenlandskabler fra produksjonshold bidrar til en vesentlig andel av fleksibiliteten i det norske energisystemet, vil lastforskyvning eller lastavlastning (peak-shaving) være noen av løsningene på forbrukssiden (Dokka, 2023). Lastforskyvning dreier seg om at belastningen på strømnettet blir redusert når man slår av utstyr med høyt energiforbruk i timer med høyt effektbehov, for så å sette de på igjen når effektbehovet er mindre. Dette kan forhindre forbrukstopper, altså gjøre etterspørselskurven flatere. Lastavlastning er en annen type peak-shaving hvor løsningen er å legge til en lokal energikilde for å kompensere for topplastbelastningen. Dette kan for eksempel være å installere solceller og batterier og bruke strømmen fra batteriene når effektbehovet er høyt (Egge, 2023). Vi finner også en type lastavlastning med fjernvarme, hvor anleggene benytter materiale, gass eller væske som utvikler varme ved forbrenning og kan brukes som alternativ energikilde til oppvarming (Celsio, 2022).

2.3.3. Relevant arbeid tilknyttet fremtidens fleksibilitet

Dette delkapittelet omhandler to rapporter vedrørende Norges fleksibilitetsutfordringer frem mot 2030 og 2050.

Har vi nok fleksibilitet frem mot 2050?

«Dersom det blir et like kaldt og tørt år i 2030 som i 2010, vil vi ha et ressursunderskudd på 35TWh». I Olje- og energidepartementets (OED) prosjekt «Tilbud og etterspørsel etter fleksibilitet», ledet av THEMA og Multiconsult, diskuteres spørsmålet «Har vi fleksibilitet nok til å balansere kraftsystemet frem mot 2050?» (THEMA, 2022). Spørsmålet besvares ved blant annet dette eksempelet; dersom 2030 blir et like kaldt og tørt år som 2010, vil vi ha et ressursunderskudd på 35 TWh. Hvis flerårsmagasinerne er fylt opp, kan disse muligens dekke 24 TWh av det nevnte ressursunderskuddet, og resten kan eventuelt importeres fra nabolandene. Men nabolandene skal i det grønne skiftet utfase mye av den regulerbare

kraften (kull og gass) og erstatte denne med uregulerbar kraft (vind og sol). Dette gjør at energitilgangen gjennom vinteren og i «vårknipa» kan bli ekstra sårbar og kostbar, da etterspørselen etter energi er stor på den tiden av året. For den tiden det ikke vil være tilgang på vindkraft i Norge samtidig som det heller ikke vil bli importert kraft, er det beregnet et økt effektbehov på 1 000-5 000 MW i 2030. Behovet for nye fleksible løsninger er derfor stort, og rapporten trekker frem noen mulige måter vi kan håndtere effektutfordringene på. Flexibilitet eller balanse i energisystemet blir videre kategorisert som enten frekvensbalanse, energibalanse eller effektbalanse.

Frekvensbalanse oppnås ved å holde frekvensen i strømmettet stabil på sekund- eller minuttbasis. For å løse kortvarige effektutfordringer finnes det mange løsninger både på produksjonssiden og forbruksiden, i tillegg til lagring. Mulige kilder til å håndtere kortvarige effektutfordringer som vil bidra til frekvensbalanse og som trekkes frem i rapporten, består blant annet av: oppgradering av eksisterende vannkraft, forbrukerflexibilitet ved hjelp av batterier eller termisk lagring, og flexibilitet i bygg ved hjelp av smarthusteknologi. Av disse trekkes fleksible laster i bygg frem som det tiltaket med størst potensial (usikkert, men med et mulig volum på 4 000 MW i 2050) og som det mest gjennomførlige med tanke på tid og lønnsomhet (THEMA, 2022).

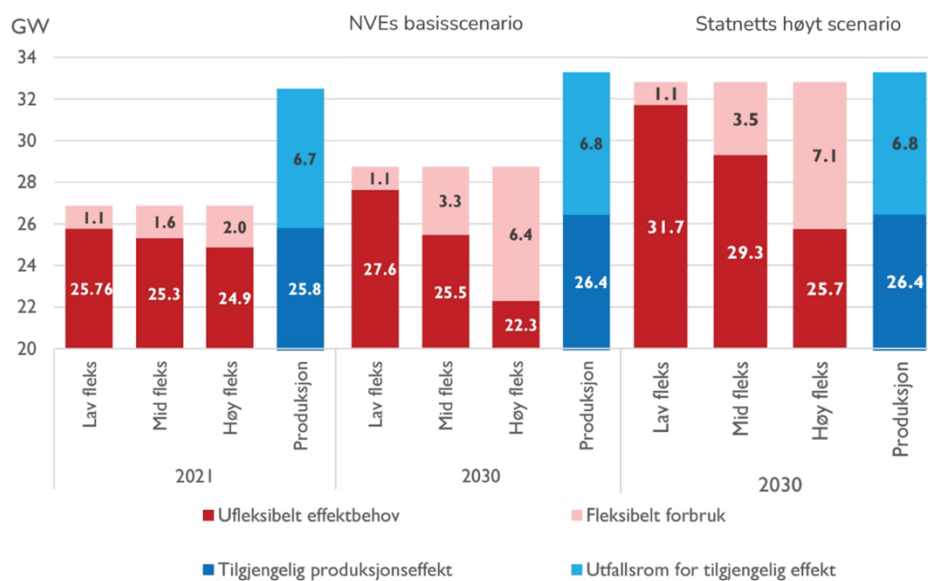
Energibalanse vil si at den totale energiproduksjonen samsvarer med etterspørselen år for år. I rapporten blir energieffektivisering av bygg, ny/utvidet vannkraft samt solceller trukket frem som de mest lønnsomme og gjennomførlige tiltakene, i tillegg til at disse kan monne mest når det gjelder å opprettholde energibalansen frem til 2030. De oppgir et potensial for økt produksjon på 18 TWh og at energieffektivisering av bygg kan gi 13 TWh (THEMA, 2022). Installering av alternative energikilder trekkes også frem som et viktig tiltak for energibalanse, og da spesielt fleksible løsninger som kjeler som bruker olje, gass eller biobrensel til oppvarming. Så hvis det også her blir installert alternative oppvarmingskilder, vil flexibiliteten øke.

Effektbalanse oppnås dersom produksjonskapasiteten strekker til når etterspørselen er størst, altså under toppplasttimene. Effektbalansen blir sterkt påvirket av både frekvensbalansen og energibalansen. Det vil si at også her er potensialet for økt produksjon av vannkraft og

solenergi (solceller) på 18 TWh. Energieffektiviseringen av bygg på 13 TWh og forbrukerfleksibilitet ved hjelp av batterier og termisk lagring samt smarthusteknologi er spesielt viktig for å opprettholde balansen eller fleksibiliteten frem mot 2050 (THEMA, 2022).

Norsk og nordisk effektbalanse frem mot 2030

Den nasjonale effektbalansen antas også i NVEs rapport «Norsk og nordisk effektbalanse frem mot 2030» å bli strammere fremover. Dette er illustrert i Figur 5 hvor man har beholdt dagens fleksibilitetsnivå for eksisterende forbruk og lite fleksibilitet i nytt forbruk (lav fleks). Figuren viser at det kan oppstå situasjoner hvor importbehovet vil komme oppmot 1,2 GW i «NVEs basisscenario» og 5,3 GW i «Statnetts høyt scenario». Hvordan denne nasjonale effektbalansen vil se ut i 2030, vil derfor avhenge sterkt av fleksibiliteten i både eksisterende og nytt forbruk (NVE, 2022).



Figur 5: Effektbalanse for 2021 og 2030 for to ulike scenarioer med ulike antagelser for fleksibelt forbruk. Merk at vertikal akse starter på 20 GW for å gi bedre lesbarhet (NVE, 2022)

2.3.4. Relevant arbeid tilknyttet fleksibilitet på forbrukssiden

Dette delkapittelet tar for seg rapporter og prosjekter vedrørende dagens fleksibilitet på forbrukssiden av energisystemet og mulige løsninger for forbedring.

Verdien av sluttbrukerfleksibilitet i Norges fremtidige energisystem

«Sluttbrukerfleksibilitet kan bidra til å kutte effekttoppene på aggregert nivå kan med hele 16-20 %» er et av resultatene de kom frem til i Flexbuild prosjektet. FlexBuild var et

prosjektsamarbeid mellom blant annet SINTEF, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) og IFE som gjaldt: «The value of end-use flexibility in the future Norwegian energy system» (Sartori, 2023). For å kunne verdsette sluttbrukerfleksibiliteten har de brukt en kombinasjon av modellene: BUILDopt for enkeltbyggets energibruk, IFE-TIMES-Norway for det norske energisystemet, EMPIRE for det europeiske kraftmarkedet og EMPS for det norske vannkraftsystemet. I tillegg ble beregningene gjort for fire forskjellige fremtidsscenarioer. Modellene fokuserer på ulike områder, og de ga derfor ulike resultater i prosjektet:

European Model for Power system Investments with (high shares of) Renewable Energy (EMPIRE) ble utvidet til å inkludere etterspørselsrespons fra husholdningsapparater, og man kunne derved vurdere boligens spesifikke elektriske last. Dette ga resultater på potensiell kostnadsreduksjon på omtrent 1 % fra 2020 til 2055 (Sartori, 2023).

BUILDopt ble utviklet til å modellere fleksibiliteten i sluttbruk i bygninger. Modellen inkluderer fleksibilitetskilder som styring av innendørstemperatur, termisk lagring samt lading av elektriske kjøretøy. Resultatene viste en betydelig reduksjon av topplast ved aktivering av fleksibilitet – på enkeltbyggnivå på hele 20-50 % og på aggregert nivå rundt 16-20 % (Sartori, 2023). Valget av strømtariff viste seg å være en kritisk faktor; tariffen var mest effektiv når den inneholdt effektledd. Videre ble modellen brukt til å beregne virkningen av investeringer i oppvarmingsteknologier, solceller og batterier. Resultatene viste at aktiveringen av fleksibiliteten kan eliminere behovet for investeringer i stasjonære batterisystemer, samtidig som den vil øke adopsjon av solceller spesielt i småhus (Seljom, 2023).

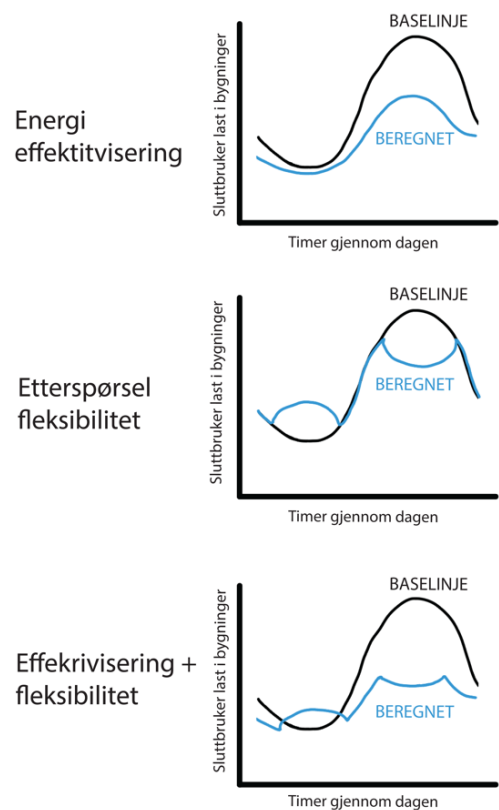
The Integrated MARKAL-EFOM System (IFE-TIMES-Norway) ble brukt til å sette sammen EMPIRE og BUILDopt for å se sammenhengen mellom det norske og europeiske kraftsystemet og bygninger. Resultatene viser at fleksibilitet bidrar til å øke lokal energiproduksjon, spesielt fra solceller, som igjen reduserer behovet for nettutvidelse fordi produksjonen gjerne blir brukt før den blir sendt ut på nettet. Fortjenesten fra intensjonal strømhandel økes også, og sluttbrukerfleksibiliteten er med på å redusere behovet for både hydrogen og termisk lagring (Sartori, 2023).

EMPS- modellen ga simuleringene en bedre innsikt i fleksibilitetsendringene i forhold til det norske vannkraftsystemet og viste mindre påvirkning fra sluttbrukerfleksibiliteten på vannkraftproduksjon. Produksjonsdelen vil forbli omtrent den samme med eller uten økt sluttbrukerfleksibilitet, og små reduksjoner i strømpris ble funnet i 2050. I tillegg viste modellen også redusert inntekt for både vann- og vindkraftprodusenter, spesielt i 2030 (Sartori, 2023).

Totalt sett viste modelleringene at sluttbrukerfleksibilitet kan spille en rolle i fremtidens energisystem, og at effekttoppene på aggregert nivå kan kuttes med hele 16-20 %. Men dette påvirkes i stor grad av fremtidens strømtariffer og sluttbrukerens rolle i å øke solkraftproduksjonen (Sartori, 2023) (Seljom, 2023).

Samspillet mellom fleksibilitet og energieffektivisering

«Energieffektive bygninger har en begrenset lastforskygning». Var en av resultatene i en studie av Langevin et al. som undersøker energieffektive bygninger i USA og fleksibilitet som en ressurs for strømnettet (Langevin, 2021). Her er det gjort beregninger på tekniske potensialer for energieffektivisering av bygninger og fleksibilitet for 2030 og 2050. I Figur 6 er beregningene illustrert sammen med en baselinje som illustrerer forbruket uten energieffektivisering og fleksibilitet. USA har et årlig strømforbruk på omtrent 4 000 TWh i dag, og rapporten viser at energieffektivisering og fleksibilitet kan minske forbruket med 742 TWh innen 2030 og 800 TWh innen 2050. Dessuten vises det til at energieffektiviseringstiltak kan gi en effektreduksjon for daglig topplast på 181 GW innen 2030 og 208 GW innen 2050. Men rapporten belyser også at implementeringen av energi-effektiviseringstiltak sammen med



Figur 6: Viser modellinput over etterspørsel på bygningsnivå med beregninger for energieffektiviseringer, fleksibilitet og begge samlet (oversatt fra (Langevin, 2021))

fleksibilitetstiltak påvirker etterspørselskurven. Dette fører til en begrenset lastforskyvning i energieffektive bygninger (Langevin, 2021).

Annen forskning på energieffektivisering av bygninger støtter oppunder Langevin om at energieffektive løsninger, som for eksempel renovering av bygninger, sammen med fleksibilitetstiltak, kan redusere både det totale strømforbruket og toppbelastningen (Tang, 2021). Utover dette kan fleksibilitet i bygningsenergi, som inkluderer lastforskyvning og lastavlastning, også utnyttes for å redusere strømkostnader (Li, 2021).

Andre fleksible løsninger kan for eksempel være lagringssystemer med batterier, varmtvannstanker eller toveislading av elbiler. Sistnevnte er forsket på av professorer ved NMBU, og deres resultater viser at toveislading av elbiler kan redusere svingningene i strømprisen og minske toppene i energiforbruket, med andre ord gjøre systemet mer fleksibelt (Nagel, 2024).

2.3.5. Relevant arbeid tilknyttet beregning av lastforskyvning

Som tidligere forklart i kap. 2.3.2., er lastforskyvning (peak-shaving) en fleksibel løsning. For å beregne fleksibilitetspåvirkningen fra ulike energieffektiviseringstiltak er denne masteroppgaven rettet mot lastforskyvning, og vil beregne lastforskyvningspotensial ved bygningsstandarder og forbedringer ved innføring av tiltakspakker. Denne beregningen av lastforskyvning (peak-shaving) har blitt gjort av flere forskningsmiljøer tidligere.

For å beregne fleksibilitet finnes det flere fremgangsmåter, i rapporten «Investigation of design strategies and quantification of energy flexibility in buildings: A case-study in southern Italy» belyses flere av de som blir brukt i dag (Marotta, 2021). *Fleksibilitetsfaktorer (FF)* adresseres som de mest vanlige beregningene på forbrukssiden. Fleksibilitetsfaktorene ser på byggets etterspørsel typisk i perioder med høy og lav last (for eksempel høye og lave kostnadsperioder gjennom døgnet). FF er en variabel på skalaen [- 1: + 1], hvor +1 tilsier at all energietterspørselen kommer i lav-etterspørsels-perioden, og -1 tilsvarer at all etterspørsel kommer i høy-etterspørselsperioden. Derfor representerer høyere faktorer mer energifleksibilitet. Mange bruker FF til å indikere forflytningen av last mot lav-etterspørselsperiode, men FF er ikke direkte overførbart da den forklarer hvordan lasten

fordeler seg i forhold til lasttoppene, og den gir heller ingen informasjon om hvor mye last som kan flyttes (Marotta, 2021). FF er gitt av formelen:

$$FF = \frac{Andel_{lav\ last} - Andel_{høy\ last}}{Andel_{lav\ last} + Andel_{høy\ last}}$$

Videre blir det beskrevet beregninger som *Mulighet for kraftforskyvning [kW]* (Marotta, 2021). Denne beregnes som forskjellen mellom oppvarmingseffekt i aggregert scenario og referansescenarioet. Denne forskjellen blir brukt videre til å beregne varmeeffekt under oppladningsperiode samt utladningsperiode, og beregne forbruk gjennom etterspørsel i utladningsperioden og andeler av lagringskapasitet som kan brukes ved forskyvning. Beregningene blir i denne rapporten brukt på en casestudie av et bygg i Italia og analyseres ut fra ulike scenarioer med ulike effektiviseringsområder, som å redusere CO2-utslipp, minimere kostnader eller ut fra ønsket om å være mest mulig selvforsynt. Alle resultatene viser besparingspotensial, og fleksibiliteten blir sterkt påvirket av elektrisitetsprisene og forskjellen mellom innendørs- og utendørstemperaturene (Marotta, 2021).

Liknende fremgangsmåter og formler for beregning av lastforskyvning (peak-shaving) ved hjelp av fleksibilitetsfaktor (FF), mulighet for kraftforskyvning (effektreduksjon), utladningsperiode (responstid) og oppladningsperiode (restitusjonstid) har blitt brukt i en rekke andre rapporter eller artikler (Ioakimidis, 2018; Li, 2021; Shirazi, 2017; Sørensen, 2024).

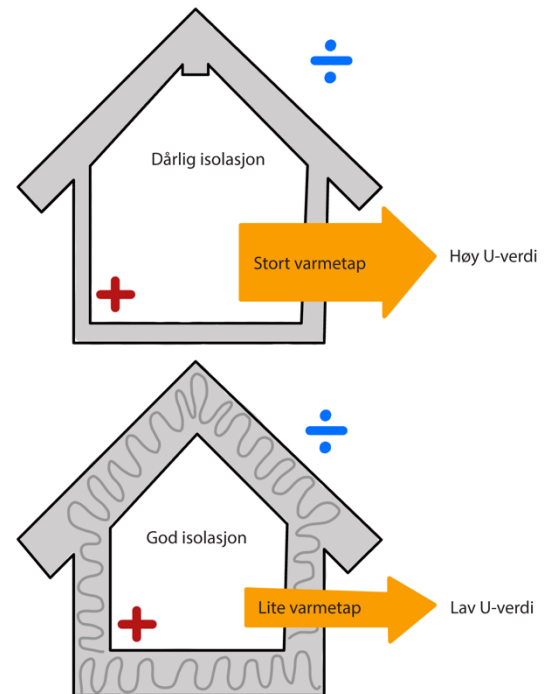
3. Teori og data

Under denne delen av masteroppgaven følger teorier og data brukt direkte i metoden og beregningene av resultatene til oppgaven.

3.1. Bygningsfysikk

Tekniske krav til byggverk, eller TEK-standarder, er forskrifter om tekniske minimumskrav og egenskaper et bygg må ha for å kunne oppføres lovlig i Norge (DIBK, 2017). Kravene inneholder blant annet spesifikke U-verdier for ulike deler av bygg, og krav til lufttetthet og varme-gjenvinning i ventilasjon.

U-verdi, eller varmegjennomgangskoeffisienten, er et mål som brukes for å rangere et materiales/produks/byggets varmeisolerende evne. U-verdien måles i $[W/m^2K]$ og viser andel varme $[J]$ som går gjennom én kvadratmeter $[m^2]$ med en temperaturforskjell på én grad (celsius eller kelvin) per sekund $[s]$ (Espedal, 2022). Ved dårlig isolasjon og dermed stort varmetap vil et bygg ha en høy U-verdi, mens et lite varmetap, derimot, vil føre til en lav U-verdi. Forskjellen i U-verdi er illustrert i Figur 7.



Figur 7: Illustrasjon over varmetap, U-verdi og sammenhengen mellom U-verdi og isolasjon. Illustrasjonen er inspirert av en liknende figur i boka *Bygningsfysikk* av Espedal (2022)

Total varmeeffekt som strømmer ut gjennom et bygg H , blir beregnet som summen av varmetransportkoeffisienten for transmisjonstapet H_{tr} , infiltrasjons-varmetapet H_{inf} og ventilasjonsvarmetapet H_v (Geving, 2021).

3.2. Varmetilskudd

For å beregne forskyvningspotensialet opp mot tidsenhet og varighet på forbrukstopp med enheten tid, må noen antakelser om gjennomsnittlige varmetilskudd legges til grunn for videre beregninger. Disse antakelsene vil kun være avhengige av type bygg, og de vil ikke reguleres i forhold til tiltakene som blir gjennomført. Data for varmetilskudd blir basert på NS 3031-2014 (Norsk standard) Tabell A.2, hvor det oppgis gjennomsnittlige verdier for varmetilskudd for

belysning, utstyr og personer fordelt på de ulike bygningskategoriene. For alle yrkesbygg antas disse verdiene å gjelde «i driftstiden» som er satt fra klokken 07:00 til klokken 19:00. Effekten for varmetilskudd er beregnet med forutsetningen om at 100 % av effekt- og energibruken til belysning og utstyr til bygget går ut i byggets oppvarmede del (BRA) for yrkesbygg. For småhus og boligblokker antas det derimot at bare 60 % av effekten og energibruken gir varmetilskudd i BRA da resten av varmen antas å gå tapt under bruken av utstyr som vaskemaskin, oppvaskmaskin og tørketrommel.

3.3. NVE og Multiconsults SIMIEN-beregninger

SIMIEN er et simuleringsprogram som beregner energibruk og inneklime i bygg. Programmet brukes blant annet til å energimerke bygg og evaluere spesifikke bygg opp mot ulike renoveringstiltak (Simienergi, 2024).

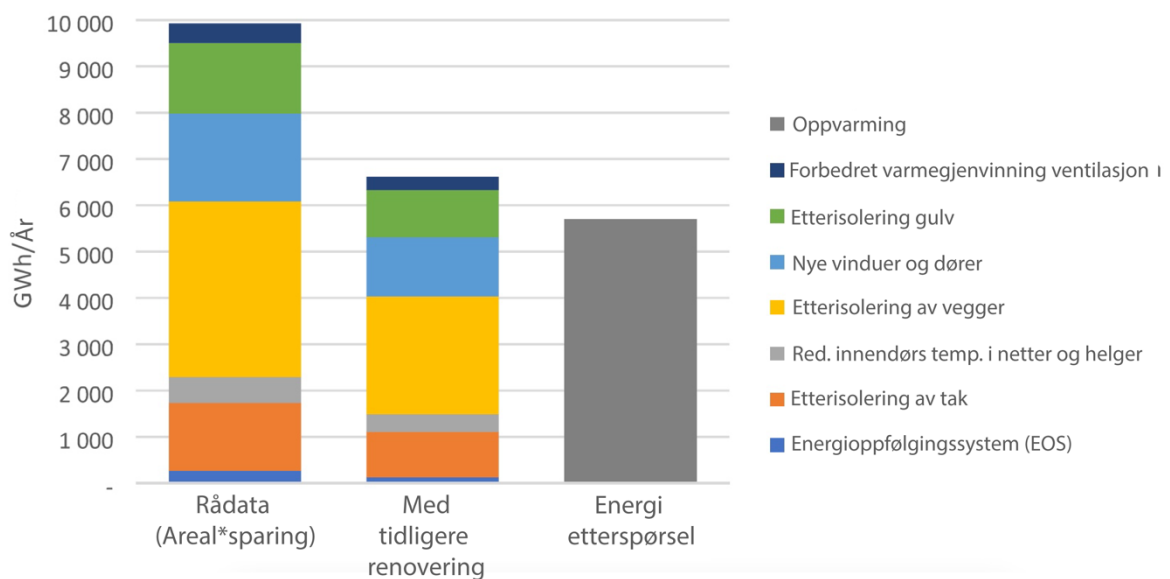
Bygningsmodellene fra SIMIEN som er brukt i Multiconsults prosjekt «Kostnader for energieffektivisering» utført på oppdrag fra NVE i 2014, er tidligere brukt som grunnlag for energirammene i TEK10 og karakterskalaen i energimerkeordningen (Bøhn, 2021; Magnussen, 2024). Bygningsmodellen blir også lagt til grunn for beregningene i denne masteroppgaven. Bygningsmodellene representerer det gjennomsnittlige bygget målt ut fra størrelse innenfor hver bygningskategori. Bygningskategoriene består av de 13 kategoriene: småhus, boligblokk, barnehage, kontorbygning, skolebygning, universitets- og høyskolebygning, sykehus, sykehjem, hotellbygning, idrettsbygning, forretningsbygning, kulturbygning og lett industribygning, verksted. Dette er de samme kategoriene som blir brukt av Norsk Standard for bygg. Arealene for hver bygningskategori er blant annet delt inn oppvarmet luftrom [m^3], takareal [m^2], veggareal [m^2] og areal over vinduer og dører [m^2].

Under prosjektet «Kostnader for energieffektivisering i bygg» er inputdataene basert på historiske TEK-standarder, dog noe revidert etter byggemåte for byggeårsperioder basert på erfaringstall (Bøhn, 2021). De eldre TEK-standardene er ulike for ulike geografiske soner, mens de nyere har samme krav for hele landet (uavhengig av geografisk sone). Til de eldre TEK-standardene anses sone 3 (som inkluderer Oslo) som den mest representative sonen for den norske bygningsmassen, og denne blir derfor lagt til grunn for de videre beregningene (Bøhn, 2021).

De opprinnelige beregningene i Multiconsults prosjekt for NVE tar kun hensyn til byggene og deres originale byggstandard selv om noen av byggene allerede er renovert (Bøhn, 2021). Det finnes ikke data på hvor stor andel som er renovert (Rosenberg, 2023). NVE og DIBK gjorde derfor noen videre beregninger for OED, hvor de kompenserte for renovering og effektivisering. Dette resulterte i mindre energibruk per bygg. I tillegg reduserte de potensialet med 10 % for å kompensere for overlappende målinger i tiltakene (NVE & DIBK, 2022).

3.4. IFEs videre bearbeiding av energieffektiviseringsdata

I rapporten «Building energy efficiency measures in Norwegian energy system analysis», publisert av IFE, bearbeides beregningene gjort av Multiconsult for NVE (Bøhn, 2021) og NVE og DIBK for OED (NVE & DIBK, 2022), slik at disse tilpasses videre til deres TIMES-modell. Årsaken til dette skyldes en urealistisk høy energibesparelse i scenarioet hvor alle renoveringstiltakene blir gjennomført.



Figur 8: Diagram over energjetterspørsel, energibesparelse basert på areal*besparelse ($m^2 \cdot kWh/m^2$) og tilpasset tidligere renoveringer, for gamle småhus i NO1. Oversatt til norsk fra (Rosenberg, 2023)

Figur 8 er forholdet illustrert: Total etterspørsel etter oppvarming er beregnet til 5,7 TWh/år, og total besparelse ved gjennomføring av alle tiltak er satt til 9,9 TWh (Bøhn, 2021). Justert for antatte renoveringer og effektiviseringstiltak samt 10 % for overlapping, får man en total på 6,6 TWh/år. Energibesparelsen virker fortsatt urealistisk høy i forhold til etterspørselen (Rosenberg, 2023). Differansen på etterspørselen og besparelsen ved innføring av tiltak er illustrert i Figur 8.

I utarbeidningen av metoden velger IFE å bare fokusere på oppvarming, hvor påvirkning på kjøling ikke er tatt i betraktning. De betrakter også tidligere beregnet potensial for energieffektiv belysning som urealistisk høy, og setter 10 % besparelse av etterspørselen ved innføring av energieffektiv belysning. Videre beregnes den faktiske energibesparelsen på bakgrunn av at det mest lønnsomme tiltaket blir gjennomført først, og her blir lønnsomheten rangert med bakgrunn i Levelized Cost Of Energy (LCOE). Når et tiltak blir gjennomført, blir energibesparelsespotensialet per m² mindre på det neste tiltaket, og summen av alle energibesparelsene kan derfor ikke bli summert direkte (Rosenberg, 2023). Det vil si at energibesparelsen per tiltak blir kalkulert etter formelen under:

Besparelse tiltak #n

$$= \left(\text{Etterspørsel oppvarming} - \sum \text{besparelse \#1} - (n - 1) \right) * \% \text{ andel av total besparelse \#n}$$

IFEs beregninger legger altså til grunn at lønnsomheten av tiltakene setter rekkefølgen tiltakene blir utført i. Det totale tekniske energisparingspotensialet avhenger kun av hvor mange og hvilke av tiltakene som blir gjennomført, men energibesparelsen ved hvert enkelt tiltak avhenger av rekkefølgen (Rosenberg, 2023). I denne masteroppgaven vil de videre beregningene være uavhengige av antakelsen om at det mest lønnsomme tiltaket blir gjennomført først, og det tas utgangspunkt i ulike scenarioer og tiltakspakker i stedet.

3.5. Temperaturer

Energi- og effektbehov avhenger av temperatur og klima, spesielt når det gjelder oppvarming. Norge er et land med stor variasjon i temperaturer gjennom året og for ulike områder. Derfor vil denne masteroppgaven inneholde beregninger med et spekter av temperaturer.

3.5.1. Klima i Norge

For å forstå hvorfor et land som Norge må betraktes som ulike geografiske soner, vil det være viktig å se nærmere på klimaforskjellene, og da spesielt temperaturforskjellene. Köppens klimaklassifiseringssystem blir lagt til grunn for å sammenligne de ulike områdene i denne masteroppgaven. Systemet deler områdene inn i klimasoner basert på temperatur og nedbør (Ahrens, 2017). Norge består av områdene varm-temperert klima (Cfb), kald-temperert klima (Dfc) og polarklima-tundra (ET).

Cfb finner vi langs kysten, spesielt på Vestlandet. Klassifiseringen sier at det er mye nedbør alle sesongene og milde vintere, og lange og kalde somre. Gjennomsnittstemperaturen for alle månedene er under 22° C, og minst fire måneder har et gjennomsnitt over 10° C. Den kaldeste måneden har en temperatur mellom 18° C og -3° C (Ahrens, 2017).

Dfc finner vi på Østlandet og litt nordover. Klassifiseringen sier at det er mye nedbør alle sesongene samt kalde vintere og korte og kalde somre. Gjennomsnittstemperaturen for alle månedene er under 22° C, og én til tre måneder har et gjennomsnitt over 10° C. Den kaldeste måneden har en gjennomsnittstemperatur under -3° C (Ahrens, 2017).

ET finner vi i innlandet på visse høydemetre og i nord. Klassifiseringen sier at gjennomsnittstemperaturen i den varmeste måneden er mellom 0 og 10° C (Ahrens, 2017).

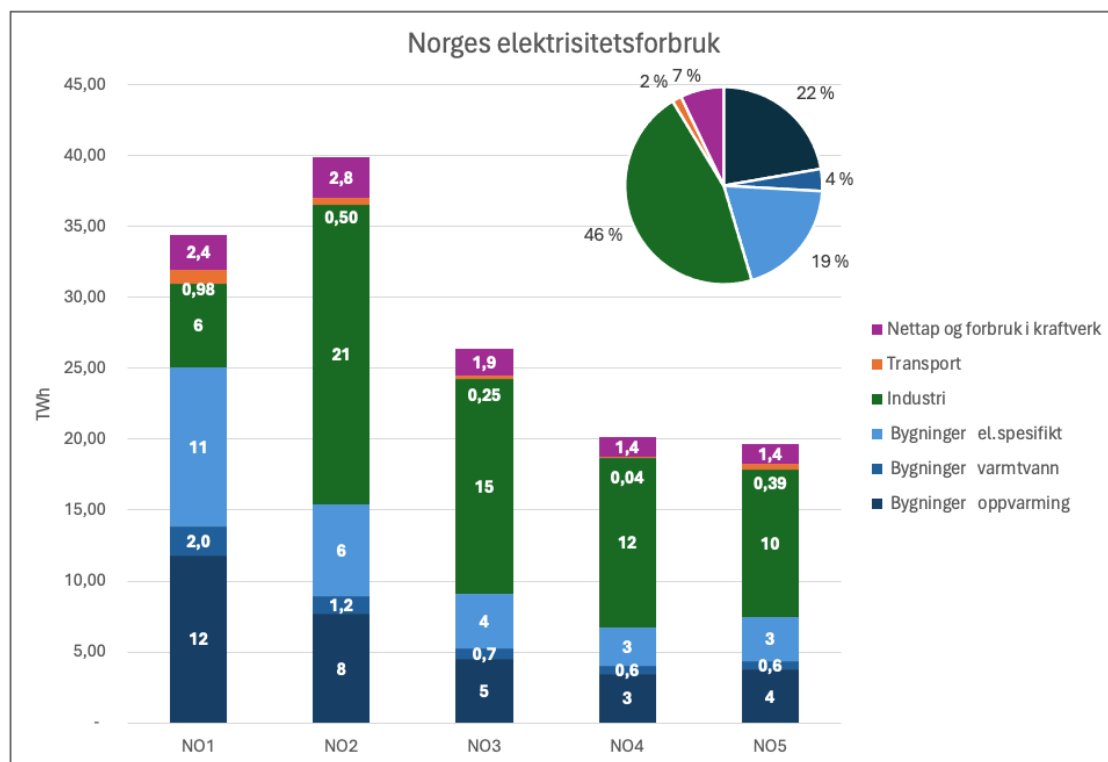
For å definere klimaet i Norge har vi også historiske data fra Metrologisk institutts værstatistikk (MET, 2024) og Climate-data's nettside (Climate-data, 2024). Disse er også spesifisert helt ned til spesifikke værstasjoner og blir derfor benyttet til å definere temperaturer brukt i beregningene for denne masteroppgaven.

3.5.2. Inneklima i bygninger

Det finnes forskjellige krav til temperatur og lufttilførsel i ulike typer bygg i Norge. Kravene er ofte delt inn i «i driftstiden» og «utenfor driftstiden». Noen krav har innendørstemperaturer som avhenger av årstid, andre har kun et minimums- og et maksimumskrav. For å forenkle disse kravene vil denne masteroppgaven ta utgangspunkt i settpunkt-temperaturer som er gitt som kontrollberegninger mot offentlige krav av NS 3031:2014 Tabell A.3.

3.6. Etterspørselsprofiler

For å kartlegge behovet for lastforskyvning må lasten defineres. For å definere lasten tar denne masteroppgaven utgangspunkt i forbruket i det norske energisystemet. Da beregningene, eller kartleggingen, betraktes som bakgrunnsdata til denne masteroppgaven, vil beregningene og resultatene presenteres her – i teori- og datadelen. Årlig etterspørsel fordelt på kategori ble derfor klarlagt med bakgrunn i IFE-TIMES' inputdata og tall fra Statistisk sentralbyrå (SSB), NVE og Norsk Elbilforening. Resultatet fra kartleggingen presenteres i Figur 9.



Figur 9: Søylediagram over Norges elektrisitetsforbruk lagt til grunn for videre beregninger. Sektordiagrammet oppe til høyre viser andelen av hver kategori av totalen for hele Norge. Tallene er basert på data fra: TIMES input, SSB, NVE og Norsk Elbilforening

Som presentert i kapittel 2.1.1., var forbruket i 2021 138 TWh. Kartleggingen, som legger grunnlaget for de videre beregningene, gir et totalt forbruk med nettap og forbruk i kraftverk på 140,5 TWh. I figuren vises forbruket til bygg (blåtoner), industri (grønn), transport (oransje) og nettap og forbruk i kraftverk (lilla). Forbruket til bygg er delt inn i oppvarming (22 % av totalt), varmtvann (4 % av totalt) og el. spesifikt (19 % av totalt) fra mørkt til lyst.

Bygningsresultatene, industriresultatene og transportresultatene er beregnet med bakgrunn i etterspørselsprognoser fra inputdata til IFEs TIMES-modell. TIMES er en tekno-økonomisk modell som kan frembringe nasjonale og internasjonale prognoser. Modellen gir detaljerte vurderinger for valgte andeler som brukes av ulike teknologier med bakgrunn i hele energisystemet, fra ressurser og produksjonsteknologier til etterspørselsteknologier og forbruk. Derved inneholder modellen blant annet etterspørselsprognoser og oppvarmingsteknologiers effektivitet samt andel av total som brukes i beregningene av etterspørselsprofilene.

Etterspørselsprofilene i TIMES er fordelt på spotprisområde, bygningskategoriene er fordelt på småhus, boligblokk og yrkesbygg, og etterspørselskategoriene på punktoppvarming, varmtvann, fjernvarme og spesifikk elektrisitet. Disse gjelder for total etterspørsel (altså uavhengig av oppvarmingsteknologi).

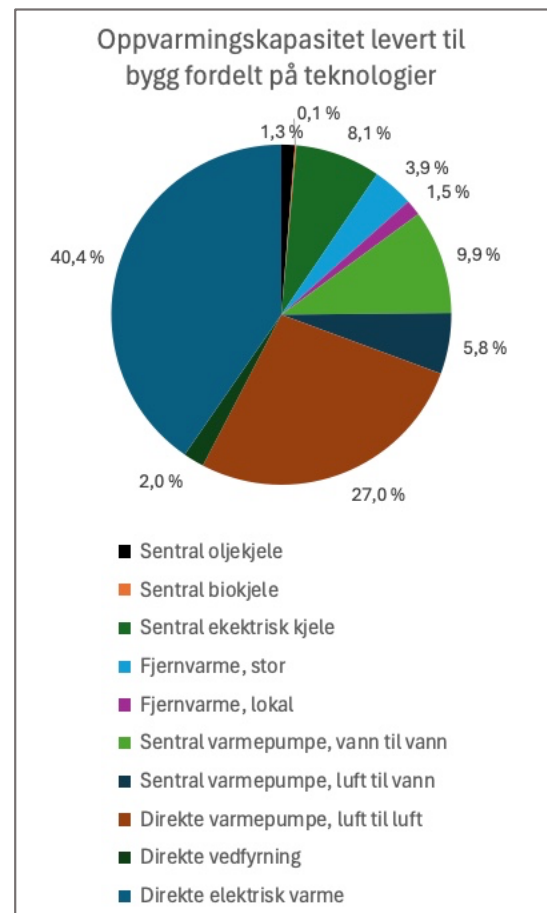
I kun elektrisitetsetterspørselen antas det derfor at fjernvarme kommer fra biomateriale, og blir videre sett bort ifra. Det følger derved tre kategorier for etterspørsel; oppvarming, varmtvann og el. spesifikt.

Da total etterspørsel for oppvarming fortsatt består av flere energikilder enn elektrisitet, hentes det ut bakgrunnsdata til oppvarmingsteknologier som bearbeides videre. Bakgrunnsdata for installerte oppvarmingsteknologier er delt inn i teknologi, strømprisområde og bygningskategoriene småhus, boligblokk og yrkesbygg. I tillegg har oppvarmingsteknologiene hver sin virkningsgrad (effektivitetsgrad). Det vil si at etterspørselsprofilene reflekterer levert varme, men ikke produsert varme.

Dette må derfor regnes med for døgnprofilene. Andel av oppvarmingskapasitet levert til bygget for de ulike teknologiene er illustrert i Figur 10.

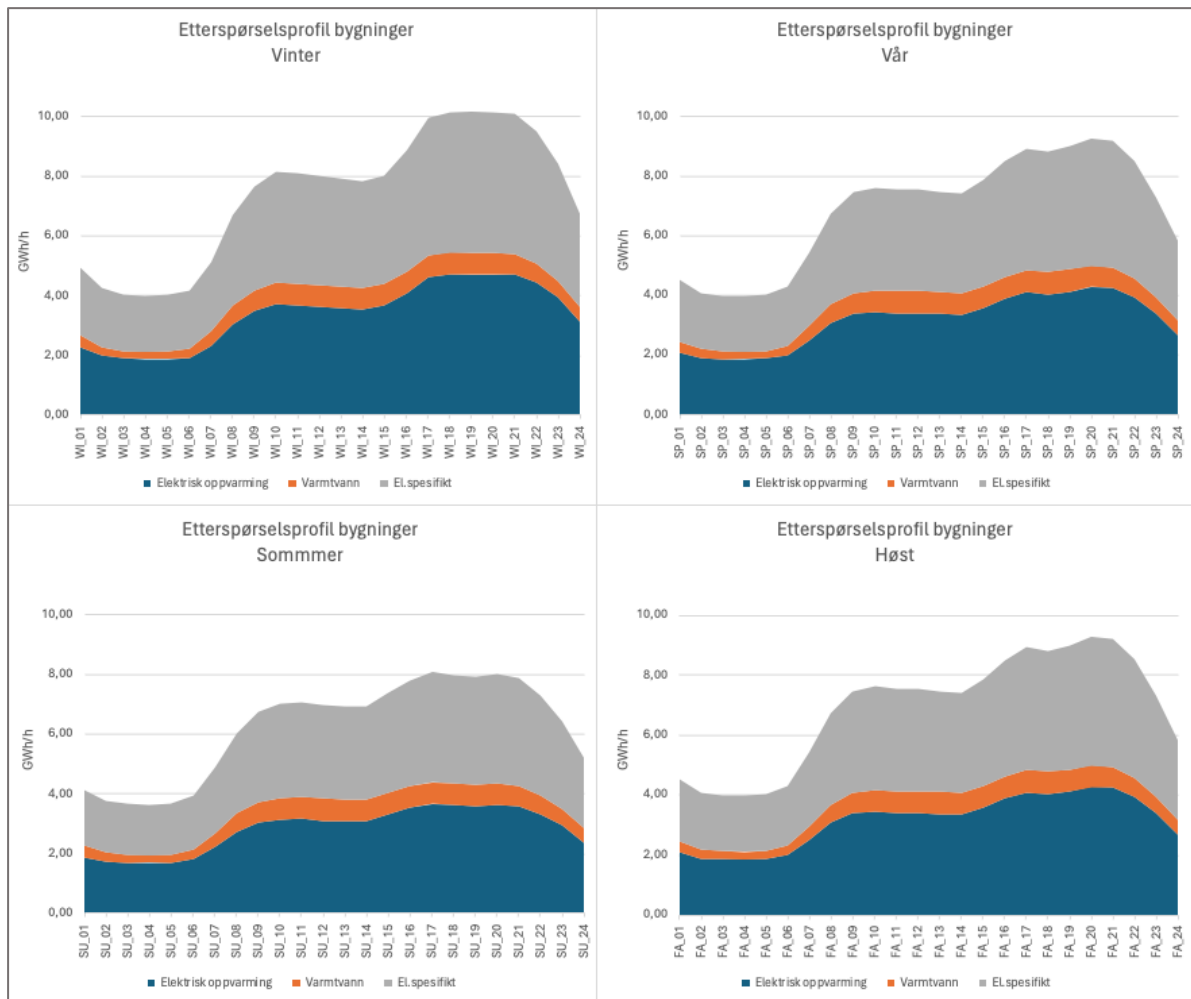
Oppvarmingsteknologiene, som oljekjele, biokjele, fjernvarme og vedfyring, fjernes så fra totalen da de ikke leverer elektrisk varme, og tas ikke med i kartlegging av døgnprofilene og effekttoppene i systemet.

Etterspørselen til transport hentes ut som elforbruk i transportsektoren fra TIMES-data Basert på antakelser fra NVE og Norsk Elbilforening blant annet om at personbiler bruker 2 kWh/mil og lastebiler og busser bruker 15 kWh/mil (Bøeng, 2022), aggregeres etterspørselsdataene opp fra millioner km årlig kjørt til TWh. Den totale etterspørselen blir da 2,16 TWh og antas realistisk ut ifra SSBs tall, 1,52 TWh, fra 2021 (Bøeng, 2022). Elbildataene er i utgangspunktet ikke fordelt på NO-områder, men fordeles med grunnlag i prosentvis fordeling, hvorav 45 % av forbruket er til elektrisk transport i NO1, 23 % i NO2, 12 % i NO3, 2 % i NO4 og 18 % i NO5.



Figur 11: Sektordiagram over oppvarmingskapasitet levert til bygg, fordelt på ulike teknologier for hele Norge samlet. Tallene er basert på TIMES inputdata.

Den totale etterspørselen til industrien hentes direkte ut fra TIMES, men det er kun belysning i bygg som her har døgnprofiler, og derved tar vi kun med oss etterspørselsprofilene til bygg for sammenligning med lastforskyvningspotensialene.



Figur 12: Etterspørselsprofiler lagt til grunn for videre beregninger, her presentert for hele Norge samlet. Profilene er for fire gjennomsnittsdøgn i året (vinter, vår, sommer og høst), og beregningene baseres på inputdata i TIMES.

Etterspørselsprofilene for bygg er aggregert opp fra de relative profilene i TIMES med den nye totale etterspørselen for oppvarming (uten fossilt og bio) samt profilene som gis for el.spesifikt og varmtvann. Etterspørselsprofilen er gitt for fire døgn i året og de fem spotprisområdene. I Figur 12 er de samlede etterspørselsprofilene for alle spotprisområder illustrert for de fire sesongene.

3.7. Oppvarmingsteknologi

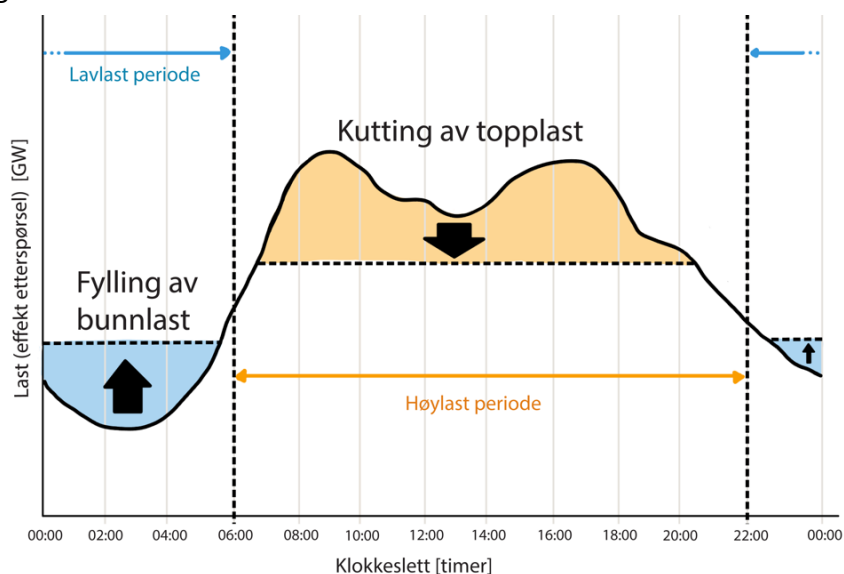
Som vist i Figur 10, har vi en samling av oppvarmingsteknologier i bygg i Norge. For dem som henter energi fra elektrisitet, antas det i denne oppgaven samme teknologier som TIMES-

modellen; altså sentral elektrisk kjele, sentral varmepumpe – vann til vann, sentral varmepumpe – luft til vann, direkte varmepumpe – luft til luft samt direkte elektrisk varme. Ved de første beregningene i metoden antas en virkningsgrad på 1 som representerer bygg med direkte elektrisk varme. Bygg med elektrisk kjele har virkningsgrad rett under 1, og vil derfor bruke litt mer strøm enn levert varme, mens alle typer varmepumpe har en virkningsgrad (Coefficient of performance (COP)) over 2,5, som vil si at de bruker mindre strøm enn levert varme. Virkningsgradene og mengden av hver type oppvarmingsteknologi vil bli tatt hensyn til ved aggregeringen av effektbesparelse, respons- og restitusjonstid.

3.8. Flexibilitetsindikator for bygg

For å vurdere fleksibiliteten i bygg med elektrisk varme og kjølesystemer har det blitt laget en «Flexibility Performance Indicator» (FPI). Denne er laget med utgangspunkt i italienske bygg, men skal kunne brukes i andre land også. Deler av denne metoden skal jeg derfor benytte for å besvare problemstillingene i denne masteroppgaven.

I grove trekk blir FPI basert på fleksibilitet i form av lastforskyvning «peak-shaving» (Arteconi, 2019). Det vil altså si at modellen beregner byggets evne til å forskyve forbruket til perioder hvor etterspørselen er lavere. Denne kuttingen av topplasten kan gjøres for eksempel ved bruk av termostater med varierte innstillinger for komforttemperatur. Topplast-kuttingen er illustrert i Figur 13.



Figur 13: Illustrasjon av etterspørselsprofil med illustrasjon av hvordan det vil se ut dersom etterspørselen kuttes under høylastperioden og lavlastperioden fylles med mer etterspørsel, evt. dersom etterspørselen flyttes fra høylast til lavlast periode (lastforskyvning), Inspirert av figur i (Arteconi, 2019)

Evnen til å forskyve effektbehovet blir ved hjelp av standarden beregnet med bakgrunn i byggets tekniske standard og forholdet mellom ute- og innetemperatur, for deretter å bli sammenlignet med tider for effekt-eterspørselen til landet. Under i Tabell 2 ser vi en sammenligning av de italienske inputdataene og norske eksempeldata for sammenligning. Tabell 2 viser stor variasjon i temperaturene, og byggstandardene for de byggene som ble betegnet som mest aktuelle i Italia, er omtrent av samme verdi som TEK49-standardene i Norge.

Tabell 2: Brukes for sammenligning av temperaturdata og U-verdier i Norge og i Italia (som brukes i FPI beregningene). U-verdiene for Norge er hentet fra TEK-standarder oppgitt i (Bøhn, 2021) og temperaturdataene for Norge er basert på historiske data fra (MET, 2024).

Norsk historisk klimadata, gjennomsnittstemperaturer 1991-2021					TEK17 - alle bygg				TEK49 - småhus			
Område	Gjennomsnitt temperatur sommer	Maks temperatur sommer	Gjennomsnitt temperatur vinter	Min temperatur vinter	U-verdi yttervegg	U-verdi gulv	U-verdi tak	U-verdi vinduer/dører	U-verdi yttervegg	U-verdi gulv	U-verdi tak	U-verdi vinduer/dører
	°C	°C	°C	°C	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]
NO1	17,4	21,1	-5,1	-7,5	0,18	0,10	0,13	0,80	0,50	0,28	0,33	2,80
NO2	16,4	19,4	0,3	-1,6	0,18	0,10	0,13	0,80	0,50	0,28	0,33	2,80
NO5	14,2	16,9	-0,1	-2,4	0,18	0,10	0,13	0,80	0,50	0,28	0,33	2,80
NO3	14,6	18,3	-4,5	-7,2	0,18	0,10	0,13	0,80	0,50	0,28	0,33	2,80
NO4	12,0	14,6	-11,0	-13,5	0,18	0,10	0,13	0,80	0,50	0,28	0,33	2,80

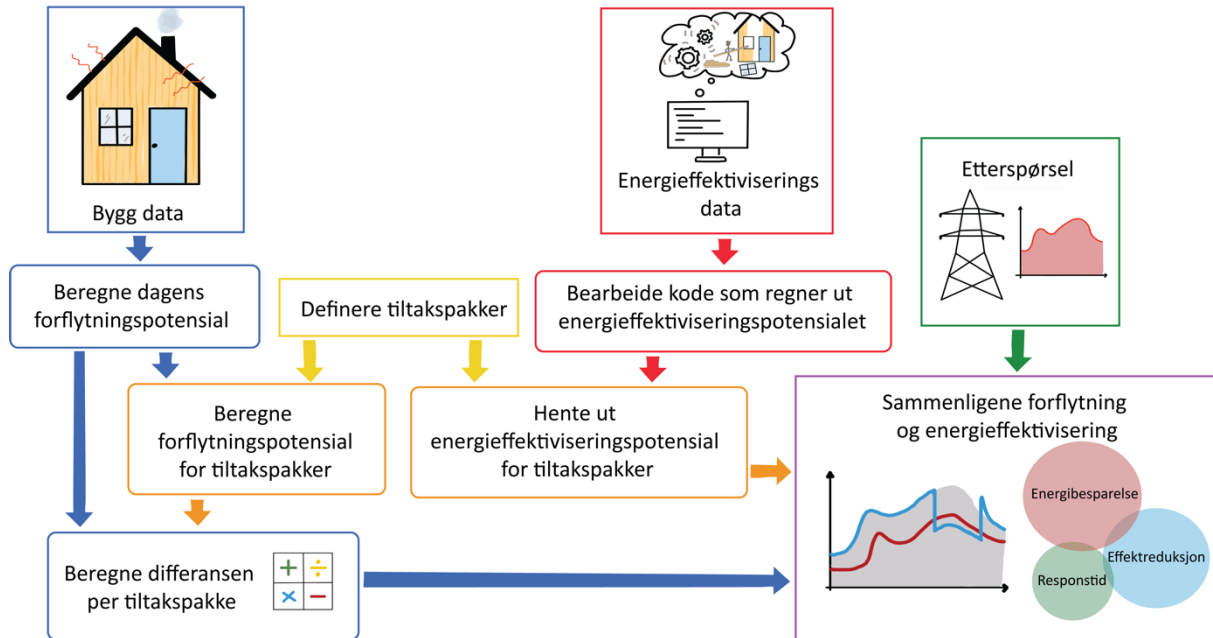
Data benyttet i FPI utregningene:

Klimasone	Gjennomsnitt vinter temperatur	Gjennomsnitt sommer temperatur	Design sommer temperatur	Design vinter temperatur	U-verdi yttervegg	U-verdi gulv	U-verdi tak	U-verdi vinduer/dører
	°C	°C	°C	°C	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]	[W/m2K]
B	11,8	25,9	32,3	5	0,48	0,49	0,38	3,00
E	5,8	23,2	31,0	-8	0,34	0,33	0,30	2,20

For å beregne FPI er det spesielt tre variabler som er fundamentale: tid, kapasitet (andel av energi som kan bli forskjøvet per tidsenhet) og kostnader (potensiell besparelse). Videre blir det beregnet en responstid [timer], effektvariasjon [W], restitusjonstid [timer] og energivariasjon [Wh]. (Effektvariasjon og energivariasjon blir beregnet som integralet mellom referansealternativet og alternativet med forskyvning.) Deretter blir de fire nevnte parameterne vektet ut ifra modellens antakelser om parameterens relevans for fleksibiliteten, og resultatet blir en verdi på en skala som uttrykker graden av fleksibilitet i bygget (Arteconi, 2019). Metoden i beregningen av elementene til FPI blir benyttet direkte i denne masteroppgaven for å finne forskyvningspotensialet.

4. Metode

Dette kapitlet beskriver beregningene som er foretatt i masteroppgaven. For å få litt bedre forståelse av metodekapittelets oppbygning er hovedelementene illustrert i Figur 14.



Figur 14: Metoden forklart som et flyttdiagram. Illustrasjonen viser at bygningsdata blir brukt til å beregne forflytningspotensialet og at energieffektiviseringsdata blir brukt til å beregne energieffektiviseringspotensialet før de to settes sammen med etterspørsel og sammenlignes.

4.1. Uthenting av data

4.1.1. Bygningsdata fra NVE

Bygningsdataene som brukes i denne masteroppgaven er hentet fra «gjennomsnittsbygget» (tidligere brukt i Multiconsult og NVEs beregninger for prosjektet «Kostnader for energieffektivisering») (Magnussen, 2024). Dataene er delt inn i 13 bygningskategorier, de samme som norsk standard (NS: 3031) baserer seg på, presentert i kapittel 3.3.

For hver bygningskategori blir det oppgitt byggtekniske data for gjennomsnittsbygget og relevante verdier fra aktuell TEK-standard for energieffektiviseringsberegningene. Byggtekniske data som blir brukt videre i denne masteroppgaven, innebærer blant annet: oppvarmet bruksareal BRA [m²], grunnflate[m²], oppvarmet luftrom [m³], takareal [m²], veggareal [m²], areal vinduer og dører [m²]. Relevante verdier fra TEK-standard er blant annet: U-verdier for hver komponent i bygget, lufttetthet/lekkasjetall og varmegjenvinning i ventilasjon.

4.1.2. Varmetilskudd fra NS 3031:2014

Verdiene for varmetilskudd som benyttes i denne masteroppgaven, er oppgitt som kontrollberegningsverdier for offentlige krav av NS 3031:2014 Tabell A.2. Det er spesifisert i Norsk Standard at disse beregningene ikke nødvendigvis er reelle tall. Disse verdiene varierer ikke med innføring av tiltak og vil således ikke påvirke resultatene, men vil i hovedsak bli brukt som tilleggsopplysninger for å gjøre de totale resultatene fra beregningen av tid mer realistiske.

4.1.3. Temperaturdata

I følge Köppens klimaklassifiseringssystem som presenteres i kapittel 3.5.1, kunne beregningene i denne oppgaven blitt delt inn etter tre klimasoner, men på grunn av bruken av inputdata fra NVE og IFE, som er fordelt på spotprisområder, deles også områdene her inn etter spotprisområder. I Tabell 3 er det presentert ulike temperaturer som legges til grunn for valg av temperaturer til scenariokjøringen i denne oppgaven.

Tabell 3: Viser temperaturdataene som er lagt til grunn for de videre matematiske beregningene, hentet fra (Climate-data, 2024; MET, 2024)

Spotprisområde	Stedsnavn	Fylke	Klimasone	Gjennomsnittstemperatur 2000-2023	SIMIEN Årsmiddeltemperatur	Gjennomsnittstemperatur Sommer	Gjennomsnittstemperatur Vinter	Maksimumstemperatur 2000-2023	Minimumstemperatur 2000-2023	Kulderekord fylkesvis (bebodd)	Sted for kulderekord
NO1	Oslo	Oslo	Dfc	7,24	6,30	17,40	-5,10	34,60	-20,70	-31,10	Bjørnholt
NO2	Kristiansand	Vest-Agder	Cfb	7,87	7,90	16,40	0,30	30,70	-22,90	-33,00	Sirdal
NO3	Trondheim	Sør-Trøndelag	Dfc	6,07	5,10	14,60	-4,50	32,10	-24,30	-50,40	Røros
NO4	Tromsø	Troms	Cfb	3,58	2,90	12,00	-11,00	30,10	-18,30	-44,10	Øverbygda
NO5	Bergen	Hordaland	Cfb	8,61	7,50	14,20	-0,10	33,40	-13,40	-36,10	Voss

Temperaturdataene markert med 2000-2023 er beregnet fra data fra Metrologisk institutts værstatistikk (MET, 2024). Gjennomsnittstemperaturene fordelt på sommer og vinter er hentet fra Climate-data's nettside (Climate-data, 2024).

Tabell 3 viser at ingen av områdene angitt for spotprisområdene er i ET-områder (polarklimatundra - områder). Dette betyr at deler av områder i Norge har lavere temperaturer enn oppgitt her. Derfor er det, fordelt på fylker, funnet kulderekorder for bebodde områder for hvert fylke som kan brukes som ekstremverdier i analysen videre. For sammenligning viser tabellen også SIMIENS innebygde årsmiddeltemperatur, og den er vesentlig lavere enn

gjennomsnittstemperaturen fra 2000-2023. Som følge av dette vil de videre beregningene gjøres for et spekter av temperaturer.

Innendørstemperaturene avhenger av bygningskategori og blir satt med bakgrunn i NS 3031:2014 Tabell A.3. Innendørstemperaturene blir så brukt videre som input sammen med utendørstemperaturene for å få et tallgrunnlag på varmeoverføringer fra byggets innside gjennom forskjellige elementer til utsiden.

4.1.4. Oppvarmingsteknologi

For boliger med elektrisk oppvarming ligger anbefalingene på installert effekt på omtrent det samme hos de ulike varmespesialistene. Nyere hus anbefales 50 W/m^2 , 70-80-90-talls hus anbefales 70 W/m^2 , og eldre og dårlig isolerte hus anbefales 100 W/m^2 (El-proffen, 2024). Siden dette er anbefalt effekt, vil denne masteroppgaven anta at ikke alle bygninger er oppdatert ut fra det som er anbefalt, og beregningene blir derfor gjort med ulike andeler oppvarmingseffekt per areal. I tillegg er det en virkningsgrad tilknyttet oppvarmingsteknologien; denne trengs for å gi et realistisk bilde på blant annet effektreduksjonsberegningene, og virkningsgradene til oppvarmingsteknologiene blir hentet fra inputdataene til TIMES.

4.1.5. Etterspørselsprofiler

Etterspørselsprofilene skal brukes til å settes opp mot forskyvningspotensialet og blir kartlagt og beregnet i kapittel 3.6. Profilene lagt til grunn for beregningene har en tidsopløsning på GWh per time. For å se på forskyvningspotensialet innenfor forbrukstoppene trengs mer detaljerte beregninger. Derfor antas linearitet mellom hver time for etterspørselen.

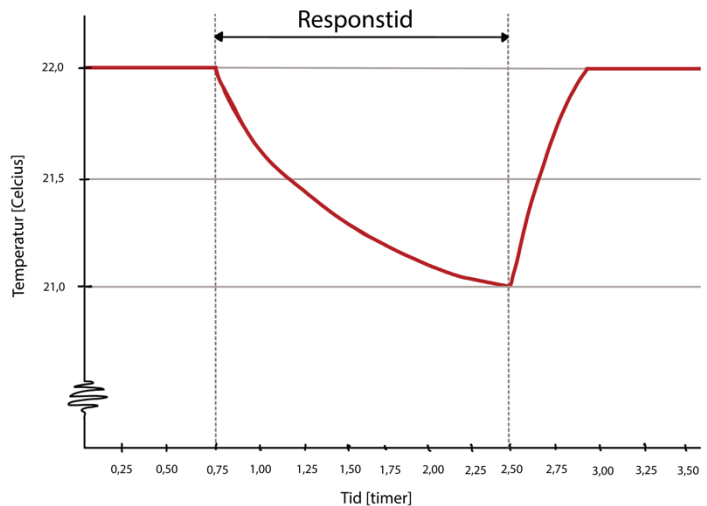
4.1.6. Energieffektiviseringsdata dra IFE

Som nevnt i kapittel 3.4., har IFEs beregninger av det faktiske energieffektiviseringspotensialet for renovering av bygg antatt at det mest lønnsomme tiltaket blir gjennomført først. Denne masteroppgaven tar ikke høyde for denne antakelsen, da den vurderer ulike tiltaks påvirkning på forskyvningspotensialet samt tiltakspakker sammensatt av ulike typer tiltak og rekkefølge på utførelsen.

Jeg arbeidet sommeren 2023 ved IFE med en kode i Python som regner ut den faktiske energibesparelsen for alle mulige kombinasjoner av tiltak. Denne vil derfor brukes for de aktuelle tiltakspakkene. For å vise energieffektiviseringens påvirkning på toppplasttimene sammenlignes det videre med forflytningspotensialet.

4.2. Beregne responstid

For å regne på forskyvningspotensialet til ett bygg starter denne metoden med å regne ut responstiden. Responstiden er perioden fra da oppvarmingskilden blir skrudd av, til temperaturen i rommet har nådd «nedre komfortgrense» og oppvarmingskilden må bli skrudd på igjen. Responstiden er illustrert i Figur 15 som et diagram med temperatur over tid hvor temperaturen synker med tiden. Krumningen til Figur 15 kommer av beregningen av effekt som siver ut av et bygg avhengig av differansen mellom innendørs- og utendørstemperatur. Når differansen mellom temperaturene er likere, vil effekten som siver ut av bygget være lavere, derfor vil det ta lengre tid før temperaturen synker.



Figur 15: Illustrerer endring i innendørstemperatur over responstid ved en forskyvningsperiode. Responstiden betegnes som tiden fra temperaturen er på en "øvre komfortgrense" til en "nedre komfortgrense". Krumningen på grafen kommer av beregningen av effekt som siver ut av et bygg over tid. Når innendørs og utendørstemperaturen nærmer seg hverandre går overføringen av effekt saktere og derfor går også temperaturen saktere ned. Figuren er inspirert av illustrasjon i (Arteconi, 2019)

Responstiden (t) utledes i denne oppgaven direkte fra kraftligningen (Tipler, 2008):

$$P_{rsp} = \frac{Q_{gen}}{t_{rsp}} \quad (1)$$

$$t_{rsp} = \frac{Q_{gen}}{P_{rsp}} \quad (2)$$

Der: P_{rsp} = Kraft eller effekten i responstiden [W]

Q_{gen} = Andelen varme nødvendig for å øke temperaturen til et legeme med én grad [J]

t_{rsp} = tid – her responstid [s]

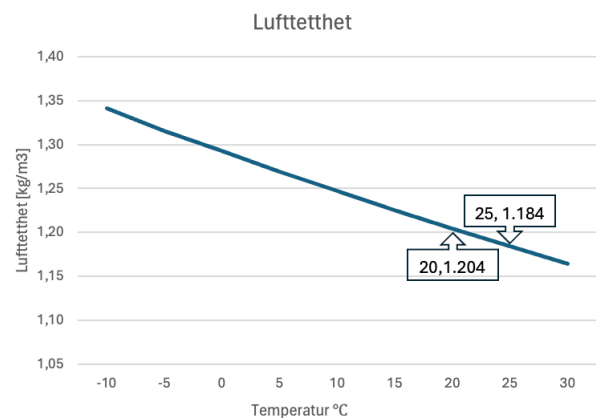
Nødvendig andel varme for å øke temperaturen til et legeme med én grad (Q_{gen}) [J] beregnes med følgende formel:

$$Q_{gen} = m c_{luft} \Delta T \quad (3)$$

c_{luft} er massetetthet luft [J/(kgΔT)] som er en konstant på 1006 J/(kgΔT), ΔT er temperatur- endringen til inneluften i bygget fra responstidens start til slutt. Massen (m) til lufta [kg] er beregnet med bakgrunn i oppvarmet luftvolum [m³] (data per gjennomsnittsbygg fra NVE) og luftens masse ved gitt temperatur [kg/(m³K)].

Luftens masse er avhengig av temperaturen da molekyler sprer seg ved høyere temperaturer og derfor blir færre i volum. Sammenhengen mellom lufttetthet antas i denne oppgaven å være lineær mellom 15 °C og 25 °C gitt den tilnærmet like lineære grafen i Figur 16.

Lufttetthet starter på 1,204 kg/m³ ved 20 °C og minker med 0,004 kg/m³ per økning på 1 °C (Geving, 2021).



Figur 16: Graf over lufttetthet for ulike temperaturer, inputdata til grafen er basert på tall fra (Geving, 2021)

Kraften (P) [W] blir beregnet med følgende formel:

$$P_{rsp} = \phi - Q_{int} \quad (4)$$

ϕ er varmestrømmen ut av et bygg [W], og Q_{int} er varmetilskuddet fra elementer i boligen [W]. Q_{int} består av varme tilført fra belysning (Q_{bel}), utstyr (Q_{uts}) og personer (Q_{per}) per bruksareal i bygget A_{BRA} per bygg. Andelene til varmetilskuddet blir hentet fra NS3031:2014 Tabell A.2, og bruksareal per bygg blir hentet fra NVEs tall (Bøhn, 2021). Q_{int} blir beregnet med følgende formel:

$$Q_{int} = (Q_{bel} + Q_{uts} + Q_{per}) * A_{BRA} \quad (5)$$

Varmestrømmen ut av et bygg (ϕ) [W] beregnes med følgende formel:

$$\phi = H * (\theta_i - \theta_u) \quad (6)$$

For å beregne varmestrømmen ut av et bygg trenger man total varmeeffekt (H) [W/K] som sier hvor mye watt som går ut av bygget per grad temperaturforskjell inne og ute, samt forholdet mellom gitt ute- (θ_u) og innetemperatur (θ_i) (Edwardsen, 2017).

Total varmeeffekt som strømmer ut av bygget (H) [W/K] blir beregnet som summen av varmetransportkoeffisienten for transmisjonstapet (H_{tr}) [W/K], infiltrasjonsvarmetapet (H_{inf}) [W/K] og ventilasjonsvarmetapet (H_v) [W/K] (Geving, 2021), med følgende formel:

$$H = H_{tr} + H_{inf} + H_v \quad (7)$$

Varmetapet på grunn av transmisjon (H_{tr}) [W/K] blir beregnet ved følgende formel:

$$H_{tr} = \sum U_i * A_i \quad (8)$$

A_i er arealet av hver av konstruksjonene i et bygg [m^2], og U_i er de tilhørende U-verdiene [W/m^2K]. Arealene fra konstruksjonene i denne masteroppgaven blir hentet fra NVEs tall (Bøhn, 2021), og U-verdiene hentes fra TEK-standardene (DIBK, 2017).

Varmetapet på grunn av infiltrasjon (H_{inf}) [W/K] blir beregnet med følgende formel:

$$H_{inf} = C * n_{inf} * V \quad (9)$$

C er varmekapasiteten [$=0,33Wh/(m^3K)$], og V er volumet til det oppvarmede luftrommet [m^3], her gitt av standardbyggene til NVE (Bøhn, 2021), og n_{inf} er beregnet med følgende formel:

$$n_{inf} = n_{50} * e \quad (10)$$

n_{50} er bygningens lekkasjetall og kald lufttetthet ved 50Pa [$1/h$] gitt av TEK-standard, og er en terrengskjermingskoeffisient som avhenger av byggets beliggenhet [konstant] (Espedal, 2022). På grunn av forenklinger i denne studien er det valgt å bruke en standard terrengskjermingskoeffisient (e) på 0,07 hentet fra NS 3031:2014 Tabell A.5.

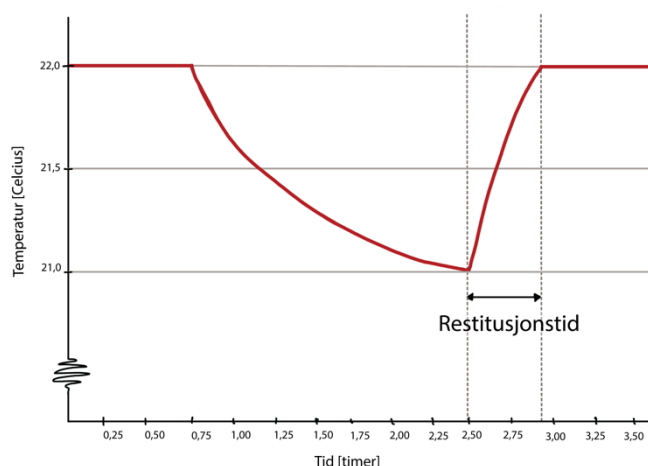
Varmetapet på grunn av ventilasjon (H_v) [W/K] beregnes med følgende formel:

$$H_v = C * V * (1 - n_T) \quad (11)$$

C er varmekapasiteten [=0,33Wh/(m³K)], og V er volumet til det oppvarmede luftrommet [m³] (Espedal, 2022), her gitt av standardbyggene til NVE (Bøhn, 2021). n_T er varmegjenvinningsandelen til ventilasjonsanlegget, her hentet fra TEK-standard. Dette gjør at det totale tapet av varmeeffekt som blir omtalt som varmetransportkoeffisienten (H), har enheten [W/K] (Espedal, 2022).

4.3. Beregne restitusjonstid

Det andre steget for å beregne forskyvningspotensialet i denne metoden er å regne ut restitusjonstiden. Restitusjonstiden er perioden fra da oppvarmingskilden blir skrudd på igjen til temperaturen har nådd øvre komfortgrense. Restitusjonstiden er illustrert i Figur 17 som fortsettelse på diagrammet over responstiden, hvor nå temperaturen går oppover med tiden. Krumningen her kommer av ekstra mengde effekt som kreves for å øke temperaturen når differansen mellom ute- og innendørstemperaturen er større.



Figur 17: Illustrerer endring i innendørstemperatur over restitusjonstid (tiden etter responstid). Restitusjonstiden starter når oppvarmingen skrues på igjen og økes til den har nådd "øvre komfortgrense". Krumningen her oppstår av samme grunn som for restitusjonstid (se kap.4.2.) Illustrasjonen er laget med inspirasjon fra figur i (Arteconi, 2019)

Restitusjonstiden (t_{rst}) utledes på samme måte som responstiden (t_{rsp}) i denne oppgaven (Tipler, 2008):

$$P_{rst} = \frac{Q_{gen}}{t_{rst}} \quad (12)$$

$$t_{rst} = \frac{Q_{gen}}{P_{rst}} \quad (13)$$

Der: P_{rst} = Kraft eller effekten i restitusjonstiden[W]

Q_{gen} = Andelen varme nødvendig for å øke temperaturen til et legeme med én grad [J]

t_{rst} = tid – her restitusjonstid [s]

I likhet med responstid (P_{rsp}) [W] brukes formel 3 og 5 til 11 for å regne ut restitusjonstiden (P_{rst}) [W]. Formel 4 blir byttet ut med formel 14 som ser slik ut:

$$P_{rst} = \phi - Q_{int} - Q_{opv} \quad (14)$$

ϕ er fortsatt varmemstrømmen ut av et bygg [W], Q_{int} er fortsatt varmetilskuddet fra belysning [W], utstyr og personer [W] og Q_{opv} er varmetilførsel fra en gitt oppvarmingskilde [W].

Denne formelen (14) vil i senere beregninger (for aggregerte potensialer) også kunne ha en virkningsgrad η_{opv} , og da ser formelen slik ut:

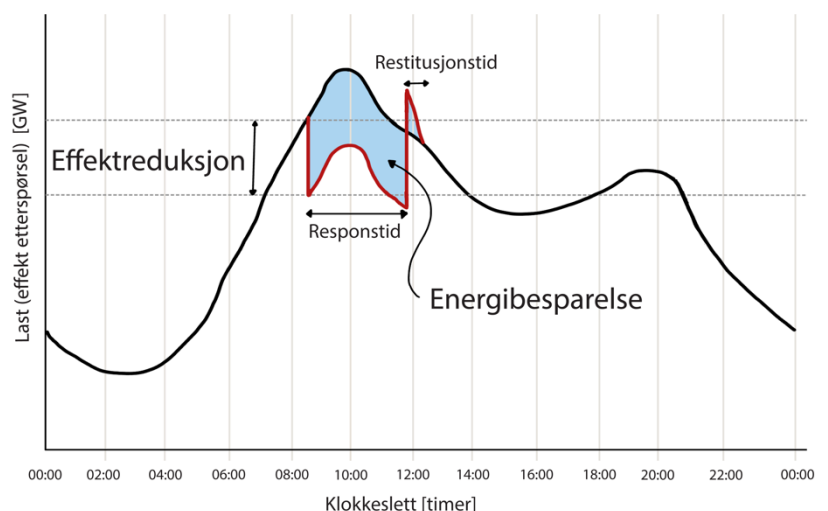
$$P_{rst} = \phi - Q_{int} - Q_{opv} * \eta_{opv} \quad (15)$$

4.4. Forskyvningsperiode – effektreduksjon og energibesparelse

Det tredje beregningssteget går ut på å beregne effektreduksjon og energibesparelse. Disse to beregningene kan brukes for å vurdere forskyvningspotensialet sammen med beregningene for respons- og restitusjonstid.

Effektreduksjon [W] er den andelen av effekt som blir skrudd av ved responstidens start. Dette er altså den andelen av effekt som må brukes for å opprettholde den øvre komforttemperaturen i øyeblikket.

Energibesparelse [Wh] er den totale differansen i effektbruk mellom referansealternativet som holder innetemperaturen på øvre komfortgrense til enhver tid og effektbruken i forskyvningsperioden (altså respons- og restitusjonstiden). Effektreduksjon og energibesparelse er illustrert i Figur 18.



Figur 18: Illustrasjon for å forklare effektreduksjon og energibesparelse satt inn i en graf over etterspørsel gjennom et døgn. Illustrasjon viser et scenario hvor responstid og restitusjonstid er satt inn ved topplasten og brukt til å minke topplasten. Effektreduksjonen er den mengden effekt du skrudd av når du skrudd av oppvarmingen. Og energibesparelse er integralet av forskjellen mellom energiforbruk i referansescenariot og forskyvningsscenarioet.

Effektreduksjon beregnes som $P_{start} = P$ [W] i startøyeblikket til responsperioden t_{res} med formel 4, altså med en innetemperatur θ_i gitt øvre komfortgrense. De tilhørende formlene 5-11 blir så brukt i beregningen. Formel 16 illustrerer sammensetningen av formel 4 til 11:

$$P_{start} = \sum U_i * A_i + C * n_{50} * e * V + C * V(1 - n_T) * \theta_i - \theta_u - (Q_{bel} + Q_{uts} + Q_{per}) * A_{BRA} \quad (16)$$

Energibesparelse (E) [Wh] beregnes som integralet mellom referansealternativet (P_{ref}) [W] og kraften som siver ut av bygget i forskyvningsperioden (P_{for}) [W]. Formelen for beregning av energibesparelse kan skrives slik:

$$E = \int_0^{(t_{rsp} + t_{rst})} (P_{ref} - P_{for}) dt \quad (17)$$

P_{ref} [W] er satt lik P_{start} [W] for enhver tid, kun avhengig av temperaturendring. P_{for} [W] er den totale effekten til enhver tid for respons (P_{rsp}) [W] og restitusjonstid (P_{rst}) [W], gitt ved formelen:

$$P_{for} = P_{rsp} + P_{rst} \quad (18)$$

Effektreduksjon vil i denne metoden vektes mest, og energibesparelse brukes for sammenlignings skyld.

4.5. Definere tiltakspakker

Andelen effekt (eller varme) som siver ut av et bygg, blir påvirket av byggets tekniske kvalitet når det gjelder tetthet, varmegjenvinning og temperaturstyring. Hvilke renoveringstiltak som blir gjort, vil derfor påvirke denne andelen varme som siver ut og dermed også effektreduksjonen og forskyvningspotensialet. For å sammenligne ulike renoveringstiltak vil denne masteroppgaven derfor ta utgangspunkt i noen tiltakspakker som blir satt sammen av de 13 renoveringstiltakene i NVEs beregninger (beskrevet i kapittel 2.2.).

I prosjektet «kostnadsberegning for energieffektivisering» av Multiconsult for NVE (Bøhn, 2021) har de vurdert relevansen for hvert enkelt tiltak som er gitt. Blant annet er tiltakene forbedret vifteeffektivitet, behovsstyrt ventilasjon og automatisk solskjerming vurdert som ikke relevant for småhus og boligblokker. Denne relevansvurderingen vil bli tatt med inn i

sammensetningen av tiltakspakker. I tillegg vil de ulike tiltakspakkene settes sammen på bakgrunn av hvilket behov og ditto mål som settes i første rekke; dette kan for eksempel være det tiltaket som tjener energieffektiviseringspotensialet best, eller det kan være på bakgrunn av antakelser om menneskelig oppførsel eller på bakgrunn av påvirkning fra politiske intensiver.

Disse tiltakspakkene skal brukes både til å beregne respons- og restitusjonstid, samt effektreduksjon og energibesparelse ved forskyvning, og til å hente ut det spesifikke energieffektiviseringspotensialet ved selve renoveringen for den gitte tiltakspakken.

4.6. Regne ut energieffektiviseringspotensialet for tiltakspakker

Energieffektiviseringspotensialet blir hentet ut av en selvlaget kode basert på IFEs energieffektiviseringsdata for de ulike renoveringstiltakene og sammensetningen av tiltakene. Denne koden ble utarbeidet som en del av min stilling hos IFE sommeren 2023. Koden regner ut energibesparelse [GWh/år] og investeringskostnad [NOK/kWh] for alle mulige kombinasjoner av gitte tiltak i ulike typer bygg, med ulike byggtekniske standarder, ulike områder og ulike oppvarmingsteknologier. Ved igangsetting av energieffektiviseringstiltak vil energibesparelsen til hvert enkelt tiltak avhenge av hvor mange tiltak som blir innført og i hvilken rekkefølge de blir innført. Sammenhengen mellom rekkefølge og energibesparelse per tiltak kan forklares med et regneeksempel uten reelle tall:

Vi har et hypotetisk bygg med et årlig forbruk på 10 000 kWh strøm til oppvarming. Byggherren vil i tillegg til å bytte kledning på ytterveggene og etterisolere hele bygget, også bytte vinduer og dører. Han får oppgitt at han vil spare hele 20 % av oppvarmingsforbruket dersom han etterisolerer ytterveggene og hele 15 % ved å bytte vinduer og dører.

Ved å summere andelen bespart uten å ta hensyn til allerede utførte tiltak vil regnestykket se slik ut (utregning nr. 1):

$$\begin{aligned} \#1 \text{ Etterisolere vegger: } & 10\,000 \text{ kWh} * 20\% = 2\,000 \text{ kWh} \\ \#2 \text{ Bytte vinduer og dører: } & 10\,000 \text{ kWh} * 15\% = 1\,500 \text{ kWh} \\ \text{Total energibesparelse: } & 2\,000 \text{ kWh} + 1\,500 \text{ kWh} = 3\,500 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Ved å ta hensyn til allerede utførte tiltak vil regnestykket se slik ut (utregning nr.2):

$$\#1 \text{ Etterisolere vegger: } 10\,000 \text{ kWh} * 20\% = 2\,000 \text{ kWh}$$

$$\#2 \text{ Bytte vinduer og dører: } (10\,000 \text{ kWh} - 2\,000 \text{ kWh}) * 15\% = 1\,200 \text{ kWh}$$

$$\text{Total energibesparelse: } 2\,000 \text{ kWh} + 1\,200 \text{ kWh} = 3\,200 \text{ kWh}$$

Ved å ta hensyn til allerede utførte tiltak og bytte rekkefølge på innføringen av tiltakene vil utregningen se slik ut (utregning nr. 3):

$$\#1 \text{ Bytte vinduer og dører : } 10\,000 \text{ kWh} * 15\% = 1\,500 \text{ kWh}$$

$$\#2 \text{ Etterisolere vegger: } (10\,000 \text{ kWh} - 1\,500 \text{ kWh}) * 20\% = 1\,700 \text{ kWh}$$

$$\text{Total energibesparelse: } 1\,500 \text{ kWh} + 1\,700 \text{ kWh} = 3\,200 \text{ kWh}$$

I utregning nr. 1 ser man en høyere totale energibesparelse enn i utregning 2 og 3. Dette kommer av at det her ikke tas hensyn til at tiltakene påvirker hverandre. I utregning nr. 2 er tiltakenes påvirkning på den totale energibesparelsen tatt med i beregningene, her vil etterisolering av vegger fortsatt bidra med 2 000 kWh av besparelsen, mens Bytte av vinduer og dører bare bidrar med 1 200 kWh (300 kWh mindre enn i utregning nr. 1). I Utregning nr. 3 har rekkefølgen på tiltakene byttet plass, og man ser da at Bytte av vinduer og dører står for 1 500 kWh (300 kWh mer enn i utregning nr. 2) og etterisolering av vegger for 1 700 kWh (300 kWh mindre enn i utregning nr. 2). Den totale energibesparelsen er lik uavhengig av rekkefølgen (se utregning nr. 2 og nr. 3), men energibesparelsen som skyldes de ulike tiltakene, er avhengig av rekkefølgen.

Ved utregning av lønnsomheten til tiltakene, altså investeringskostnad per besparelse, vil lønnsomheten av hvert enkelt tiltak påvirkes av rekkefølgen de blir utført i. Men den totale energibesparelsen og investeringskostnaden for en pakke med tiltak, vil være den samme. I denne masteroppgaven vil det settes tiltakspakker og rekkefølge for disse. Men da denne oppgavens problemstillinger handler om den totale energibesparelsen og effektreduksjonen, og ikke lønnsomhet for hvert tiltak, vil ikke rekkefølgen være avgjørende for resultatene i denne oppgaven.

4.7. Aggregering fra ett bygg til hele Norge

Til nå er beregningene fra forskyvningspotensialet kun gjort på ett bygg. For å aggregere dette opp til andelen bygg i Norge i dag vil denne masteroppgaven bruke arealtall fra 2018 fra NVE (Bøhn, 2021) og antall byggtall fra SSB for bygg bygget etter 2018 (SSB, 2024).

Beregningene av respons- og restitusjonstid og av effektreduksjon og energibesparelse er avhengig av spotprisområde (NO-område), type bygg og aktuelle TEK-standard. Antall bygg må således også være fordelt i henhold til disse tre kriteriene slik at vi får realistiske tall for hele landet. Og videre gjelder dette bygg i 2018 som er kategorisert som standarden «Eldre» til TEK10. Det gjøres så en antakelse om at alle bygg bygget etter 2018 har en byggstandard lik TEK17. Antall bygg bygget etter 2018 fra SSB blir derfor lagt til under TEK17. Deretter blir byggene fordelt, med den antakelsen om at andelen bygg i de ulike NO-områdene er den samme i 2018 som i 2024. Det vil for eksempel si at andelen bygg i NO1 er 42 % av byggene i Norge. I tillegg blir det antatt at fordelingen av byggene på de ulike bygningskategoriene i TEK17 er lik den i TEK10. Det vil for eksempel si at i NO1, med TEK17, er 86 % av byggene småhus.

Beregningene for respons- og restitusjonstid, effektreduksjon og energibesparelse ganges så opp med antall bygg fordelt på de ulike variablene for hele Norge. Energieffektiviseringspotensialet er allerede fordelt på de samme variablene og beregnet som energibesparelse i året, så disse beregningene er allerede aggregert opp til å dekke bygningsmassen i Norge. Siden forflytning sannsynligvis ikke vil være mulig å gjennomføre i alle bygg i Norge, vil jeg i masteroppgaven kjøre scenarioer med basis i at ulike andeler benytter forflytningsteknologien.

4.8. Regne ut samlet reduksjonseffekt og tid

Responstiden kan enten startes samtidig for alle byggene i Norge eller til forskjellig tidspunkt. Ved lik start for alle bygg vil den totale effektreduksjonen være størst, men responstiden blir kort. Hvis det er to eller flere startpunkt for byggene, vil responstiden totalt sett kunne bli lengre, men den totale effektreduksjonen mindre.

Summeringen av effektreduksjonen vil derfor avhenge av om det blir satt et felles starttidspunkt for alle eller om det kan fordeles innen en periode til flere tidspunkt. I denne masteroppgaven må derfor valg av starttidspunkt bli evaluert og den totale effektreduksjonen tilpasset fordelingen. I beregningene for den samlede reduksjonseffekten og respons- og restitusjonstid vil det antas et samlet startpunkt for alle byggene. Dette tidspunktet følger av forbrukstoppen formiddag og eventuelt forbrukstoppen ettermiddag, videre presisert i kapittel 3.6.

4.9. Sammenligning av tiltakspakker

For å besvare problemstillingen «I hvilken grad påvirker energieffektivisering av bygg fleksibiliteten i det norske energisystemet?» gjøres det en modellering av forskyvningspotensialet for dagens bygg og flere beregninger med ulike tiltakspakker. Deretter skal det beregnes prosentvis endring på respons-, restitusjonstid, effektreduksjon og energibesparelse ved innføring av tiltakspakker.

For å besvare den andre problemstillingen «Er de energieffektiviseringstiltakene som er mest energisparende også de beste for forskyvningspotensialet (fleksibiliteten)?» skal den faktiske energibesparelsen for de ulike tiltakspakkene sammenlignes med forskyvningspotensialet. For å gjøre denne sammenligningen fordeles energibesparelsen i året [GWh] til fire døgn-scenarioer i året hvor det antas ulike andeler til oppvarming og derved også ulik besparingsandel. I tillegg blir beregningene lagt inn i et ekstremt scenario for å teste ulike døgn-scenarioer. Deretter vil forskyvningspotensialene legges inn i forbrukstoppene på de ulike døgnprofilene både før og etter innføring av energieffektiviseringstiltak, og til slutt skal energieffektiviseringen og forskyvningspotensialet for alle tiltakspakkene sammenlignes. For å gjøre dette skal følgende spørsmål besvares:

- Hvilke tiltakspakker gir størst energieffektivisering
- Hvilke tiltakspakker gir største endring i effektreduksjon
- Hvilke tiltakspakker gir den største endringen for responstiden

I tillegg vil det gjøres en helhetlig vurdering av villighet til å gjennomføre forskyvningstiltak før og etter gjennomføring av energieffektiviseringstiltak.

5. Resultater

Under følger resultatkapittelet som er bygget opp etter samme fremgangsmåte som illustrert i Figur 14. Som beskrevet tidligere, er det i resultatdelen valgt å fokusere på detaljene i mellomberegningene før aggregering, og etter aggregering presentere totalene og forskjellene mellom spotsprisområdene.

5.1. Uthenting av data

5.1.1. Bygningsdata fra NVE

Bygningsdataene til gjennomsnittsbygget og TEK-standardene fra NVE og Multiconsult er hentet fra en Excel-fil som kun skal benyttes til forskningsformål og ikke publiseres. De vil derfor ikke legges ved denne masteroppgaven, men kan etterspørres fra NVE som input i prosjektet «kostnader for energieffektivisering» utført av Multiconsult for NVE (Bøhn, 2021; Magnussen, 2024).

5.1.2. Varmetilskudd fra NS 3031:2014

Varmetilskudd er verdier på effekt tilført fra andre elementer enn oppvarming i et bygg. Min masteroppgave tar utgangspunkt i at andre elementers bidrag til effekttilførselen baseres på kontrollberegningsverdier fra NS:3031: 2014 Tabell A.2 (presentert i Vedlegg 1).

5.1.3. Temperaturdata

Bakgrunn for valg av innendørs- og utendørstemperaturer brukt i denne masteroppgaven blir presentert i kapittel 4.1.3. For å forenkle aspektet av modellberegningene vil resultatene forholde seg til tre sett med utendørstemperaturer: «SIMIEN årsmiddeltemperatur», «gjennomsnittlig vintertemperatur» og «minimumstemperatur 2000-2023». To vintertemperaturer velges siden oppvarmings- og effektbehovet er størst om vinteren. Det antas dermed at potensialet for forskyvning av oppvarming vil være mest relevant for vinterhalvåret. I Tabell 4 presenteres utendørstemperaturene som er gitt, og som blir brukt videre, fordelt på spotprisområdene.

Tabell 4: Oversikt over valgte temperaturer til bruk for å beregne varmetap i bygg og sammenligne forskjeller ved disse tre temperaturkategoriene.

Spotpris-område	Årsmiddel-temperaturer SIMIEN	Gjennomsnittstemperatur Vinter	Minimums-temperatur 2000-2023
NO1	6,3	-5,1	-20,7
NO2	7,9	0,3	-22,9
NO3	5,1	-4,5	-24,3
NO4	2,9	-11,0	-18,3
NO5	7,5	-0,1	-13,4

Innendørstemperaturene avhenger av bygningskategori, ikke spotprisområde. Kontrollberegningstemperaturene hentet fra NS 3031:2014 Tabell A.3, er samlet i Vedlegg 2. Det er gitt to temperaturer, «i driftstiden» og «utenfor driftstiden», og disse varierer avhengig av typer bygg innenfor de ulike bygningskategoriene. I denne masteroppgaven vil beregningene gjøres med bakgrunn i gitte temperaturer, hvor «i driftstiden» nå blir betegnet som «øvre komfortgrense», mens «utenfor driftstiden» betegnes som «nedre komfortgrense».

Inneklimaet for de fleste bygg er gitt en øvre komfortgrense på 21° C og en nedre komfortgrense på 19° C. Innendørs temperaturdata oppgitt i Vedlegg 2, vil bli brukt i videre beregningene.

5.1.4. Oppvarmingsteknologi

Oppvarmingsteknologi ved restitusjonstidsberegningen blir i denne masteroppgaven forenklet til å omfatte oppvarmingseffekt, følgelig rettes blikket mot effekt tilført rommet. Da det anbefales ulike andeler effekter til ulike byggstandarder, vil denne oppgaven ta utgangspunkt i noen ulike mengder med effekttilførsel. De forskjellige andelenes effekt presenteres i Tabell 5.

Tabell 5: Oversikt over oppvarmingseffekter gitt for ulike kjøringar av den matematiske modellen.

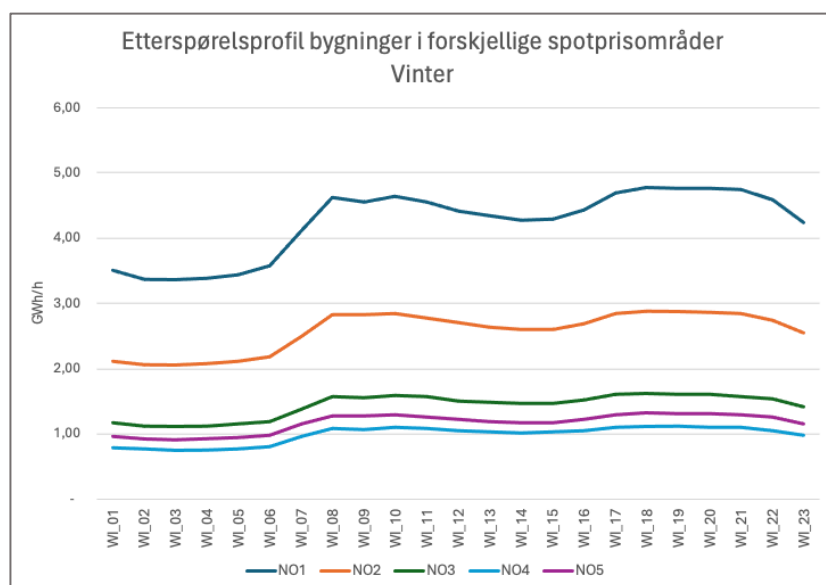
	Oppvarmingseffekt [W/m ²]
Ekstremt lav effekt	15
Veldig lav effekt	25
Lav effekt	35
Middels effekt	50
Høy effekt	70
Veldig høy effekt	100

Effektivitet per oppvarmingsteknologi er hentet fra IFEs inputdata til TIMES, hvor de blant annet har anslått effektiviteten til elektrisk oppvarming, fjernvarme, vedovn og de tre typene varmepumpe; luft til luft, vann til vann og luft til vann. Beregningene vil starte med en antakelse om virkningsgrad på 1 (elektrisk oppvarming/panelovn), for så å gjøre de store analysene med andeler for de ulike oppvarmingsteknologiene.

5.1.5. Etterspørselsprofiler

Etterspørselsprofilene for bygninger, er kartlagt og beregnet ut fra prognosene til input i TIMES, representerer gjennomsnittlige profiler som skal brukes videre for å kartlegge verdien av forskyvningen og energieffektiviseringen. Etterspørselsprofilene består av fire døgner som skal representere det norske strømforbruket i bygg gjennom de fire årstidene. Alle disse scenarioene er delt inn i spotprisområdene (NO-områder) og de tre forbrukskategoriene: oppvarming, varmtvann og el.spesifikt.

Mens etterspørselsprofilene fra beregningsmetoden til FPI-standarden er den totale etterspørselen for området, fokuserer denne masteroppgaven utelukkende på etterspørselsprofilene til bygg. Dette gjøres i håp om å kunne etterprøve beregningene i forhold til potensialet på en enklere måte, og på en enklere måte kunne se størrelsen på påvirkningen av effekttoppene. Figur 19 illustrerer energietterspørselen på vinteren for de forskjellige NO-områdene.



Figur 19: Etterspørselsprofil for alle bygninger i gjennomsnittsdagen vinter, for de forskjellige spotprisområdene

5.1.6. Energieffektiviseringsresultater fra koden i Python (IFE)

Energieffektiviseringsdataene med faktisk energibesparelse [GWh] hentes ved innføring av gitt tiltakspakke, og hentes fra koden i Python som jeg arbeidet med sommeren 2023. Koden er i utgangspunktet laget for seks (6) av energieffektiviseringstiltakene trukket fram av IFE som de mest relevante tiltakene for boliger. Dette gjør at resultatene per tiltak presenteres for disse seks tiltakene, resten analyseres på aggregert nivå. For å vise energieffektiviseringens påvirkning på topplasttimene sammenlignes denne videre med forflytningspotensialet. De seks tiltakene som det legges vekt på ved sammenstilling av de første resultatene, er:

1. Etterisolering av vegger
2. Etterisolering av tak
3. Etterisolering av gulv
4. Nye vinduer og dører
5. Redusert innendørstemperatur på netter og i helger
6. Forbedret varmegjenvinning ventilasjon

Koden avhenger av variablene: spotprisområde, TEK-standard, type bygg og type oppvarming. For å sammenligne tallene kan vi kjøre en runde med innføring av alle de seks renoverings-tiltakene for alle småhus i NO1. Vi får da resultatene i Tabell 6.

Tabell 6: Output ved å kjøre Python koden som jeg arbeidet med sommeren 2023. Denne kjøringen gjelder for alle renoveringstiltakene for småhus i NO1 med punktoppvarming.

Bygningsstandard	Faktisk besparelse GWh/år i 2025
TEK49	3 383
TEK69	2 034
TEK87	475
TEK97	0
Totalt:	5 891

Ifølge times inputdata er etterspørselen etter all oppvarming (ikke bare elektrisk) i småhus NO1 på 10 623 GWh/år, som vil si at faktisk besparelse ved innføring av alle de seks energieffektiviseringstiltakene på alle boligene vil mer enn halvere det årlige forbruket.

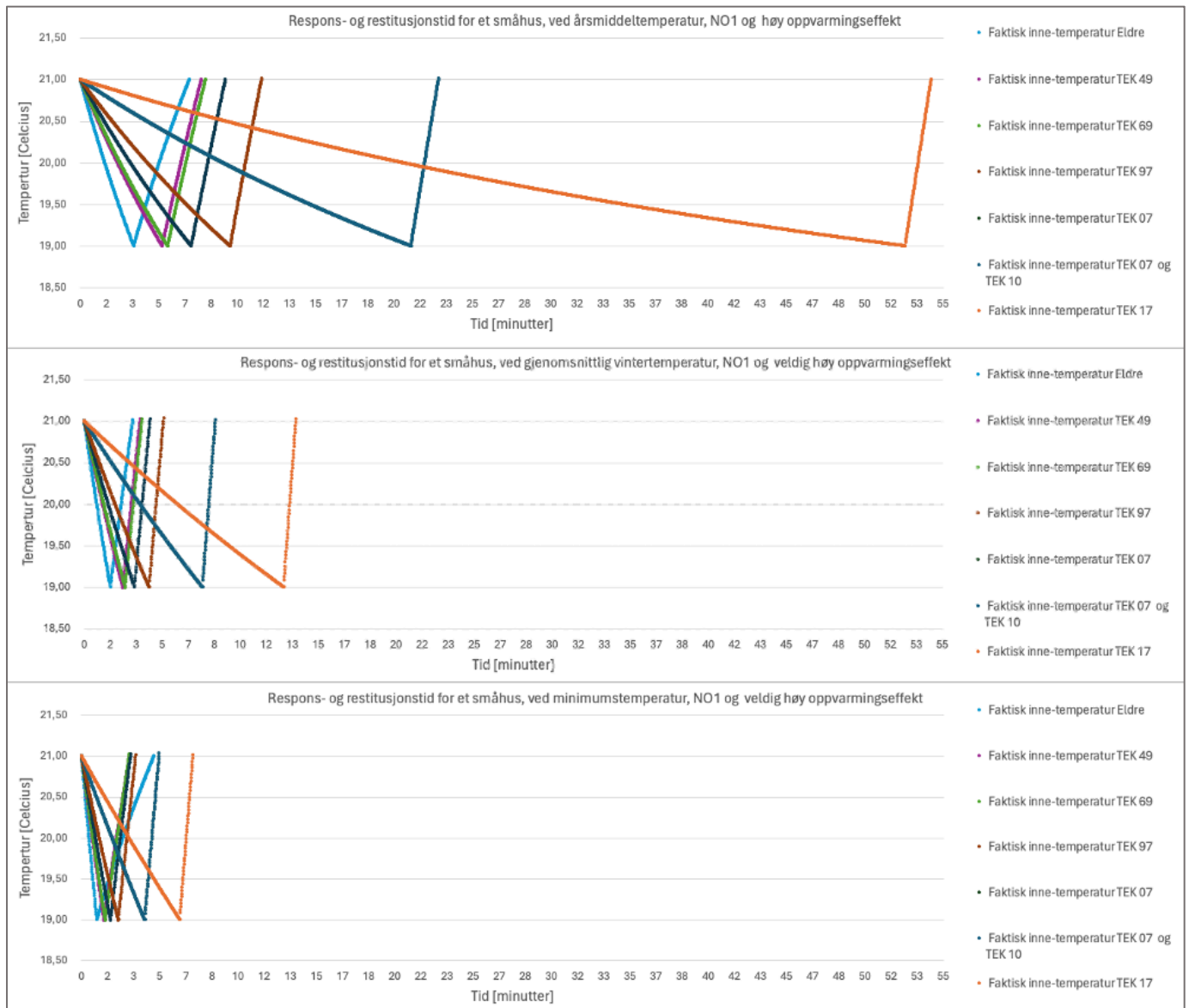
5.2. Respons- og restitusjonstid

Som første ledd i beregningen av lastforskyvningen eller fleksibiliteten kommer beregningen av respons- og restitusjonstiden. Alle beregningene i kapittel 5.2 og 5.3 er gjort for ett bygg med antakelse om 100 % elektrisk oppvarming, med en virkningsgrad på 1. Excel-modellen for utføring av beregningene er laget med variablene: bygningstype, temperatur, NO-område og oppvarmingseffekt. Bygningstypene består av de 13 ulike bygningstypene, og temperaturvariablene kan velges blant de tre temperaturscenarioene som er beskrevet i kapittel 5.1.3. NO-område er de fem spotprisområdene. Oppvarmingseffekten består av de ulike gradene av effekt, presentert i kapittel 5.1.4. Ved valgte inputvariabler velger modellen selv ut en rekke variabler som samsvarer med input.

Under følger en oversikt over hvilke parametere som påvirkes av de ulike variablene:

- Variabelen bygningstype påvirker inputen: øvre- og nedre komforttemperatur [$^{\circ}$ C], varmetilskudd fra belysning, utstyr og personer [W/m^2], totalt boks-areal [m^2], oppvarmet luftvolum [m^3] og bruksareal (BRA) [m^2].
- Variablene bygningstype og TEK-standard påvirker samlet inputen: transmisjonstap (total U-verdi til bygget) [W/m^3K], infiltrasjonstap [W/m^3K] og ventilasjonstap [W/m^2K].
- Variabelen NO-område påvirker inputen faktisk utendørstemperatur [$^{\circ}$ C].
- Variabelen oppvarmingsteknologi påvirker inputen kapasitet til varmetilførsel [W/m^2].

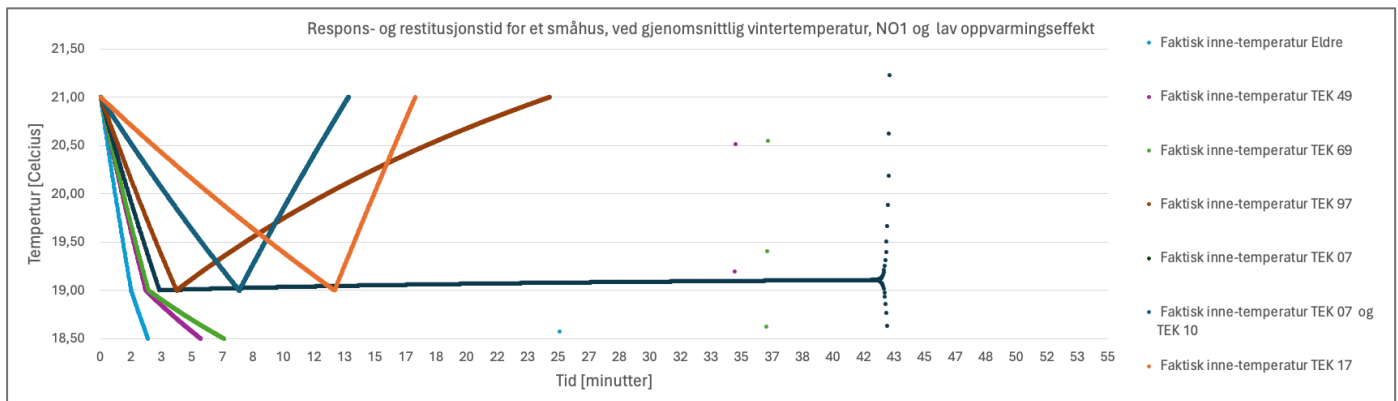
Modellen er lagt til med automatisk beregning for ett bygg med alle ulike TEK-standarder for å kunne sammenligne forskjeller og aggregere opp til dagens bygningsmasse. Figur 20 viser resultater fra tre kjøring for enkelthus og med de tre ulike utendørstemperaturene lagt til grunn. På grunn av usikkerhet tilknyttet overføring av U-verdi mot temperatur og tid, vil fokuset i denne masteroppgaven være på forholdet mellom de ulike TEK-standardene og scenarioene heller enn hva den faktiske responstiden er. For eksempel kan vi se at et småhus i NO1 ved årsmiddeltemperatur i TEK17-standard har en responstid på omtrent 45 minutter mer enn et småhus i samme område med TEK69-standard.



Figur 20: Tre grafer over respons- og restitusjonstid ved kjøring av den matematiske modellen laget for denne oppgaven. De forskjellige linjene representerer forskjellige TEK-standarder. Forskjellen mellom de tre grafene kommer av endring mellom de tre kategoriene for temperatur, hvor to av grafene er vist med «veldig høy oppvarmingseffekt» og én graf med «høy oppvarmingseffekt».

Figur 20 viser også den store påvirkningen fra temperatur, og mens temperaturer endres fra 6,3° C ved årsmiddeltemperaturen til -20,7° C ved minimumstemperaturen 2000-2023, endres tidsdifferansen mellom TEK17 og TEK69 fra 45 minutter til omtrent 5 minutter. Tallene for de kaldere temperaturene virker noe urealistiske, og kan indikere at den direkte sammenhengen mellom U-verdi, temperatur og tid, er noe usikker. Men respons- og restitusjonstiden skal i hovedsak sammenlignes med innføring av tiltak og forbrukstopper i etterspørselen, så de antas derfor å være gode nok til dette. Restitusjonstiden anses å forandres lite med ulike temperaturer så lenge effekten er høy nok, i teorien, til å varme opp igjen bygget. Ved

scenarier med for liten effekt sliter modellen, og simuleringen av temperaturøkningen feiler, som vist i Figur 21.



Figur 21: Graf over respons- og restitusjonstid som viser tilfeller av feil i modellen. Her med tilfeller av for lav oppvarmingseffekt.

Fra resultatene av respons- og restitusjonstiden tar vi med oss alle tidene ved årsmiddeltemperatur og tidene tilhørende de øvre TEK-standardene som kjøres i modellen (ca. TEK97 til TEK17) ved de lavere temperaturene, inn i de videre beregningene.

5.2.1. Delberegninger med stor påvirkning

Ved beregning av respons- og restitusjonstid har som sagt valg av temperatur og TEK-standard stor påvirkning på resultatene. Og for å se hva som påvirker disse forskjellene i TEK-standarder må det dykkes litt dypere ned i mellomberegningene.

For å beregne transmisjonstapet [W/K] (utledet i formel 8) beregner jeg i denne masteroppgaven først «total U-verdi». Den totale U-verdien er U-verdien samlet for hele bygget, hvor det er tatt hensyn til de ulike U-verdiene til hver komponent i bygget og ganget opp disse med en andel som hver komponent har av det totale «boks-arealet» [m²] til bygget; altså det totale arealet av gulv, yttervegger og tak. Den totale U-verdien sier dermed hvor mange watt som siver ut per m² av bygget. Infiltrasjonstapet [W/K] (utledet i formel 9) per oppvarmet luftvolum m³ er beregnet med byggets lekkasjetall ved et trykk på 50 Pa [1/h], en terrengskjermingskoeffisient på 0,07 for alle bygg og varmekapasiteten [Wh/m³K]. Ventilasjonstapet [W/K] (utledet i formel 11) per bruksareal [m²] sier hvor mange watt som går tapt gjennom byggets ventilasjon. Ventilasjonstapet beregnes ved hjelp av ventilasjonsluftmengden [m³/hm²], varmegjenvinningen i ventilasjonen [%] og varmekapasiteten [Wh/m³K]. Resultatene for mellomberegningene presenteres i Tabell 7. Her ser

man at tapet tilknyttet U-verdi og ventilasjon, er vesentlig høyere enn tapet tilknyttet infiltrasjon.

Tabell 7: Mellomberegninger for småhus som viser total U-verdi, infiltrasjonstap og ventilasjonstap per kvadratmeter for alle TEK-standarder.

Mellomberegninger Småhus									
Input	Enhet	Byggstandard							
		Eldre	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	TEK07	TEK10	TEK17
Total U-verdi	[W/m ² K]	1,01	0,61	0,57	0,44	0,30	0,24	0,24	0,20
Infiltrasjonstap	[W/m ³ K]	0,12	0,12	0,12	0,09	0,09	0,06	0,06	0,01
Ventilasjonstap	[W/m ² K]	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,12	0,12	0,08

Men for å komme frem til de faktiske tallene for bygget må mellomberegningene ganges opp etter areal og volumtall for det spesifikke bygget. Resultatene etter denne beregningen er presentert i Tabell 8.

Tabell 8: Mellomberegninger for småhus som viser transmisjonstap, infiltrasjonstap og ventilasjonstap for alle TEK-standarder.

Videre mellomberegninger Småhus										
Input	Symbol	Enhet	Byggstandard							
			Eldre	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	TEK07	TEK10	TEK17
Transmisjonstap	Htr	[W/K]	365	222	205	161	109	88	88	74
Infiltrasjonstap	Hinf	[W/K]	51	51	51	41	41	25	25	6
Ventilasjonstap	Hv	[W/K]	63	63	63	63	63	19	19	13

I Tabell 7 vises de store forskjellene på de faktiske tapsforskjellene både mellom de ulike TEK-standardene og fra de tre ulike parameterne: total U-verdi, infiltrasjonstap og ventilasjonstap. Som vist i Tabell 8, kommer det desidert største tapet fra transmisjonen i form av varme gjennom gulv, tak, yttervegger og dører og vinduer. Etter dette følger tapet fra ventilasjon, og hakk i hel også tapet fra infiltrasjonen. Transmisjonstapet i småhus strekker seg fra 356 W/K for bygg i kategorien eldre, til 74 W/K i bygg i kategorien TEK17. Spriket mellom TEK69 (som representerer den største andelen av bygningsmassen i Norge) og TEK17 på 131 W/K viser et stort potensial for forbedring av bygningsmassen. Ventilasjonstapet er likt for alle eldre TEK-standarder, helt frem til TEK07 for småhus som er første standard med antatt varmegjenvinning i ventilasjonen. Den faktiske sammenhengen mellom disse tapsfaktorene og respons- og restitusjonstiden utledes i kapitlene 4.2. og 4.3., men kan enkelt vises med den sammenhengen watt gir som enhet (watt = joule / sekund). Det vil altså si at jo flere joule som tapes fra bygget per sekund, desto kortere blir responstiden. Derfor er disse tapsfaktorene viktig for valg av tiltak som skal gjennomføres.

5.3. Forskyvningsperiode – effektreduksjon og energibesparelse

Som andre ledd i beregningen av lastforskyvningen, eller fleksibiliteten, kommer beregningen av effektreduksjon og energibesparelse. I denne delen antas det også 100 % elektrisk oppvarming og en virkningsgrad på 1. Dette vil si at en direkte sammenligning av potensiell effektreduksjon og effektterspørsel blir vanskelig da effektterspørselen som ligger i markedet på Elhub og Entos-e, er for elektrisitet, mens oppvarming i bygg i dag i stor grad er sammensatt av ulike typer oppvarmingskilder med ulike virkningsgrader. I tillegg må vi ha i mente at effektreduksjon innebærer faktisk tap gjennom bygget, som alternativt ville ha blitt dekket med oppvarming for å holde på temperaturen på samme nivå til enhver tid. Det andre leddet i Excel-beregningen har for øvrig samme oppsett som det første leddet (se kap. 5.2.), med variablene: bygningstype, temperatur, NO-område og oppvarmingseffekt.

Effektreduksjon (forklart i kapittel 4.4.) blir regnet som effektreduksjon ved starttidspunktet til responstiden. Altså kan vi kjøre simuleringen med de tre scenarioene for temperatur (samme som for responstiden), og ender opp med en effektreduksjon for småhus i NO1, presentert i Tabell 9. Tabellen viser høyere effektreduksjoner for de eldre byggene og lavere effektreduksjoner for de nyere byggene. Her gjelder det samme som for respons- og restitusjonstiden – at det er usikkerhet i verdiene på grunn av blant annet varmelagring i møbler og lignende, og disse betingelsene er ikke med i beregningene. Men forholdet mellom verdiene betegnes som gode nok og blir derfor vurdert videre.

Tabell 9: Verdier for effektreduksjon ved responstid start for småhus, NO1 ved ulike utendørstemperaturer. Tallene i seg selv betegnes som urealistisk høye, men differansene mellom de ulike TEK-standardene brukes i videre beregninger.

Effektreduksjon ved responstidens start [W]:			
Bygningsstandard	Årsmiddeltemperatur SIMIEN	Gjennomsnittstemperatur Vinter	Minimumstemperatur 2000-2023
Ute temp.	6,3 °C	-5,1 °C	-20,7 °C
Eldre	6 202	11 664	19 138
TEK 49	4 097	7 926	13 166
TEK 69	3 846	7 480	12 453
TEK 87	3 056	6 077	10 211
TEK 97	2 297	4 730	8 059
TEK 07	1 112	2 627	4 699
TEK 10	1 112	2 627	4 699
TEK 17	525	1 584	3 033

Beregningen av effektbesparelsen avhenger av de samme variablene som beregningen av responstiden. Det vil altså si at årsaken til de store forskjellene mellom TEK-standardene også her kan antas å skyldes at de eldre byggene slipper ut mer varme enn de nyere. Resultatene viser dog at forskjellen mellom TEK69 (som representerer den største delen av bygningsmassen i Norge) og TEK17 ved årsmiddeltemperatur er på 3 321 W. Ved gjennomsnittlig vintertemperatur er differansen på 5 896 W og ved minimumstemperatur i perioden 2000-2023 på 9 423 W. Disse differanse representerer altså det som skjer når man skrur av strømmen til oppvarmingen for å minske effekten. Resultatene viser at du kan spare mindre effekt ved å skru av strømmen til oppvarmingen i et nybygg med standarden TEK17 enn et eldre bygg med standarden TEK69. Men til gjengjeld er responstiden lengre, så effekten vil kunne være skrudd av over en lengre periode i det nyere bygget enn med det eldre.

Energibesparelsen beregnes som integralet mellom referansealternativet, der oppvarmingseffekten holdes stabil for å opprettholde jevn temperatur, og effektforbruket gjennom hele forflytningsperioden (respons- og restitusjonstid), forklart i formel 17. Denne energibesparelsen skal kun brukes til sammenligning da den i utgangspunktet ikke vil utgjøre noen stor besparelse for energisystemet. Men siden den likevel vil påvirke systemet i varierende grad – avhengig av om strømmen er skrudd på til oppvarmingsformål eller ikke, beregnes besparelsen her. Resultatene fra beregningene av energibesparelsen blir presentert Tabell 10 og viser små variasjoner i forbruk til oppvarming (kWh) for et småhus, NO1 ved forskjellige utendørstemperaturer og TEK-standarder. Negativ energibesparelse betyr at bygget vil bruke mer energi på å gjennomføre lastforskyvningen, det vil si mer energi i løpet av restitusjonsperioden enn det som blir spart under responsperioden. Så de positive verdiene for de øvre TEK-standardene gir enda en grunn til at det vil være fordelaktig å prioritere energieffektiviseringstiltak spesielt for de eldre byggene.

Tabell 10: Energibesparelse fordelt på TEK-standarder for de ulike temperaturene. Resultatene gjelder også her for småhus NO1.

Bygnings- standard	Energibesparelse [kWh]:		
	Årsmiddel- temperatur SIMIEN	Gjennomsnitts- temperatur Vinter	Minimums- temperatur 2000-2023
Ute temp.	6,3 °C	-5,1 °C	-20,7 °C
Eldre	-0,04	-0,19	-0,05
TEK 49	-0,06	-0,16	-0,50
TEK 69	-0,06	-0,16	-0,43
TEK 87	-0,06	-0,15	-0,29
TEK 97	-0,08	-0,18	-0,27
TEK 07	0,14	-0,04	-0,10
TEK 10	0,14	-0,04	-0,10
TEK 17	0,67	0,10	0,01

Som beskrevet tidligere blir ikke energibesparelsen vektlagt særlig høyt da den vil utgjøre en liten andel av totalen. Dette viser for eksempel de to ytterpunktene i resultatene på henholdsvis -0,50 kWh for TEK49 ved minimumstemperatur i perioden 2000-2003 og 0,67 kWh for årsmiddeltemperatur SIMIEN. Siden dette gjelder et småhus, sammenlignes resultatene med gjennomsnittlig årlig strømforbruk for eneboliger på 25 000 kWh/år (Fortum, 2023). Det vil si at en enebolig har et gjennomsnittlig dagsforbruk på 68,49 kWh/dag hvor det øvre og nedre ytterpunktet utgjør henholdsvis 0,98 % og 0,73 % av dagsforbruket. Da dette er veldig små andeler av totalen, vil videre beregninger se bort ifra denne marginale energibesparelsen og heller fokusere på effektreduksjon samt respons- og restitusjonstid.

5.4. Definere tiltakspakker

Tiltakspakkene defineres på bakgrunn av seks ulike scenarioer: De tre første scenarioene gjennomfører tiltak på bygningskroppen til småhus, boligblokk og yrkesbygg når det gjelder alle bygg i Norge, mens de to neste scenarioene gjennomfører tiltak på ventilasjonsanleggene for alle boliger og yrkesbygg i Norge. Og det siste scenarioet gjennomfører alle tiltak for alle bygg i Norge. Under hver beskrivelse av scenarioene følger en tabell hvor tiltakene som blir gjennomført, markeres med «x». Tiltakskategoriene presenteres med nav og nummer, mens bygningstypene blir oversatt til bokstaver, som vist på neste side:

Småhus	A	Universitet	F	Idrettsbygning	J
Boligblokk	B	Sykehus	G	Forretningsbygning	K
Barnehage	C	Sykehjem	H	Kulturbygning	L
Kontorbygning	D	Hotellbygning	I	Lett industri	M
Skolebygning	E				

Denne masteroppgaven undersøker forflytningspotensialet for oppvarming opp mot energieffektiviseringspotensialet for bygg. En del av forarbeidet har vært å vurdere hvilke tiltak som kan ha en direkte påvirkning på forskyvningspotensialet. I Vedlegg 3 vises vurderingene som er foretatt og konklusjonene som er trukket. Konklusjonene blir benyttet videre til å forme tiltakspakkene som kan brukes i scenarioene.

Scenario 1: Potensial tilknyttet bygningskroppen i småhus

Den første tiltakspakken inneholder alle tiltakene som påvirker bygningskroppen direkte, det vil si de tiltakene som har effekt på vegger, tak, gulv, vinduer og dører (dette gjelder som en definisjon av bygningskropp). Tiltakene som gjennomføres for bygningskategoriene småhus, presenteres i Vedlegg 4. Disse tiltakene gjennomføres for alle TEK-standarder eldre enn TEK97 og for alle NO-områder.

Scenario 2: Potensial tilknyttet bygningskroppen i boligblokk

Den andre tiltakspakken gjelder bygningskroppen for boligblokker. Tiltakene som gjennomføres for bygningskategoriene boligblokk, presenteres i Vedlegg 5. Disse tiltakene gjennomføres for alle TEK-standarder eldre enn TEK97 og for alle NO-områder.

Scenario 3: Potensial tilknyttet bygningskroppen i yrkesbygg

Denne tiltakspakken inneholder samme tiltak som i scenario 1 og 2, men analyserer nå påvirkningen på yrkesbygg, og ikke boliger. Tiltakene som gjennomføres for bygningskategoriene C til M (forklart i begynnelsen av kapittel 5.4), presenteres i Vedlegg 6. Disse tiltakene gjennomføres for alle TEK-standarder eldre enn TEK97 og for alle NO-områder.

Scenario 4: Potensial tilknyttet ventilasjon i boliger

Ventilasjon defineres her til tiltakene som forbedrer lufttilførsel og varmegjenvinning i ventilasjonssystemet i boliger. Tiltakene gjennomføres for alle TEK-standarder og alle NO-områder. Tiltak som gjennomføres for bygningskategoriene småhus og boligblokk, presenteres i Vedlegg 7. Da to av tiltakene betraktes som ikke relevante for småhus og boligblokker av Multiconsult og NVEs relevansoversikt (Bøhn, 2021), blir de ikke en del av beregningene her.

Scenario 5: Potensial tilknyttet ventilasjon i yrkesbygg

Denne tiltakspakken inneholder samme tiltak som i scenario 4, men her analyseres påvirkningen på yrkesbygg og ikke boliger. Tiltakene som gjennomføres for bygningskategoriene C til M (forklart over), presenteres i Vedlegg 8. Disse tiltakene gjennomføres for alle TEK-standarder og for alle NO-områder.

Scenario 6: Teoretisk potensial

Den siste tiltakspakken definerer potensialet dersom relevante renoveringstiltak blir gjennomført på alle bygninger i Norge. Relevante tiltak defineres i denne oppgaven ut fra Multiconsult og NVEs relevansberegning (Bøhn, 2021). Tiltak som gjennomføres per bygningskategori, presenteres i Vedlegg 9. Bortsett fra tiltak 1-5 og 13, som ikke gjennomføres for TEK97 og nyere standarder, og tiltak 11 som ikke gjennomføres for TEK- 87 og nyere standarder, gjennomføres disse tiltakene for alle TEK-standarder. Tiltakene i det teoretiske potensialet gjennomføres også for alle NO-områder.

5.5. Energieffektiviseringspotensial for tiltakspakker

Python-koden jeg laget sommeren 2023, inneholdt beregninger for småhus og boligblokker, men har siden blitt utvidet med beregninger for yrkesbygg. De nye beregningene er basert på energieffektiviseringsmål i %, hentet fra vedlegget i rapporten fra IFE (Rosenberg, 2023) fordelt på bygningstype, spotprisområde, TEK-standard og renoveringstiltak. Etterspørselsdataene er hentet fra inputfilene i TIMES (samlet for yrkesbygg) fordelt på spotprisområde, men etterspørselsdataene for yrkesbygg er hentet fra en annen kilde enn de for småhus og boligblokk. Derfor kan det være usikkerheter tilknyttet disse tallene. Videre settes «energy service demand» (altså hvor mye mindre etterspørsel det vil være i 2025 og 2050 enn i 2018)

lik som for boligblokk, og dette medfører også noen usikkerheter i beregningene for yrkesbygg. Som vist i tabellene under, antar koden renoveringspotensial for bygg med TEK87 og eldre standarder. Energieffektiviseringspotensialet ved innføring av en tiltakspakke hentes ut ved å kjøre koden, og resultatene presenteres og fordeles på TEK-standard og NO-område.

Scenario 1: Potensial tilknyttet bygningskroppen i småhus

Tabell 11 presenterer den faktiske energibesparelsen i GWh/år i 2025 ved gjennomføring av renoveringstiltak 1 til 4 for småhus. Fordelingen strekker seg fra høy total besparelse for byggene i TEK49-standard og eldre bygg, til mindre energibesparelse fra TEK87. Totalt sett for alle småhus i hele Norge øg med byggstandarder TEK87 og eldre, kan man ved å etterisolere vegg, tak og gulv og bytte vinduer og dører spare over 17,6 TWh/år i 2025. Dette vil si at disse fire (4) tiltakene for småhus alene kan minske det totale oppvarmingsforbruket for bygninger (gitt i kapittel 3.6.) fra omtrent 32 TWh til omtrent 14,4 TWh.

Tabell 11: Viser faktisk besparelse for scenario 1 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025					
Småhus med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	3 190	1 810	392	-	5 392
NO2	2 737	1 418	268	-	4 422
NO3	1 884	973	183	-	3 039
NO4	1 505	787	148	-	2 440
NO5	1 574	669	93	-	2 337
Totalt:	10 890	5 657	1 084	-	17 631

Scenario 2: Potensial tilknyttet bygningskroppen i boligblokk

Tabell 12 presenterer den faktiske energibesparelsen ved gjennomføring av tiltak på bygningskroppen for boligblokker. Tabellen viser også her en høy besparelse for de eldre byggene, aller mest i NO1 og mindre for de nyere byggene. Her vises dessuten den store forskjellen mellom besparelse i småhus kontra boligblokker. Mens den totale besparelsen beregnet for småhus var på hele 17 TWh, er den for boligblokker på mer beskjedne på 1,6 TWh.

Tabell 12: Viser faktisk besparelse for scenario 2 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025 Boligblokk med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	329	106	34	-	470
NO2	287	89	26	-	401
NO3	204	63	18	-	284
NO4	167	53	15	-	234
NO5	178	44	13	-	234
Totalt:	1 164	354	105	-	1 624

Scenario 3: Potensial tilknyttet bygningskroppen i yrkesbygg

Tabell 13 viser den faktiske energibesparelsen ved gjennomføring av samme renoveringstiltak som scenario 1 og 2, men nå for yrkesbygg. Dette gir samme fordeling her; med størst potensial for besparing for de eldre byggene og mest i NO1. Den totale besparelsen er på 2,5 TWh, omtrent 1,5 ganger så mye som for boligblokker.

Tabell 13: Viser faktisk besparelse for scenario 3 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025 Yrkesbygg med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	607	330	95	-	1 032
NO2	382	187	52	-	621
NO3	218	104	29	-	352
NO4	138	69	16	-	223
NO5	196	79	22	-	297
Totalt:	1 542	768	215	-	2 525

Totalt for de tre bygningskategoriene viser beregningene at de fire tiltakene på alle bygningskroppen samlet kan bidra med en energibesparelse på ikke ubetydelige 21,8 TWh: Dette utgjør tross alt 68 % av det totale oppvarmingsforbruket i bygg på omtrent 32 TWh, gitt i kapittel 3.6.

Scenario 4: Potensial tilknyttet ventilasjon i boliger

Tabell 14 viser samlet energibesparelse ved å gjennomføre renoveringstiltak som forbedrer ventilasjonen for småhus og boligblokker. Den totale energibesparelsen er på cirka 3,3 TWh, i motsetning til de tidligere scenarioene hvor energibesparelsen i NO1 og NO2 er noe større for

TEK69 enn TEK49. Her er inputdataene, kravene for TEK-standardene, like for alle standardene for parameterne «luftmengde ventilasjon» og «varmegjenvinning ventilasjon». Dette vil si at forskjellene i energibesparelse, vist i Tabell 14, avhenger av antall bygg i de forskjellige standardene i de forskjellige NO-områdene og det faktiske energiforbruket til byggene.

Tabell 14: Viser faktisk besparelse for scenario 4 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025 Boliger med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	386	407	134	-	927
NO2	327	333	90	-	750
NO3	233	228	65	-	527
NO4	192	191	131	-	513
NO5	326	160	58	-	544
Totalt:	1 463	1 319	479	-	3 261

Scenario 5: Potensial tilknyttet ventilasjon i yrkesbygg

Tabell 15 viser energibesparelsen ved gjennomføring av tiltak for ventilasjon for yrkesbygg. Her er samlet total energibesparelse på cirka 1,4 TWh. Scenario 5 følger ikke den samme skjevheten i resultatene mellom TEK-standardene som ble beskrevet i scenario 4; scenario 5 viser størst besparelse for de eldre byggene for alle områdene og størst besparelse totalt i NO1.

Tabell 15: Viser faktisk besparelse for scenario 5 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025 Yrkesbygg med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	329	198	37	-	563
NO2	210	113	20	-	343
NO3	118	63	11	-	192
NO4	73	40	6	-	119
NO5	104	45	8	-	157
Totalt:	833	458	83	-	1 374

Oppsummert er den totale besparelsen ved renovering av ventilasjon for alle bygg på drøyt 4,6 TWh. Men sammenlignet med 21,8 TWh for alle bygg, som følge av tiltak på bygningskroppen (se scenario 3), vil tiltak på ventilasjon ha en mye mindre betydning.

Scenario 6: Teoretisk potensial

Tabell 16 viser total energibesparelse ved innføring av alle tiltak for alle bygg. Den totale energibesparelsen på 24,5 TWh kan realiseres, og som vist i de tidligere scenarioene, vesentlig som følge av tiltak på bygningskropper, men også understøttet av en god andel fra forbedringstiltak på ventilasjon. Det totale teoretiske potensialet, potensialet hvis alle tiltakene blir utført, er her mindre enn summen av potensialene tilknyttet reovering av bygningskroppen og ventilasjonen. Dette viser hvordan energibesparelsen per tiltak henger sammen med de andre innførte tiltakene; dette er også beskrevet i kapittel 3.4.

Tabell 16: Viser faktisk besparelse for scenario 6 over NO-område og TEK-standard.

Faktisk besparelse [GWh/år] 2025					
Alle bygg med punktoppvarming					
	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	Totalt:
NO1	4 531	2 626	651	-	7 809
NO2	3 704	1 964	431	-	6 099
NO3	2 502	1 321	287	-	4 111
NO4	1 955	1 049	265	-	3 269
NO5	2 153	915	182	-	3 251
Totalt:	14 846	7 876	1 816	-	24 539

5.6. Dagens forskyvningspotensial i Norge

For å finne dagens forskyvningspotensial i bygg må beregningene per bygg først aggregeres opp til antall bygg per bygningstype, TEK-standard og NO-område i Norge. Metoden for dette blir beskrevet i kapittel 4.7. Andre del av aggregeringen går ut på å finne den andelen av forskyvningspotensialet som påvirker strømforbruket. Da forskyvningspotensialet påvirkes av varme som siver ut av bygget, må vi ta hensyn til at ulike oppvarmingsteknologier har ulike virkningsgrader og bidrar til totalen med ulike andeler. Altså blir først den totale effektreduksjonen ganget med virkningsgradene samt andelene til de forskjellige oppvarmingsteknologiene før andelene fra oppvarmingsteknologiene som ikke er strøm, blir trukket fra totalen. Andelene som trekkes fra, er beregnet med bakgrunn i etterspørselsdata fra IFE-TIMES, som presenteres i kapittel 3.6 og vises som andeler av totalt oppvarmingsforbruk i Vedlegg 10. Det vil si at for å få strøm-effektreduksjonen for småhus, TEK49, NO1 må effektreduksjonen først ganges med antall småhus for TEK49 i NO1, deretter

ganges med 1 minus «andelen som ikke er strøm (her 11 %)», og helt til slutt ganges med 1 minus «andelen som må trekkes fra på grunn av effektivitet». Denne siste andelen er beregnet med bakgrunn i blant annet effektiviteter/virkningsgrader til oppvarmingsteknologier og andeler av de ulike oppvarmingsteknologiene for hvert område. Dette er et forenklet regnestykke da prosentandelene for å finne strøm-effektreduksjonen, er like for alle bygg i alle TEK-standarder, kun fordelt på NO-områder. Derfor vil de totale verdiene videre bli presentert med fordelinger for hvert NO-område.

5.6.1. Dagens forskyvningspotensial totalt

Første runde med simuleringer til aggregeringsformål blir kjørt som scenarioer for dagens forskyvningspotensial. Simuleringene skal gjøres for de tre temperaturene som oppgis i kapittel 5.1.3, og deles inn etter NO-område. Første simulering er kjørt med «årlig middeltemperatur SIMIEN» som oppgis i Tabell 4. Resultatene fra første simulering er presentert i Tabell 17. Som nevnt tidligere, er det noen feil i modellen da det finnes tilfeller hvor respons- og restitusjonstiden ikke kommer ned til nedre komforttemperatur eller opp til øvre komforttemperatur. Dette kan skyldes for lav oppvarmingseffekt eller for høy utetemperatur i forhold til gitt effekt fra elementer som personer og utstyr i bygget. I disse tilfellene markeres feilen i modellen, og resultatene som gjelder bygget i den aktuelle standarden for området, blir ikke regnet med som en del av totalen. Dette gjør at det totale teoretiske forskyvningspotensialet kan være større enn angitt, men tallene betraktes som gode nok – selv med noen mangler. For å forstå tabellene under er det viktig å ta med seg at målet med lastforskyvningen vil være å få størst mulig effekt over lengst mulig tid.

Tabell 17: Total strøm-effektreduksjon over responstid ved årsmiddeltemperatur fra SIMIEN.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid (mer enn) ved årsmiddeltemperatur SIMIEN					
	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
1 min:	4 648	2 413	1 838	1 603	1 099
5 min:	3 214	1 775	620	446	795
10 min:	603	419	184	149	176
15 min:	319	210	168	89	80
20 min:	288	200	114	71	64
25 min:	208	134	88	71	57
30 min:	171	76	73	20	38
40 min:	170	76	19	20	29
50 min:	170	58	19	-	29
60 min:	40	59	19	-	29
70 min:	40	59	19	-	29
80 min:	40	59	19	-	-
90 min:	40	59	-	-	-
100 min:	40	-	-	-	-
110 min:	40	-	-	-	-
120 min:	-	-	-	-	-

Resultatene med årsmiddeltemperatur viser et forskyvningspotensial for NO1 på 3 214 MW de første 5 minuttene, og videre 288 MW i 20 minutter, 170 MW i 50 minutter og 39 MW i 110 minutter. Det er NO1 som har den lengste samlede responstiden ved årsmiddeltemperatur, og også den høyeste strøm-effektreduksjonen totalt sett. Men som vist i Tabell 17 har byggene i NO2 høyere effektreduksjon enn i NO1 i tidsperioden mellom 60 og 90 minutter.

Andre runde med modellering kjøres for gjennomsnittlig vintertemperatur (oppgitt i Tabell 4). Resultatene presenteres i Tabell 18 og sammenlignes med effektene fra Tabell 17 – ha da i mente de ulike tids-skalaene på minuttbasis. Mens den lengste responstiden var på 110 minutter ved årlig middeltemperatur, er den ved gjennomsnittlig vintertemperatur (Tabell 18) på 50 minutter. Ellers ser vi også en mye høyere start ved ett minutt, som for NO1 her er på 10 811 MW, mot 4 648 MW ved årsmiddeltemperatur. Men tabellen viser også at effekten til forskyvningspotensialet synker mye forttere når temperaturen nå er kaldere og at responstiden blir kortere.

Tabell 18: Total strøm-effektreduksjon over responstid ved gjennomsnittlig vintertemperatur.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid (mer enn) ved gjennomsnittlig vintertemperatur					
	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
0,5 min:	10 811	4 997	3 601	3 439	2 159
1 min:	10 811	4 997	3 601	3 439	2 159
2 min:	7 855	4 992	2 613	1 729	2 157
3 min:	2 849	3 553	977	523	1 452
4 min:	1 702	1 303	565	341	563
5 min:	981	939	335	331	390
10 min:	626	397	206	90	180
15 min:	189	257	70	3	119
20 min:	11	88	3	3	41
25 min:	9	81	3	2	38
30 min:	1	11	3	2	4
40 min:	-	2	0	2	1
50 min:	-	2	-	2	-
60 min:	-	-	-	-	-
70 min:	-	-	-	-	-
80 min:	-	-	-	-	-

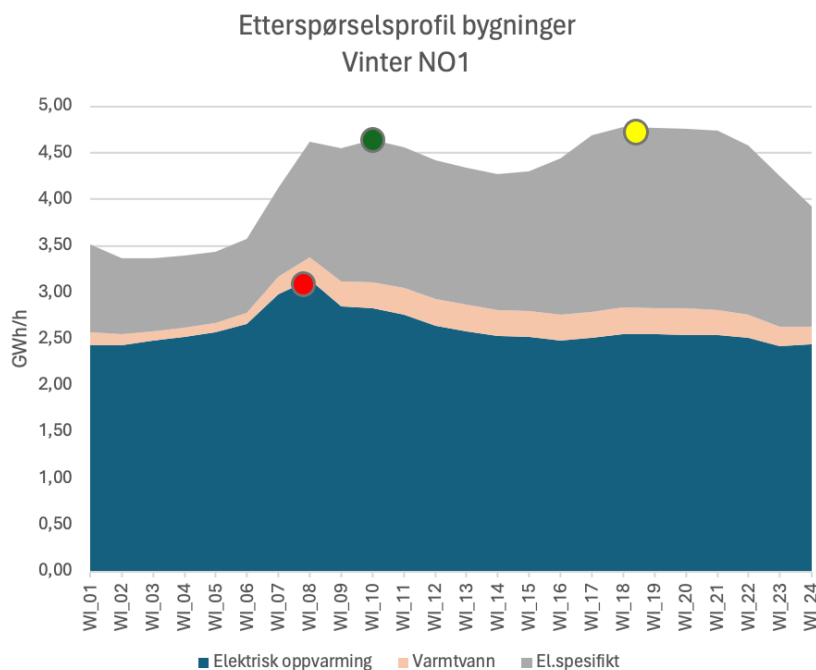
Tredje runde modellering kjøres for minimumstemperaturer 2000-2023 (se Tabell 4). Resultatene med minimumstemperatur 2000-2023 blir presentert i Tabell 19. Effektene er her delt inn etter samme tidsskala som ved gjennomsnittlig vintertemperatur (Tabell 18) – så dataene kan enkelt sammenlignes. Ved NO1s første 30 sekunder vises det nesten en dobling fra 10 811 MW (ved gjennomsnittlig vintertemperatur) til 19 393 MW (ved minimumstemperatur). Men til gjengjeld varer den lengste responstiden for NO1 bare 15 minutter ved minimumstemperatur kontra 30 minutter ved gjennomsnittlig vintertemperatur. Det er også viktig å bemerke at i motsetning til de andre rundene med modellering, er det NO5 som har den lengste responstiden ved minimumstemperatur. Dette har nok en sammenheng med at det også her, i store deler av Vestlandet, er litt lavere temperatur enn i de andre NO-områdene.

Tabell 19: Total strøm-effektreduksjon over responstid ved minimumstemperatur 2000-2023.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid (mer enn) ved minimumstemperatur 2000-2023					
	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5
	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
0,5 min:	19 394	12 966	7 336	4 429	4 002
1 min:	15 423	10 085	5 317	4 227	3 998
2 min:	3 209	2 110	1 161	761	1 088
3 min:	2 087	1 420	811	484	430
4 min:	2 081	1 191	601	466	416
5 min:	1 497	835	476	347	402
10 min:	60	46	24	19	21
15 min:	49	-	-	11	6
20 min:	-	-	-	9	6
25 min:	-	-	-	9	6
30 min:	-	-	-	-	1
40 min:	-	-	-	-	1
50 min:	-	-	-	-	1
60 min:	-	-	-	-	-
70 min:	-	-	-	-	-
80 min:	-	-	-	-	-

I tolkningen av analyseresultatene er det viktig å fokusere på forholdstallene, differansen mellom beregningene, og ikke for mye på andelen effekt fra start til slutt eller tidene hver for seg. Derfor skal analyseresultatene videre brytes ned på TEK-standard og bygningstyper for eventuelt å finne ut hvilke elementer som forandres, ved for eksempel ulike betingelser for temperatur. I teorien burde effektreduksjonen i starttidspunktet av responstiden vært likt med oppvarmingsetterspørselen i tidspunktet. Til sammenligning er etterspørselsprofilen til bygg i NO1 basert på prognosen for en gjennomsnittlig vinterdag (vist i Figur 22). På figuren er det markert tre punkter med hver sin farge. Årsaken til at vi tar hensyn til alle tre punktene, er blant annet at også elektrisk utstyr avgir varme og tas med i regnestykket for forflytningspotensialet. Når det gjelder det røde punktet som finner sted klokken 08 på morgenen, er oppvarmingsetterspørselen på 3 130 MW. Til sammenligning viser beregningene her med gjennomsnittlig vintertemperatur at man kan skru av 10 811 MW med effekt ved responstids start. Beregningene her tilsier altså at byggene taper mye mer varme enn den energien som blir brukt til oppvarming. Og hvis dette hadde skyldtes at utstyr genererer mer varme enn antatt, burde de aktuelle 10 811 MW i hvert fall vært under

forbrukstoppene, vist med den grønne eller gule prikken på henholdsvis 4 640 MW og 4 780 MW; men dette er fortsatt langt unna. Beregningen ved årsmiddeltemperatur passer her akkurat innenfor den øvre forbrukstoppen vinter, men denne sammenligningen betraktes som ugyldig i vurderingen av punktligheten til verdiene. Denne forskjellen kan også skyldes spesifikk varmekapasitet i elementene i byggene, og som eksempel er det ikke regnet med varme som er lagret i møbler inne i bygningen (spesifikk varmekapasitet). Dette vil også gjelde for den totale responstiden, som derfor heller ikke kommenteres her, men skal brukes videre i sammenligninger av resultatene. Andre eventuelle faktorer som måtte påvirke beregningene av effektreduksjonen, kunne blitt undersøkt nærmere, men prioriteres ikke da dette vurderes som unødvendig for besvarelse av en av problemstillingene. Analysearbeidet fortsetter videre for størrelser og andeler innad i beregningene.



Figur 22: Etterspørselsprofil bygninger for en gjennomsnittlig vinterdag NO1.

Restitusjonstiden ved dagens forskyvningspotensial blir beregnet med bakgrunn i oppvarmingseffekt og effektreduksjon under restitusjonstid. Restitusjonstid blir betegnet til i stor grad å variere avhengig av hvilken oppvarmingseffekt som velges, og så lenge oppvarmingseffekten er stor nok til å varme opp bygget, ser restitusjonstiden ut til å påvirke resultatene lite. Derfor blir ikke restitusjonstiden presentert, men likevel regnet ut for å brukes videre i beregningen av energibesparelse ved innføring av renoveringstiltak.

For å se videre på sammenhengene mellom effektreduksjonene uten å ta hensyn til totalene, analyseres sammenhengen mellom effektreduksjon og TEK-standardene og effektreduksjon og bygningstypene. De videre analysene begrenses kun for NO1 for å forenkle mellomregningene for sammenhengene.

5.6.2. TEK-standarder og underliggende beregninger, NO1

I kapittel 5.2.1 ble transmisjons-, infiltrasjons- og ventilasjonstapet for ett enkelt bygg analysert for ulike TEK-standarder. I inneværende kapittel, derimot, vil jeg se nærmere på andelene av de ulike TEK-standardene samt hva de totale strøm-effektberegningene blir for den totale bygningsmassen for de ulike TEK-standardene i NO1. Disse beregningene legger gjennomsnittstemperatur vinter til grunn da disse hadde færrest feil under kjøring av modellen. Dersom jeg henter inn igjen effekttrappen i Tabell 1 og sammenligner med Tabell 20 som viser effektreduksjon over responstid fordelt på TEK-standard, kan beregningene sammenlignes med når det kostnadmessige behovet for forflytning er størst. Antall bygg er også tatt med for å vise hvor mange bygg som faktisk er lagt til grunn for den totale effektberegningen. Da modellen dessverre feilet og ikke kjørte som den skulle for noen av byggene, faller disse naturlig nok ut av beregningene.

Tabell 20: Viser total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid for NO1, fordelt på TEK.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid minutter (mer enn) for NO1												
Bygg-standard	Ved responstid start [MW]	2	4	6	8	10	15	20	30	40	Antall bygg	Effektred. ved start per bygg
		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]		[kW]
Eldre	2 429	284	1	-	-	-	-	-	-	-	251 445	10
TEK 49	1 836	1 789	180	-	-	-	-	-	-	-	229 070	8
TEK 69	3 641	3 110	-	-	-	-	-	-	-	-	466 870	8
TEK 87	992	758	-	-	-	-	-	-	-	-	129 950	8
TEK 97	791	791	521	-	-	-	-	-	-	-	127 793	6
TEK 07	263	263	148	126	54	-	-	-	-	-	52 499	5
TEK 10	250	250	242	191	75	17	8	8	-	-	82 741	3
TEK 17	609	609	609	609	609	609	181	3	1	-	457 123	1

Tabellen viser som antatt at byggene med nyest TEK-standard har lengst responstid og også minst effektreduksjon da de slipper ut mindre effekt på grunn av deres høye tekniske standard. Dette ser man spesielt tydelig av strøm-effektreduksjon ved responstid start per

bygg (til høyre i oversikten), hvor bygg i kategorien eldre har hele 10 kW mot 1 kW i TEK17 (disse tallene samsvarer ikke helt med tallene i kapittel 3.6. da de kun gjelder for den delen av oppvarmingen som kommer fra strøm, og ikke den totale effekten som siver ut av bygget).

Beregningene viser også to hopp for TEK69 og TEK87 som her har kortere responstid enn TEK49. Dette fant jeg ikke logisk i forhold til antakelsen om at nyere TEK-standard er av høyere kvalitet og medfører i regelen lengre responstid (se tidligere forklart i kapittel 5.2). Derfor undersøkes dette nærmere. Ved å gå gjennom de ulike faktorene for beregningen av effektreduksjonen kom jeg fram til at feilen i antagelsen, ligger i beregningen av ventilasjonstapet. Ventilasjonstapet (formel 11) beregnes ut fra varmekapasitetskonstanten, varmegjenvinningen i ventilasjonen og ventilasjonsluftmengden. Forskjellen jeg fant, ligger i en sammensetning av varmegjenvinningen og luftmengden. Som eksempel har TEK49 0 % varmegjenvinning jevnt over. Dette er også tilfellet for TEK69, mens TEK87 er den første TEK-standard med krav om varmegjenvinning, og den er her på 60 %. Mens en skolebygning med TEK49 har en ventilasjonsluftmengde på $2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, har en skolebygning i TEK69 og TEK87 en ventilasjonsluftmengde på henholdsvis $7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ og $16 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Ventilasjonsluftmengden på $16 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ fortsetter også i TEK97, men da med en varmegjenvinning på 65 %. Så her går totalt effektbehov litt ned igjen. Dette viser at ventilasjonsanlegg i TEK69 og TEK87 har stor påvirkning, og at tiltak i tilknytning til ventilasjonsanlegg derfor kan utgjøre en forskjell på effektreduksjonen. Antall bygg innenfor TEK69 og TEK87, som samlet står for 33 % av totalt antall bygg i NO1, taler også for at det kan være lurt å renovere her.

5.6.3. Bygningstyper og underliggende beregninger, NO1

Strøm-effektreduksjon over responstid varierer også mellom de ulike bygningstypene. I Tabell 21 presenteres resultatene fra strøm-effektberegningene per bygningstype i NO1 over tid. I tabellen kan vi se forskjeller mellom bygningstypene. Den største andelen effektreduksjon, både ved startpunktet og en god stund fremover, kommer fra småhus. Ellers bidrar også boligblokk, kontor, skole, sykehus og hotell med store andeler av totalen. Utenom dette har også forretning en stor effektreduksjon ved responstids start, men responstidene er veldig korte, så her er det nødvendig å sjekke hvilke faktorer som spiller inn. Ved gå nærmere inn i mellomregningene til forretning kan vi først se relativt normalt transmisjonstap, som stort sett er veldig likt med flere andre bygningskategorier per TEK-standard. Infiltrasjonstapet holder

seg også veldig likt på tvers av bygningstypene med lik TEK-standard. Men ventilasjonstapet skiller seg ut. Ved TEK87 og TEK97 er ventilasjonstapene så høye som 2,64 W/m²K og 2,31 W/m²K. Dette er enda høyere enn de som var trukket fram for skolebygning i forrige del, med et ventilasjonstap på 2,31 W/m²K og 2,11 W/m²K for henholdsvis TEK69 og TEK87. Til sammenligning ligger ventilasjonstapet til forretningsbygning med TEK49 på 0,66 W/m²K og TEK17 på 0,79 W/m²K. Også for forretningsbygningene begynner varmegjenvinningen i ventilasjonen på TEK87, men her går også ventilasjonsluftmengden fra 5 m³/hm² i TEK67 til 20 m³/hm² i TEK87. Og videre 65 % varmegjenvinning og ventilasjonsluftmengde på 20 m³/hm² for TEK97. Så også her vil de dårlige ventilasjonssystemene utgjøre de største forskjellene på effektreduksjonen over tid.

Tabell 21: Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid for NO1.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på responstid minutter (mer enn) for NO1												
Byggtype	Ved responstid start [MW]	2	4	6	8	10	15	20	30	40	Antall bygg	Effektred. ved start per bygg [kW]
		[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]		
Småhus	6 060	4 390	907	582	395	395	-	-	-	-	1 628 808	4
Boligblokk	1 527	1 090	430	269	269	178	178	-	-	-	118 775	13
Barnehage	32	13	7	5	5	5	-	-	-	-	5 339	6
Kontor	804	804	64	29	29	8	8	8	-	-	10 498	77
Skole	348	199	23	7	7	7	-	-	-	-	5 485	63
Universitet og høgskole	82	32	19	2	2	2	-	-	-	-	895	91
Sykehus	189	96	2	2	2	2	2	2	-	-	1 869	101
Sykehjem	157	77	8	8	8	8	-	-	-	-	2 614	60
Hotell	186	111	21	15	15	15	-	-	-	-	3 539	53
Idrett	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	6	148
Forretning	1 090	916	207	-	-	-	-	-	-	-	12 225	89
Kultur	91	73	9	6	6	6	-	-	-	-	1 629	56
Lett industri, verksted	244	52	3	1	1	1	1	1	1	-	5 809	42

5.6.4. TEK-standard og bygningstype samlet, NO1

Den siste sammenligningen som viser dagens potensial for forskyvning, og der hvor forskyvningen befinner seg, blir presentert i Tabell 22. Her ser vi strøm-effektreduksjon fordelt på de forskjellige TEK-standardene og bygningstypene. Tabellen viser summen av effektreduksjonen med en responstid på mer enn 3 minutter i gjennomsnittstemperatur i

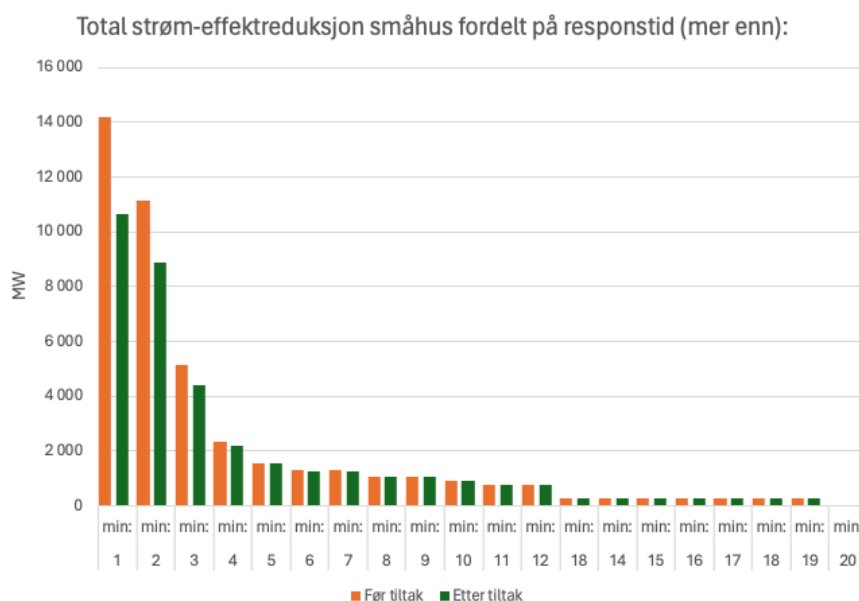
vinterscenarioet. Noen av rutene er markert i rødt – de som ikke har noen effektreduksjon selv ved starttidspunktet – altså er ingen bygg med i den totale beregningen. Det betyr ikke at disse byggene ikke finnes, bare at modellen ikke gir korrekt responstid eller restitusjonstid, og at resultatet derfor blir betraktet som feil. Dette gjelder altså for en del av yrkesbyggene for TEK17 og Idrettsbygg med alle standarder utenom eldre. Påviste feil tilknyttet TEK17 kan for flere av tilfellene forklares ut fra for lite varmetap i forhold til varmetilførsel. Responstiden kan derfor ikke beregnes med gjeldende modell. Mange mennesker oppholder seg i de aktuelle byggene i driftstiden og i det tidspunktet beregningene blir gjort, typisk nok. Og da mange mennesker tilfører mye varme, fører dette til usikre beregninger. Idrettsbygget skiller seg videre fra de andre bygningstypene ved at det har en lavere øvre og nedre komfortgrense. Denne typen bygg har mye ventilasjonstap ved TEK69, og også her er det mange mennesker som gir varmetilførsel i driftstiden, og på den måten vil være skyld i at disse beregningene får en feilmelding. Ellers ser vi at ved en responstid på 3 minutter er det en del som har gått tom for effektreduksjon (hvite tomme felt), spesielt ved de gamle TEK-standardene for boliger og ved gamle eller mellom-gamle standarder for yrkesbygg. Som kjent, kan større verdier ved TEK49 enn ved TEK87 skyldes endringen i kravene for ventilasjon.

Tabell 22: Total strøm-effektreduksjon fordelt på TEK og bygningstype ved 3 minutters responstid for NO1.

Total strøm-effektreduksjon fordelt på TEK og Bygningstype med mer enn 3 minutters responstid for NO1									
Byggtype	TEK	Eldre	TEK49	TEK69	TEK87	TEK97	TEK07	TEK10	TEK17
	Småhus		-	-	-	444	325	72	116
Boligblokk		-	-	-	101	161	33	58	178
Barnehage		-	-	-	-	-	2	2	5
Kontor		122	174	-	-	35	21	8	-
Skole		23	72	-	-	-	17	7	-
Universitet og høyskole		5	14	-	-	-	3	2	-
Sykehus		-	29	-	-	-	9	2	2
Sykehjem		-	-	-	-	-	11	5	8
Hotell		-	-	-	-	-	8	6	15
Idrett		1	-	-	-	-	-	-	-
Forretning		55	167	-	-	-	81	41	-
Kultur		-	-	-	-	-	4	3	6
Lett industri, verksted		-	-	-	-	-	2	0	1

5.7. Forskyvningspotensialet med tiltakspakker

Resultatene fra beregningen av forskyvningspotensialet beskriver hvilke faktorer i utregningen som blir endret som følge av at tiltaket er gjennomført, samt effektreduksjon over responstid sammenlignet med dagens situasjon for alle scenarioene. Årsmiddeltemperatur blir, på samme måte som i tidligere beregninger, lagt til grunn. De totale strøm-effektreduksjonene over responstid blir derfor presentert for alle småhus i Norge. Som en forenkling antas det at renoveringstiltakene iverksettes ved 50 % av alle småhus jevnt fordelt over hele landet. Denne antakelsen er med bakgrunn i beregningen av blant annet andelen som ønsker å gjennomføre tiltak, som nevnt i kapittel 3.3. Dette vil altså si at for 50 % av alle småhus med lavere TEK-standard enn TEK17 skal transmisjonstapet oppgraderes til TEK17 (med blant annet total U-verdi på 0,20 W/m²K). Figur 23 illustrerer forholdet mellom effektreduksjon over responstid før og etter innføring av tiltak, her for scenario 1.



Figur 23: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 1,

Scenario 1: Potensial tilknyttet bygningskroppen i småhus

Som Vedlegg 4 viser, omfatter scenario 1 følgende renoveringstiltak: etterisolering vegg, etterisolering tak, etterisolering gulv og utskifting vinduer og dører for alle småhus. Beregningene antar at påvirkningene fra tiltakene skjer i transmisjonstapet. Altså ved beregningene av total U-verdi.

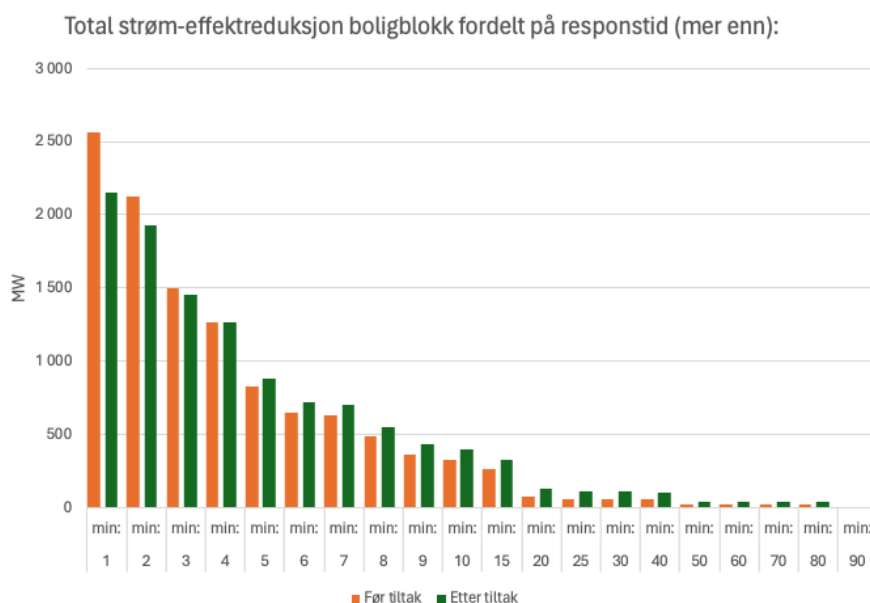
I Figur 23 presenteres resultatene for scenario 1. Som vist, forblir den øvre responstiden det samme før og etter innføring av tiltak. Strøm-effektreduksjonen ved starttidspunktet er høyere før innføringen av tiltak enn etter. Dette er fordi effektbesparelsen avhenger av effektbruken, og byggene som er renoverte, vil bruke mindre effekt på oppvarming. Videre viser tallene at etter omtrent 11 minutter er effektbesparelsen i scenario 1 høyere som følge av tiltak, enn uten tiltak. Og den forblir høyere ut responstiden. Differansen på strøm-effektbesparelsen mellom scenario 1 og før tiltak er presentert i Tabell 23 (negative tall viser til mer effekt før tiltak).

Tabell 23: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 1) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 1 etter tiltak over responstid:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Effekt-reduksjon [MW]	(3532)	(2277)	(775)	(141)	(42)	(16)	(18)	(1)	(2)	(2)	7	7	4	3	3	3	3	3	3	-

Scenario 2: Potensial tilknyttet bygningskroppen i boligblokk

Scenario 2 er beskrevet med Vedlegg 5 og inneholder de samme tiltakene som scenario 1, bare for boligblokker istedenfor småbygg. Resultatene fra scenario 2 presenteres i Figur 24 og Tabell 24. Her ser vi også hvordan effektreduksjonen fra de ikke-renoverte byggene starter på et høyere nivå enn for de renoverte, for så å gradvis synke ettersom minuttene går. Denne skiftningen ser vi for scenario 2 allerede ved 5 minutter. Den totale responstiden er her også lik både før og etter tiltak og er på over 80 minutter.



Figur 24: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 2.

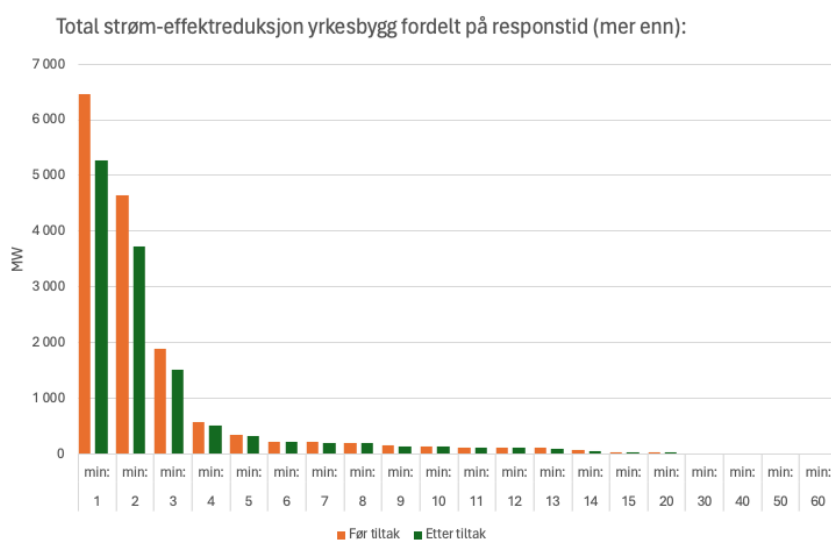
Tabell 24: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 2) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 2 etter tiltak over responstid:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
Effekt-reduksjon [MW]	(414,1)	(196)	(43)	(5)	57	70	69	67	73	71	59	54	49	49	47	20	20	20	20	-

Som en del av sammenligningen av scenarioene viser Figur 23 og Figur 24 en forskjell i hvor mye strømeffekt som reduseres i responstiden for småhus og boligblokk (legg merke til forskjellige inndelinger på x-aksene i figurene). Småhus har en mye høyere andel effektreduksjon ved starttidspunkt enn boligblokk, men mye av potensialet for effektreduksjon forsvinner også fort. Kurven til boligblokk viser en slakere kurve. Dette kan bety at det i denne kategorien er en veldig kort responstid kun for en mindre andel bygg.

Scenario 3: Potensial tilknyttet bygningskroppen i yrkesbygg

Scenario 3 er beskrevet med Vedlegg 6 og inneholder de samme tiltakene som scenario 1 og 2, bare denne gangen for alle yrkesbygg. Resultatene fra scenario 3 presenteres i Figur 25 og Tabell 25. Også her starter effektreduksjonen høyere for de ikke-renoverte byggene i begynnelsen, og de renoverte byggene tar så vidt igjen de ikke-renoverte mot slutten (ved 30 minutter). Dette er veldig mye senere i løpet av den totale responstiden enn for både småhus og boligblokk, og noe som bør tas med videre i vurderingen. Differansen er også veldig liten sammenlignet med de tidligere scenarioene. Dette viser at innføring av tiltak har lav påvirkning på forflytningspotensialet i scenario 3.



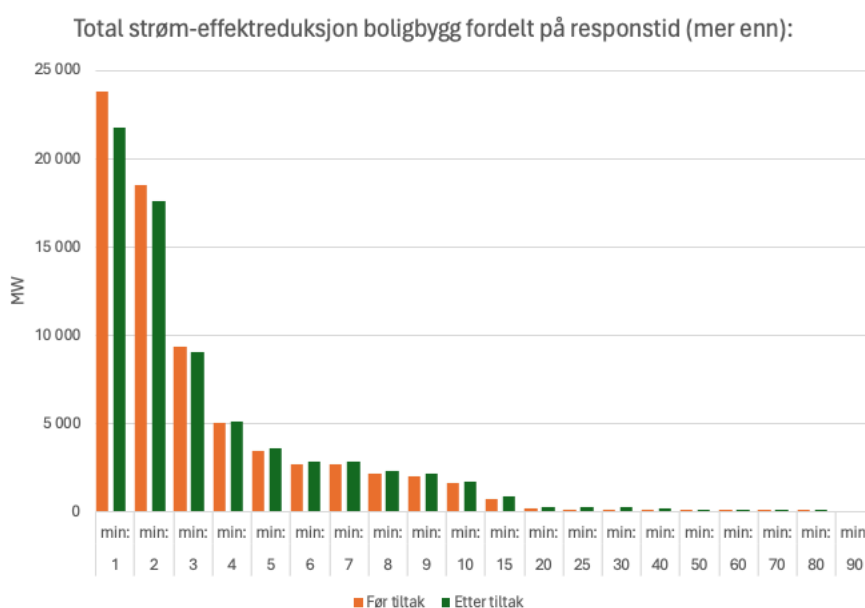
Figur 25: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 3.

Tabell 25: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 3) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 3 etter tiltak over responstid:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	60
Effekt-reduksjon [MW]	(1 193)	(903)	(375)	(57)	(19)	(12)	(11)	(11)	(6)	(3)	(2)	(2)	(2)	(0)	(0)	(0)	0,2	0,1	0,0	-

Scenario 4: Potensial tilknyttet ventilasjon i boliger

Scenario 4 omfatter forbedring av varmegjenvinning i ventilasjon for småhus og boligblokker (beskrevet i Vedlegg 7). Også ventilasjonen antas å kunne bli forbedret i 50 % av byggene. Ventilasjonstapet vil for småhus reduseres fra TEK49 på 0,40 W/m²K til TEK17 på 0,08 W/m²K og for boligblokk reduseres fra 0,50 W/m²K til 0,10 W/m²K i respektive standarder. Resultatene for scenario 4 vist i Tabell 26 og Figur 26 viser også her en negativ differanse (som betyr at effektreduksjonen er størst før tiltak) i den første perioden etter responstid start. Men allerede etter 4 minutter er effektreduksjonen større ved byggene som har gjennomført forbedring av varmegjenvinningen i ventilasjonen. Og den holder seg helt frem til en responstid på over 80 minutter for noen bygg.



Figur 26: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 4.

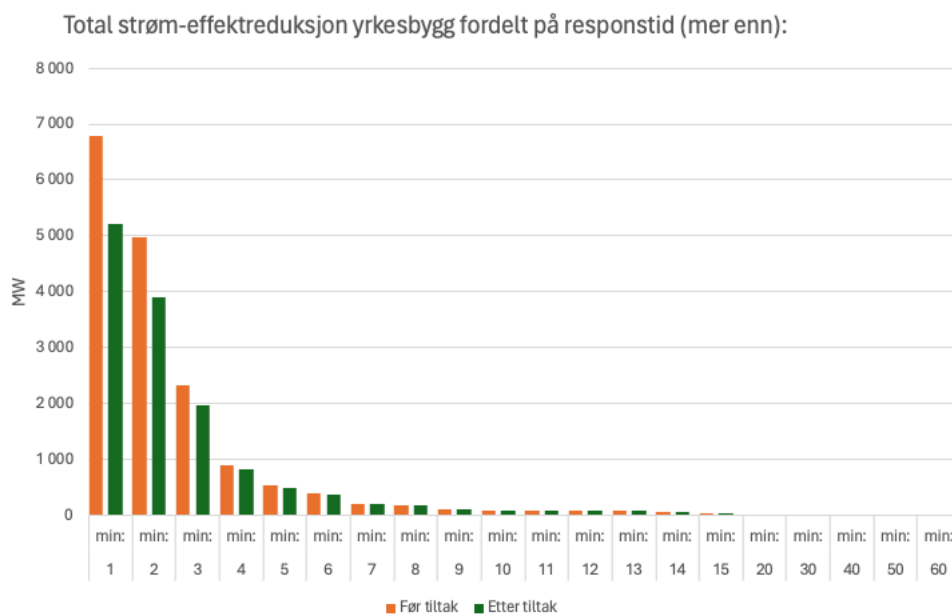
Tabell 26: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 4) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 4 etter tiltak over responstid:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
Effekt-reduksjon [MW]	(2 036)	(961)	(245)	94	162	169	166	147	150	144	144	120	109	109	99	35	35	35	35	-

Scenario 5: Potensial tilknyttet ventilasjon i yrkesbygg

Scenario 5, beskrevet i Vedlegg 8, omfatter forbedring av elementer for både luftmengden og for varmegjenvinningen til ventilasjon for yrkesbygg. Ventilasjonstapet for yrkesbygg spriker veldig og endres nå, for eksempel for en skolebygning: På sitt verste var ventilasjonstapet her på 2,31 W/m²K ved TEK69, mot et langt mindre tap på 0,63 W/m²K ved TEK17. Og for forretning, som ved TEK87 har et tap på 2,64 W/m²K, skjer det også store forandringer: På grunn av oppgraderingene leser vi tapet til å være på kun 0,79 W/m²K ved TEK17.

Resultatene for scenario 5, presentert i Figur 27 og Tabell 27, viser her, som for de andre scenarioene, at effektbesparelsen i begynnelsen er høyest for byggene uten innføring av renoveringstiltak. Og videre utover i responsperioden, her etter 10 minutter, blir effektbesparelsen for byggene med innføring av tiltak, litt bedre.



Figur 27: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 5.

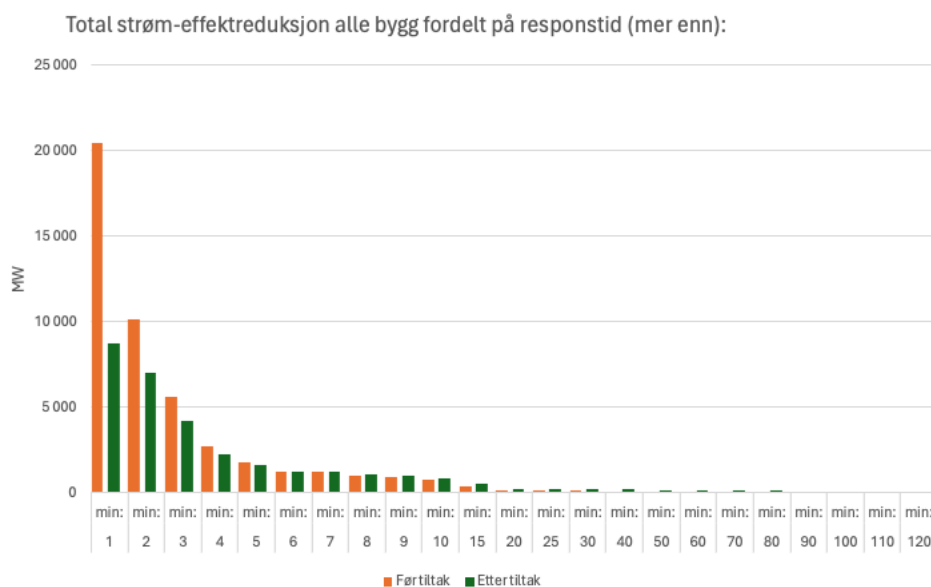
Tabell 27: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 5) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 5 etter tiltak over responstid:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	60
Effekt-reduksjon [MW]	(1 577)	(1 070)	(375)	(61)	(44)	(15)	3	3	(1)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,1	0,0	0,0	-

Scenario 6: Teoretisk potensial

Scenario 6 representerer det teoretiske potensialet for forskyvning. Før defineringen av tiltakspakkene (Vedlegg 9) blir det gjort en vurdering av hvert tiltaks relevans for beregning av forskyvning. Der kommer det frem at tiltak tilknyttet ventilasjons- og transmisjonstap, er relevante. Det teoretiske potensialet blir derfor også her beregnet ut fra at 50 % av alle bygg oppgraderer total U-verdi samt ventilasjonstap til TEK17-standard.

Resultatene fra scenario 6 blir presentert i Figur 28 og Tabell 28. Figuren viser en veldig høy starts-effektreduksjon på over 20 000 MW for bygg i dag (før tiltak) og på over 8 000 MW for bygg med innføring av tiltakene. Denne mer enn halveringen fra «før tiltak» til «etter tiltak» samsvarer med det store potensialitet for energieffektivisering av bygg. Videre viser Tabell 28 at differansen positiv etter 6 minutter. Dette betyr at effektreduksjonen er større for alternativet med tiltak enn uten tiltak. De lengste responstidene varer opptil 110 minutter, og da med hele 42 MW de siste 20 minuttene.



Figur 28: Total strøm-effektreduksjon for småhus fordelt på responstid før og etter innføring av tiltak i scenario 6.

Tabell 28: Differansen mellom effektreduksjon før og etter tiltak (scenario 6) over responstid.

Differanse mellom scenarioet før tiltak og scenario 6 etter tiltak over responstid:																							
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Effekt-reduksjon [MW]	(11 741)	(3 064)	(1 399)	(446)	(129)	10	15	62	68	78	99	92	89	88	87	62	62	62	62	42	42	42	-

5.8. Sammenligning av tiltakspakker ved energieffektivisering og forskyvning

Denne delen av masteroppgaven vil bestå av en sammensetning og vurdering av de foregående resultatene for å besvare de to problemstillingene:

Nr. 1: *«I hvilken grad påvirker energieffektivisering i bygg fleksibiliteten i det norske energisystemet?»*

Nr. 2: *«Er de energieffektiviseringstiltakene som er mest energisparende også best for forskyvningspotensialet (fleksibiliteten)?»*

Problemstilling nr. 1 vil besvares med bakgrunn i en vurdering av det teoretiske potensialet (scenario 6) for både forskyvning og energieffektivisering. Problemstilling nr. 2 vil besvares med bakgrunn i potensialene tilknyttet bygningskroppen og ventilasjon (scenario 1-5). Sammenligningsresultatene under er derfor delt inn i tre deler, først én del som omhandler tiltakspakker tilknyttet boliger, videre en annen del for yrkesbygg, og til slutt én del samlet for det teoretiske potensialet.

I kapittel 4.9. beskrives denne delen som en sammenligning av responstid, restitusjonstid, effektreduksjon og energibesparelse. Da tidligere resultater har konkludert med at responstid og effektreduksjon er mest relevante for forskyvningspotensialet, blir de lagt til grunn for de videre beregningene også her. Energibesparelsen blir betraktet som mindre relevant da den totale påvirkningen på forbruket er veldig liten. Energibesparelsen varierer i samsvar med restitusjonstiden, og den blir også betegnet som mindre relevant da den varierer i størst grad med en inputvariabel (effekt til oppvarmingsteknologi) – og denne endres manuelt uten tilknytning til renoveringstiltakene. Derfor vil problemstillingene besvares med bakgrunn i en sammenligning av effektreduksjon og responstid for de ulike tiltakspakkene.

5.8.1. Sammenligning for boliger

Sammenligningen for boliger består av en vurdering av scenario 1 og 2 samlet og resultater for energieffektivisering og forskyvningspotensial i scenario 4.

Energieffektiviseringspotensial for boliger

Det totale potensialet for scenario 1 og 2 samlet er på omtrent 19,3 TWh i 2025. Dette vil si at tiltakene tilknyttet renoveringen av bygningskroppen kan gi en besparelse i oppvarmingsforbruket i boliger i Norge på 19,3 TWh per år. Scenario 4 har et potensial på 3,2 TWh – det vil si vil si at tiltak for renovering av ventilasjon kan gi en besparelse på 3,2 TWh per år av oppvarmingsforbruket i Norge. Da potensialet for energieffektivisering er størst for renoveringstiltakene på boligkroppen, betraktes disse tiltakene som bedre enn ventilasjonstiltakene.

Forskyvningspotensial for boliger

Tabell 29 er satt sammen av Tabell 23, Tabell 24 og Tabell 26. Her vises differansen mellom effektreduksjon over responstid for byggene, henholdsvis uten og med tiltak. Positiv differanse står for høyere effektreduksjon ved innføring av tiltak.

Tabell 29: Differanse mellom innføring «før og etter» tiltak – for effektreduksjonsberegninger i scenario 1, 2 og 4 over responstid.

Differanse mellom gjennomføring av tiltak og ikke for effektreduksjonsberegninger [MW] over responstid [min]:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
Scenario 1 og 2	(3 946)	(2 473)	(818)	(146)	15	55	51	66	71	69	63	54	49	49	47	20	20	20	20	-
Scenario 4	(2 036)	(961)	(245)	94	162	169	166	147	150	144	144	120	109	109	99	35	35	35	35	-

Scenario 1 (tiltak på bygningskroppen) har en høyere negativ effektreduksjonsdifferanse ved responstid start enn scenario 4 (tiltak på ventilasjon). Differansen i effektreduksjon blir også fortere positiv for scenario 4 og har en høyere andel reduksjon helt frem til responstidens slutt-tidspunkt. Det vil altså si at tiltak på ventilasjonen har et bedre forflytningspotensial enn tiltak på bygningskroppen til småhus.

Sammenligning av energieffektivisering og forskyvning for boliger

Ved besvarelse av problemstilling nr. 2 om de tiltakene som er best for energieffektiviseringen også er best for fleksibiliteten, blir svaret for boliger nei. Ut fra beregningene er dette, når det gjelder boliger, fordi energieffektiviseringspotensialet er størst for tiltakene på bygningskroppen, mens forskyvningspotensialet er størst ved tiltak på ventilasjonsanlegget.

5.8.2. Sammenligning for Yrkesbygg

Sammenligningen for yrkesbygg består av en vurdering av resultatene for energieffektivisering og forskyvningspotensial ved scenario 3 og scenario 5.

Energieffektiviseringspotensial for yrkesbygg

Det totale potensialet for scenario 3 er på omtrent 2,5 TWh i 2025, det vil si at tiltakene tilknyttet renoveringen av bygningskroppen kan gi en besparelse på 2,5 TWh per år av oppvarmingsforbruket i yrkesbygg i Norge. Scenario 5 har et potensial på omtrent 1,4 TWh, som vil si at tiltakene på ventilasjonen kan gi en besparelse på 1,4 TWh. Her er det ikke like «overlegen» seier for tiltak på boligkroppen som for boliger med over 6 ganger så stor besparelse, men er det 1,7 ganger så stor besparelse for bygningskroppen. Så også for yrkesbygg betraktes tiltak på bygningskroppen som mer energieffektivt enn tiltak på ventilasjon.

Forskyvningspotensial for yrkesbygg

Tabell 30 er satt sammen av Tabell 25 og Tabell 27 og følger samme prinsipp som tabellen som presenteres for boliger.

Tabell 30: Differanse mellom «før og etter» innføring – for effektreduksjonsberegninger i scenario 3 og 5 over responstid.

Differanse mellom gjennomføring av tiltak og ikke for effektreduksjonsberegninger [MW] over responstid [min]:																				
Tid [min]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	40	50	60
Scenario 3	(1 193)	(903)	(375)	(57)	(19)	(12)	(11)	(11)	(6)	(3)	(2)	(2)	(2)	(0)	(0,2)	(0,2)	0,2	0,1	0,0	-
Scenario 5	(1 577)	(1 070)	(375)	(61)	(44)	(15)	3	3	(1)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,1	0,0	0,0	-

Scenario 3 (tiltak på bygningskroppen) har en lavere negativ responstid, som holdes negativ over mye større andel av responstiden enn scenario 5. I analysen av forflytningspotensialet vektlegges effektreduksjonen over tid høyere enn mengden i startøyeblikket. Det betyr at også for yrkesbygg betraktes tiltak på ventilasjonsanlegget som bedre for forskyvningspotensialet enn tiltak på bygningskroppen.

Sammenligning av energieffektivisering og forskyvning for yrkesbygg

Ved besvarelse av problemstilling nr. 2 om de tiltakene som er best for energieffektiviseringen også er best for fleksibiliteten, blir også svaret for yrkesbygg nei. Ut fra beregningene er dette, når det gjelder yrkesbygg, fordi energieffektiviseringspotensialet er størst for tiltakene på bygningskroppen, mens forskyvningspotensialet er best ved tiltak på ventilasjonsanlegget.

5.8.3. Sammenligning og vurdering av teoretisk potensial

Sammenligningen for teoretisk potensial består av en vurdering av resultatene for energieffektiviseringen og forskyvningspotensialet i scenario 6.

Totalt teoretisk energieffektiviseringspotensial

Det totale potensialet fra scenario 6 gir en total årlig besparelse på omtrent 24,5 TWh ved innføring av alle tiltak for alle bygg. For å kunne sammenligne dette med forskyvningspotensialet vil vi ta utgangspunkt i at denne besparelsen er en jevn andel av oppvarmingsbehovet gjennom alle døgn i året. Det totale oppvarmingsbehovet er gitt av kapittel 3.6. på 31,3 TWh i året. Det vil altså si at potensialet for renovering kan minske forbruket med 78 % til enhver tid. I Tabell 31 vises energieffektiviseringspotensialet og andeler fordelt på spotprisområder. Dette skal brukes videre til sammenligningen med forflytningen.

Tabell 31: Energieffektiviseringspotensialet fordelt på spotprisområder og for hele Norge samlet. Videre er energibehovet til oppvarming lagt ved, og andelen som kan bespares, blir beregnet.

Faktisk besparelse fordelt på NO-område [GWh/år] 2025						
Alle bygg med punktoppvarming						
	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5	Hele Norge
Besparelse [TWh/år]	7,8	6,1	4,1	3,3	3,3	24,5
Oppvarmings-etterspørsel [TWh/år]	11,8	7,7	4,5	3,5	3,8	31,3
Andel av total	66 %	79 %	91 %	94 %	86 %	78 %

Totalt teoretisk forskyvningspotensial

Det teoretiske potensialet ved forflytningen er presentert i kapittel 5.7., hvor differansen mellom det å innføre alle renoveringstiltak mot å ikke gjøre det, er presentert i Tabell 28. Ideelt sett skulle man kunne plottet effektreduksjon over responstid direkte inn i etterspørselskurven gjennom døgnet for å se hvilken effekt forflytningen kan ha på topplasten. Da totalen for effektreduksjonen og responstiden er usikker, gjøres det heller et forsøk basert på differansen mellom forskyvningspotensialet, beregnet før og etter innføring av alle tiltakene fordelt over NO-områdene (presentert i Tabell 32) . Disse tallene skal videre brukes til å sammenlignes med energieffektiviseringspotensialet for de ulike områdene.

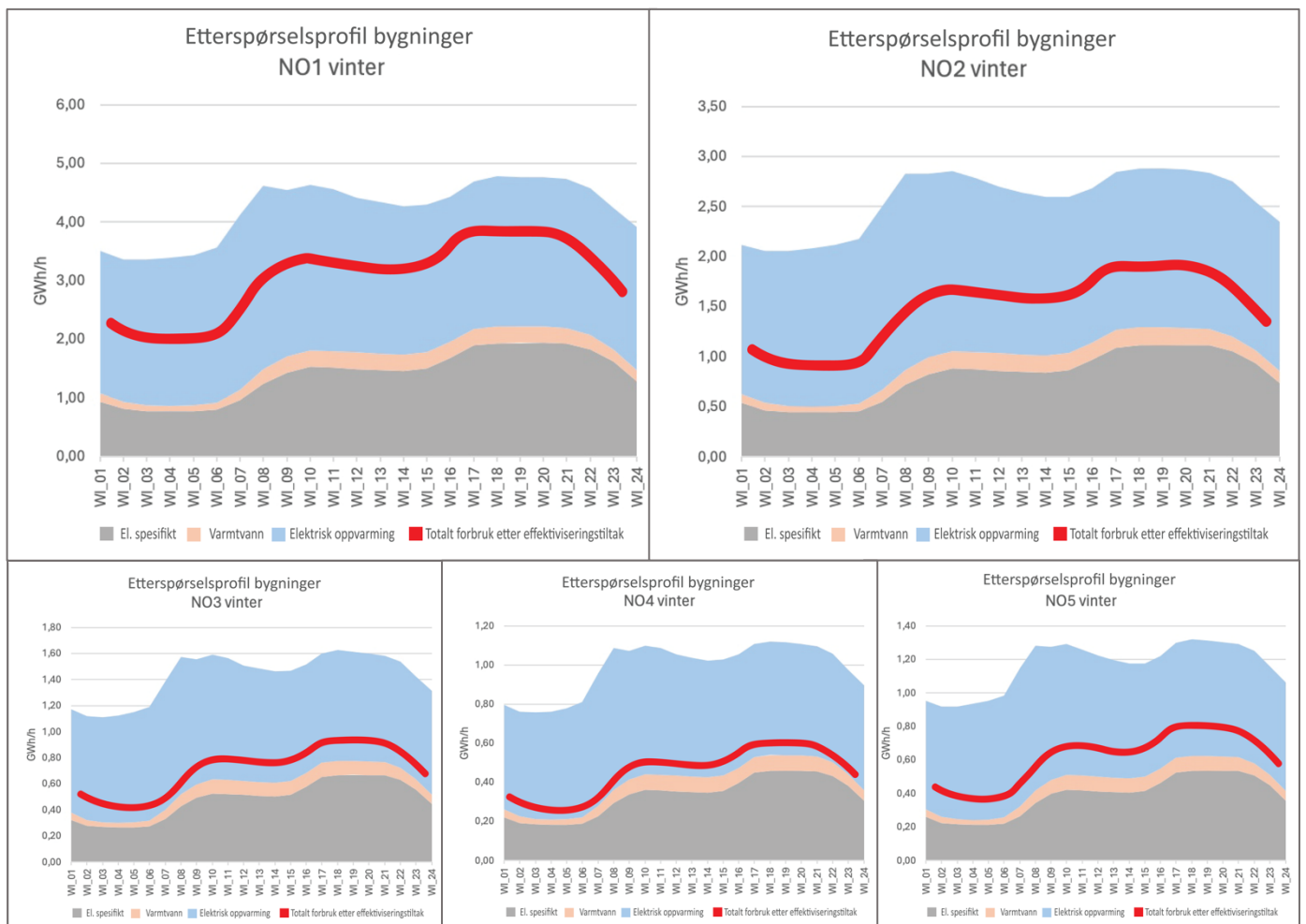
Tabell 32: Differanse i forskyvningspotensialet før og etter innføring av tiltak (scenario 6). Her fordelt på spotprisområde.

Differanse i forflytningspotensialet						
Effektreduksjon over responstid (mer enn) før og etter alle tiltak						
Fordelt på spotprisområde						
	NO1	NO2	NO3	NO4	NO5	
1 min:	(3 154)	(1 071)	(874)	(886)	(500)	MW
2 min:	(2 052)	(1 069)	(592)	(364)	(499)	MW
3 min:	(497)	(703)	(163)	(40)	(323)	MW
4 min:	(245)	(192)	(74)	(0)	(94)	MW
5 min:	(46)	(77)	(9)	12	(36)	MW
6 min:	(27)	(13)	8	22	(7)	MW
7 min:	(27)	(13)	13	22	(7)	MW
8 min:	(11)	12	19	25	5	MW
9 min:	4	13	24	25	6	MW
10 min:	4	21	24	24	8	MW
15 min:	1	36	23	24	16	MW
20 min:	0	33	23	21	15	MW
25 min:	0	33	20	21	15	MW
30 min:	0	33	20	21	15	MW
40 min:	0	33	20	21	13	MW
50 min:	-	29	20	-	13	MW
60 min:	-	29	20	-	13	MW
70 min:	-	29	20	-	13	MW
80 min:	-	29	20	-	13	MW
90 min:	-	29	-	-	13	MW
100 min:	-	29	-	-	13	MW
110 min:	-	29	-	-	13	MW
120 min:	-	-	-	-	-	MW

Også her vil evalueringen verdsette lav negativ effektreduksjon i begynnelsen av responstid samt lang responstid og høy effektreduksjon utover i responstiden. For å sammenligne de fem områdene over, kommer NO2 og NO3 best ut av målingene da de disse ved innføring av tiltak har en høy differanse (altså stor positiv påvirkning på effektreduksjon) lenge ut i responstiden, og har lang responstid. Videre følger NO4 også med høye effektreduksjonsverdier ute i responstiden, men har litt kortere responstid. Deretter følger NO5 med høy responstid, men med litt mindre effektreduksjon utover i responstiden. Til sist følger NO1 med kort responstid og lave effektreduksjoner utover i responstiden. Dette viser at innføringen av reoveringstiltakene ikke bare kan bidra til en god andel høyere effektreduksjon utover i responstiden, men også at effektreduksjonen i starttidspunkt for alle områdene vil bli lavere ved innføring av reoveringstiltak.

Teoretiske potensial for energieffektivisering, forskyvning og etterspørsel gjennom døgnet

For å besvare problemstilling nr. 1, i hvilken grad energieffektivisering påvirker fleksibiliteten i systemet, må energieffektiviseringens påvirkning på forbruket gjennom døgnet for de fem spotprisområdene sjekkes og sammenlignes med effektreduksjon over responstid (fra resultatene til beregningen av forflytningspotensialet). Denne masteroppgaven antar, som nevnt tidligere, at energieffektivisering påvirker forbruket med en jevn prosentandel av forbruk gjennom året, presentert i Tabell 31. Betegnelsen på fleksibilitet evnen til å styre etterspørsel og produksjon i samsvar med klima, etterspørsel og nettkrav, følger av IEAs definisjon (kapittel 2.3). For å analysere hvordan denne evnen til å styre etterspørselen endres ved innføring av energieffektiviseringstiltak, settes andelen redusert oppvarmingsetterspørsel inn i antatte etterspørselsgrafer gjennom døgnene for hvert NO-område vinter.



Figur 29: En samling av etterspørselsprofiler for de ulike spotprisområdene. De fargede områdene viser etterspørselen i bygg før innføringen av energieffektiviseringstiltak, og den røde linjen representerer totalt forbruk etter energieffektiviseringstiltak.

Figur 29 viser fordelingen av energietterspørsel for bygninger gjennom døgnet og stor reduksjon i den totale energietterspørselen som følge av renoveringstiltakene; her med energietterspørsel før tiltak (fargede felt) og total etterspørsel etter tiltak (rød strek). Tiltakene varierer, som vist i Tabell 31, med andel av oppvarmingsbehovet som reduseres for NO-områdene. Dette vises også i etterspørselsprofilen. Reduksjonen i etterspørsel vil føre til en reduksjon i frekvensbalanse, som nevnt i kapittel 5.2. Frekvensbalansen gjenspeiles i dette tilfellet av den negative effektreduksjonen ved responstid start vist i Tabell 31. Altså er det mindre effekt i systemet som kan skrus av, og evnen til å styre etterspørselen blir derfor mindre. Når det er sagt, viser også resultatene for effektreduksjon og responstid en økende effektreduksjon lengre ute i responstiden. Dette tyder på at flere bygg har lengre responstid og derfor større evne til å regulere effektreduksjonen over lengre tid.

Tabell 32 over differanse i forflytningspotensialet viser også forskjell mellom NO-områdene, blant annet vises det her en sammenheng mellom responstid og temperatur. NO4 og NO1 har begge kortest responstid på litt over 40 minutter begge to, men temperaturer på henholdsvis $-11,0^{\circ}\text{C}$ og $-5,1^{\circ}\text{C}$. Videre følger NO3 med en responstid på litt over 80 minutter og temperatur på $-4,5^{\circ}\text{C}$, og til slutt kommer NO2 og NO5 med en responstid på litt over 110 minutter og temperaturer på henholdsvis $0,3^{\circ}\text{C}$ og $-0,1^{\circ}\text{C}$. For å gjøre en samlet vurdering av i hvilken grad renoveringstiltakene påvirker fleksibiliteten, er det viktig å sjekke hva som skjer med sammenhengen mellom energieffektiviseringen og forflytningspotensialet for hvert NO-område.

NO1 viser en reduksjon i oppvarmingsforbruket på 66 % (7,8 TWh) ved innføring av alle renoveringstiltak. Denne prosentandelen er den laveste for alle spotprisområdene, og dette gjenspeiles i differansen i effektreduksjonen før og etter innføring av tiltak ved start ($-3\ 154\ \text{MW}$) og utover i responstiden (også lavest prosentandel her). For NO1 antas det således at innføringen av alle tiltakene vil gi mindre fleksibilitet ved start av en eventuell forskyvningsperiode og likeså minimalt med forbedret effektreduksjon utover i perioden.

NO2 har en reduksjon i oppvarmingsforbruket på 79 % (6,1 TWh) ved innføring av alle renoveringstiltak. Denne prosentandelen er den nest laveste for alle spotprisområdene og gjenspeiles i differansen i effektreduksjonen før og etter innføring av tiltak ved responstid start

(-1 070 MW). I motsetning til NO1 har NO2 høye verdier for effektreduksjon utover i responstiden, som viser en forbedring i forskyvningspotensialet ved reovering. Altså vil innføringen av alle tiltakene gi en lavere potensiell effektreduksjon (mindre fleksibilitet) ved start av en eventuell forskyvningsperiode også for NO2 ved responstid start, men utover i perioden vil effektreduksjonen bli betraktelig forbedret.

NO3 viser en reduksjon i oppvarmingsforbruket på 91 % (4,1 TWh) ved innføring av alle reoveringstiltak. Denne prosentandelen er den nest høyeste blant spotprisområdene og gjenspeiles i differansen mellom effektreduksjon før og etter innføring av tiltak ved responstid start (-873 MW). NO3 har også høye verdier for effektreduksjon utover i perioden, som viser forbedret fleksibilitet ved reovering. Ved innføring av alle tiltakene vil dermed fleksibiliteten bli mindre ved start av forskyvningsperioden, men utover i perioden vil effektreduksjonen bli forbedret også for NO3.

NO4 viser en reduksjon i oppvarmingsforbruket på 94 % (3,3 TWh) ved innføring av alle reoveringstiltak. Denne prosentandelen er den høyeste blant alle spotprisområdene og gjenspeiles nesten i differansen mellom effektreduksjon før og etter innføring av tiltak ved responstid start (-886 MW), (dog har NO5 enda litt lavere differanse her). NO4 har også høye verdier for effektreduksjon utover i perioden, som betyr at mulighetene for forskyvning over tid er forbedret ved reovering. Ved innføring av alle tiltakene vil fleksibiliteten bli mindre ved start av forskyvningsperioden, men utover i perioden vil effektreduksjonen bli forbedret også for NO4.

NO5 viser en reduksjon i oppvarmingsforbruket på 86 % (3,3 TWh) ved innføring av alle reoveringstiltak. Denne prosentandelen er middels god sammenlignet med de andre spotprisområdene. Dette tyder på at dette området har mer effektivt forbruk enn for eksempel NO4, som har likt effektiviseringspotensial på 3,3 TWh, men en mindre total etterspørsel uten reoveringstiltakene. Ved responstid start har NO4 den laveste negative differansen for effektreduksjon før og etter innføring av tiltak (-500 MW); dette betyr at den totale fleksibiliteten ved starttidspunkt blir mindre påvirket her enn for de andre områdene. NO5 har også høyere verdier for effektreduksjon utover i responstiden. Dette indikerer at mulighetene for forskyvning over tid øker med innføring av reoveringstiltakene. Altså vil

innføring av alle tiltakene også her minske den totale fleksibiliteten ved responstid start, men øke fleksibiliteten utover i responstiden (mengden som kan forskyves lengre, økes også for NO5).

Oppsummert er det vanskelig å si noe om i hvilken grad eller mengde energieffektiviserings-tiltakene vil påvirke fleksibiliteten i systemet, da kun differansene for forskyvningspotensialet betraktes i denne oppgaven. Dette er nærmere forklart i kapittel 5.2. og 5.3. Men ved renovering av bygg viser beregningene av forskyvningspotensialet en mindre effektreduksjon ved responstid start, men en høyere effektreduksjon utover i perioden. Følgelig er det en viss andel watt som kan skrues av i øyeblikket, men andelen watt som kan være skrudd av over en lengre periode, øker.

6. Diskusjon

Diskusjonen består først av én del med diskusjon rundt valg av metode og data, som er benyttet, inkludert en evaluering av hvilke beregninger som påvirker resultatet i veldig liten eller veldig stor grad. Videre følger neste del, hvor resultatene blir sammenlignet med eksisterende resultater fra faglitteraturen, før evalueringen av resultatene presenteres avslutningsvis.

6.1. Diskusjon av data og metode

Beregningene av energieffektiviseringspotensialet er allerede blitt laget av Multiconsult for NVE (Bøhn, 2021) og deretter bearbeidet videre av NVE og DIBK (NVE & DIBK, 2022), for så å bli videre bearbeidet av IFE (Rosenberg, 2023). Dette presenteres i kapittel 2.2. og 3.4. Derfor diskuteres ikke validiteten av disse beregningene da det forutsettes at disse beregningene er gode matematiske simuleringer.

Det ble lenge vurdert å kjøre en simulering i TIMES som valg av metode for å beregne fleksibiliteten (forflytningspotensialet). Men da modellen per nå viste seg å ikke ha noen enhet for å måle fleksibilitet, ble en eventuell utvikling av denne modell-delen vurdert som for omfattende for denne masteroppgaven. I tillegg har variablene i TIMES en oppløsning på time for time, fire døgn i året (for de mest detaljerte variablene). Her er respons- og restitusjonstid ofte kortere, som gjør at responstiden ikke vil vises på de totale beregningene. Hvis mine responstider stemmer må dette finnes en løsning på før modellen eventuelt kan benyttes til å sjekke fleksibilitet innad i modellen. Men dersom forflytningspotensialet skal analyseres videre for hele Norge, er nok TIMES en av de mest detaljerte modellene vi har for teknologien i det totale systemet per nå, og antakeligvis også den som bør videreutvikles for formålet.

Til forskjell fra andre studier, som gjerne foretar beregninger for ett enkelt bygg som en del av en case studie, tar masteroppgaven utgangspunkt i standardbygg for så å kunne aggregere forskyvningspotensialet for hele Norge. Ved presentasjonen av liknende metoder, i kapittel 2.3.5. og kapittel 3.8., bruker alle de oppgitte artiklene ett bygg som utgangspunkt (Marotta, 2021), (Ioakimidis, 2018), (Shirazi, 2017), (Sørensen, 2024) og (Arteconi, 2019).

Li et al. (2021) har kartlagt metoder for beregning av fleksibilitet i boligbygg og funnet ut at 58 % av studiene brukte matematiske beregninger. De aller fleste av disse ble brukt videre i simuleringer, og bare 15 % av studiene hadde resultater fra eksperimenter eller tester ute i felt. Metoden i denne masteroppgaven er også basert på matematiske beregninger. For beregningene av energieffektiviseringsdataene av Multiconsult for NVE er SIMIEN blitt brukt, og inputdataene til de matematiske beregningene i masteroppgaven består blant annet av de samme inputdataene som ble brukt i SIMIEN ved beregningen av energieffektiviseringspotensialet. Dersom fleksibiliteten hadde blitt kalkulert direkte gjennom SIMIEN eller BUILDopt (som de har brukt i Flexbuild-prosjektet(Sartori, 2023)), kan det være at beregningen av den faktiske effektreduksjonen hadde blitt mer valid enn det jeg kom fram til i denne masteroppgaven. Men for å kunne vurdere total forskyvning for hele Norge måtte simuleringene da blitt gjort for alle bygningstyper i alle TEK-standarder og NO-områder. Dette ble betraktet som for omfattende for en masteroppgave. Og selv med simuleringer er det fortsatt mange usikkerhetsmomenter – som ved aggregering, hvor andelen bygg, som er bygget i de ulike TEK-standardene, er kartlagt, mens andelen renoverte bygg etter byggeår ikke er kartlagt. Slike simuleringer ville med andre ord uansett medført usikre verdier. Og siden det finnes veldig lite tilgjengelig data for formålet, ville en nest beste løsning være å sjekke ut differansen mellom «ved innføring av tiltak» og «ikke innføring av tiltak», for så å aggregere forskyvningspotensialet (fleksibiliteten) opp på et landsnivå. Denne metoden ble valgt for masteroppgaven.

Den matematiske beregningen i valgt metode går ut på å beregne responstid, restitusjonstid, effektreduksjon og energibesparelse – på samme måte som flere av artiklene, faglitteraturen, også omhandler (nevnt tidligere). Noen av beregningene her har liten eller ingen betydning for resultatet og kan derfor ses bort ifra ved eventuelle videre beregninger. Dette gjelder mellomberegninger som listet opp under:

- Masseendring over temperatur beregnet i Q_{gen} (andelen varme nødvendig for å øke temperaturen til et legeme med én grad) for beregning av responstid. Denne endringen av masse er tilnærmet lik ingen, og den har derfor veldig liten påvirkning på resultatet og kan settes konstant for alle innendørstemperaturer.
- Infiltrasjonsvarmetapet (H_{inf}) er beregnet her: Viser dette ingen variasjon mellom de forskjellige tiltakene, så har det ikke noe utslag på differansen. Men ved beregning av

realistisk responstid og effektreduksjon kan denne gjøres mer korrekt med faktiske infiltrasjonskoeffisienter i forhold til byggets beliggenhet.

- Varmetilskuddet fra belysning, utstyr og personer (Q_{int}) varierer heller ikke med innføring av tiltakene. Så når den totale responstiden og effektreduksjonen ikke kan vurderes med sikkerhet, og kun differansen blir tatt i betraktning, kunne denne bli sett bort ifra.

Det bevises også at restitusjonstid og energibesparelse har liten eller ingen påvirkning på resultatet når det gjelder hvilken påvirkning energieffektiviseringstiltak har på forskyvningspotensialet. Således kunne man her sett bort fra beregningene av restitusjonstid og energibesparelse. Men én del som ikke er tatt med, er spesifikk varmekapasitet i inventar i byggene – for eksempel varme i et møbel – og hvordan denne varmen påvirker varmekapasiteten ellers i rommet. Muligens forskyver den magasinerte varmen i møbel responstiden utover i tid da det finnes enda mer varme lagret i bygget, som bruker lengre tid på å bli overført mellom flere legemer. Den spesifikke varmekapasiteten ble sett bort fra i utgangspunktet for å forenkle beregningene da NS 3031:2014 heller ikke omfatter denne variabelen. Men den spesifikke varmekapasiteten antas å påvirke resultatene og burde derfor undersøkes videre for å fremskaffe eksakte matematiske beregninger tilknyttet forskyvningspotensialet.

Videre er det enkelte deler som har stor betydning for de matematiske beregningene av forskyvningspotensialet. Variablene med høyest påvirkning, er:

- Valgte ute- og innendørstemperaturer (θ_u og θ_i)
- U-verdiene U_i til hver komponent og andelen av hver komponent A_i i bygget som brukes for beregning av transmisjonstapet H_{tr} .
- Varmegjenvinningsandelen η_T og andelen varme som strømmer ut gjennom ventilasjonsanlegget og blir brukt for å beregne ventilasjonstapet H_v .

Ved valg av tiltakspakker er de delene som har stor betydning for de matematiske beregningene lagt til grunn (tiltak på bygningskroppen og tiltak på ventilasjonsanlegget). Dette ble gjort med bakgrunn i tilgjengelige data. Flere av de gjenværende renoveringstiltakene vil også kunne påvirke forskyvningspotensialet, men tall for dette var ikke tilgjengelig gjennom

NS, TEK-standard eller NVEs antakelser fordelt på bygningskategori, og derved har ikke disse noen påvirkning på forskyvningspotensialet i disse beregningene.

6.2. Resultater i sammenheng med tilgjengelig litteratur

Resultatene fra beregningen av forflytningspotensialet viser at ved å innføre renoveringstiltak vil effektreduksjonen som er tilgjengelig ved responstidspunktets start gå ned, mens effektreduksjonen utover i responsperioden vil bli høyere etter innføring av tiltak. I tillegg viser resultatene at ulike energieffektiviseringstiltak påvirker effektreduksjonen og responstiden forskjellig. Blant annet viser scenarioene at tiltak i tilknytning til renovering av ventilasjonsanlegget har større påvirkning på forflytningsperioden enn tiltak på bygningskroppen. Dette er motsatt rangering av tiltakene i forhold til det energieffektiviseringsresultatene tilsier, hvor tiltakene for bygningskroppen vil gi størst andel besparelse andel energi.

De høye besparelsene oppnådd ved å innføre energieffektiviseringstiltak samsvarer med THEMA og Multiconsults (2022) beregninger når det gjelder spørsmålet om vi har nok fleksibilitet frem mot 2050. THEMA og Multiconsult viser også til et økt effektbehov på 1 000-5 000 MW og et usikkert, men mulig reduksjonspotensial fra bygg på 4 000 MW. Da mine totale effektreduksjonsberegninger ikke brukes, kun differansen målt i MW mellom å innføre tiltak og ikke innføre tiltak, er det vanskelig å regne ut hvor mye forskyvningspotensialet for oppvarming kan bidra med av dette reduksjonspotensialet på 4 000 MW. Men effektreduksjonsberegningene litt ute i responstiden viser en differanse på 80 MW ved innføring av tiltak på 50 % av byggene. Det vil si at hvis alle byggene allerede hadde benyttet forskyvningspotensialet, og 50 % av byggene hadde blitt renoveret, ville forskyvningspotensialet/reduksjonspotensialet for oppvarming vært på 80 MW. Dette betyr at reduksjonspotensialet fra oppvarming av bygg i alle fall er større enn 80 MW. Men foreløpig, da dette resultatet er lavt, vil jeg si at det er grunn til å se på andre fleksible løsninger enn bare forskyvning av oppvarming. Fleksible varmtvannstanker, fleksibel elbillading, solceller og eventuelt batterier kan tjene som gode eksempler på dette.

At behovet for fleksibilitet vil øke i fremtiden, blir også vist i NVEs analyse av Norsk og nordisk effektbalanse frem mot 2030 (2022). Dette samsvarer med at de nye byggene har mindre total effektreduksjon i startøyeblikket av en restitusjonstid da de bruker mindre effekt totalt. I tillegg samsvarer det med andre prognoser om mer vind og med andre uregulerbare fornybare energikilder som vil gi systemet behov for mer fleksibilitet i fremtiden.

Reduksjonen i topplast fra forskyvningen etter renovering vil altså, ved disse beregningene, kunne bidra med en ekstra reduksjon på omtrent 80 MW i rundt 30 minutter. Denne reduksjonen ser liten ut i den store totalen ved for eksempel forbrukstoppen på 25,2 GW 12. februar 2021. Endringen i forskyvningspotensialet etter renovering vil da utgjøre 0,3 % av det totale forbruket. Men endringen kan ved den rette andelen utgjøre akkurat det som trengs for å minske trappen til effekttariffen (som vist i kapittel 2.1.4.) og derfor utgjøre en forskjell for forbrukeren. Denne andelen er litt vanskelig å se alene uten det faktiske forskyvningspotensialet i dagens bygg. Flere beregninger må derfor gjøres for å bli sikrere på sammenhengen her. Beregningene med BUILDopt-modellen i Flexbuild-prosjektet viser at sluttbrukerfleksibiliteten kan stå for 16–20 % totalt ved bruk av styring av innendørs-temperatur, termisk lagring og lading av elektriske kjøretøy. Resultatene fra disse beregningene er i hvert fall ikke overdimensjonert i forhold til Flexbuilds resultater. Dette kan tyde på at beregningene er riktige, eller litt lave.

Langevin et al. (2021) sin belysning av begrensede lastforskyvninger i energieffektive bygninger gjenspeiles også i resultatene i min oppgave, hvor effektreduksjonen ved starttidspunkt vises betydelig lavere ved innføring av energieffektiviseringstiltak enn uten tiltak. Med andre ord kan differansen av effektreduksjon over tid, når man sammenligner før og etter tiltak, anes som god nok til videre bruk. Men det *faktiske* forskyvningspotensialet må det gjøres videre beregninger for, og da gjerne ved hjelp av simuleringer som tar hensyn til faktisk energibruk og faktisk varmetap i bygget.

6.3. Ekstra forutsetninger, begrensninger og usikkerheter

Beregningene er gjort med bakgrunn i mange antakelser og vurderinger som er beskrevet tidligere i masteroppgaven. Metoden er kvantitativ og består av simuleringer og vil derfor ikke være direkte overførbart til virkeligheten. Men takket være sammenligninger med annen og relevant litteratur, forutsetter denne oppgaven at resultatene er gode nok til å besvare de to problemstillingene innledningsvis.

Som beskrevet av Li et al. (2021), har kun 15 % av analysene vedrørende fleksibilitet i boligbygg tallunderlag fra eksperimenter eller tester ute i felt. Dette impliserer store usikkerheter. Ved videre beregninger kunne det derfor vært interessant å sjekke faktisk effekt som siver ut av et bygg før og etter renovering for å kartlegge hvor stort forskyvningspotensialet faktisk er. I tillegg er dagens bygningsmasser i Norge for dårlig kartlagt. Det finnes riktignok data på antall bygg og når byggene ble bygget, men ikke hvilke bygningskategorier dette gjelder eller om de er renoveret etter at de ble oppført. Derfor blir simuleringer som starter på bygningsnivå, vanskelig å aggregere opp til et landsnivå med bakgrunn i bygningsmassen. Hvis jeg skulle begynt å skrive masteroppgaven forfra nå, ville jeg derfor, og nettopp ut fra den kunnskapen jeg har skaffet meg så langt i denne prosessen, prøvd å aggregere opp tallene med bakgrunn i oppvarmingsetterspørselen fordelt på *byggtyper i standarder* eller *faktisk standard i dagens bygg*, om noen av disse skulle finnes. Det hadde vært spennende å se hvordan resultatene hadde endret seg da. Jeg vil, ut fra det jeg har sett eller tenkt på underveis i oppgaven, tro at tallene for maksimal effekt som kan skrus av ved responstid start, er lik oppvarmingsbehovet, og at effektreduksjonen utover i responstiden minker.

Videre synes jeg det er interessant å komme frem til at de forskjellige tiltakene har forskjellig påvirkning på forskyvningspotensialet, og at rangeringen av disse ikke samsvarer med rangeringen av tiltak basert på energibesparelspotensialet. Akkurat dette har jeg ikke funnet tidligere undersøkelser på, og det er derfor ekstra interessant å se at beregningene her i masteroppgaven viser en variasjon i resultatene. I tillegg er dette et punkt i oppgaven jeg hadde et sterkt ønske om å analysere da dagens politiske virkemidler i hovedsak er rettet mot energieffektivisering, og ikke mot fleksibilitet. Resultatene tyder på at det kan være behov for å tilpasse de politiske virkemidlene for også å verdsette effektreduksjon.

7. Konklusjon og videre arbeid

Målet med oppgaven er å øke kunnskapsgrunnlaget rundt valg av renoveringstiltak for å møte fremtidens økende behov for fleksibilitet. Oppgaven er bygget opp for å besvare de to problemstillingene som presenteres i kapittel 1. Metoden er matematisk og beregner lastforskyvning av oppvarming i bygg før og etter innføring av energieffektiviseringstiltak.

Resultatene betegnes som for dårlige til å besvare hele problemstillingen, men mine funn gir likevel innsikt i energieffektiviseringens påvirkning på forskyvningspotensialet (fleksibiliteten i det norske strømnettet). Beregningene av lastforskyvningen viser to store usikkerhetsmomenter: standarden på eksisterende bygg og det faktiske varmetapet. Resultatene for total lastforskyvning betegnes som for dårlige da de viser at man kan skru av mer strøm til oppvarming ved responstid start enn det forbruket tilsier. Dette gjør at første del av problemstillingen («i hvilken grad») ikke kan besvares. Senere kan dette kanskje løses ved å kjøre bygningsmodellene i ett eller flere simuleringsprogram og aggregere tallene, basert på bedre bygningsdata eller detaljerte etterspørselsdata. Andre del av problemstillingen («hvordan energieffektivisering av bygg påvirker fleksibiliteten i det norske energisystemet») kan besvares ved å bruke differansene mellom beregningene. Differansene antas å «nulle ut» feilene da alle beregningene inneholder samme inputdata. Sammenligningen viser at forskyvningspotensialet i det norske energisystemet vil ha mindre strøm-effekt å skru av ved start av en responsperiode *etter* renovering, mens andelen som er skrudd av *utover i en periode*, vil være høyere.

Ved sammenligning av tiltakspakker viser beregningene at tiltak på bygningskroppen har størst potensial for energieffektivisering, mens tiltak på ventilasjonen har størst potensial for effektreduksjon. For å besvare problemstilling nummer to er altså de tiltakene som er best for energieffektiviseringen ikke best for forskyvningspotensialet (fleksibiliteten) – verken for boligbygg eller yrkesbygg. Ved disse beregningene påvirkes parameterne: U-verdier for komponentene i bygget, ventilasjonsluftmengde og varmegjenvinning i ventilasjon. Så for videre analyser bør sikkerheten bak disse inputdataene kvalitetssikres.

Beregningene viser at innføring av renoveringstiltak på 50 % av byggene i Norge kan gi en økning i effektreduksjon på 88 MW (ved responstid på 30 minutter). Dette tilsvarer 0,3 % av forbrukstoppen morgenen 12. februar 2021. Av det totale behovet for fleksibilitet er en økning på 0,3 % en meget beskjeden andel i forhold til det totale potensialet for total sluttbrukerfleksibilitet som er beregnet til 16–20% i andre prosjekter. Dette påpeker viktigheten av flere fleksible løsninger, og at renovering av bygg kun kan bidra med å dekke en marginal del av det totale fleksibilitetsbehovet.

Videre arbeid

- Til politikken og arbeidet rundt virkemidler knyttet til renovering anbefales det å tilpasse støtteordningene slik at det motiveres til å foreta forbedringer som styrker fleksible løsninger. Som beregningene viser, holder det ikke med bare å gjøre det beste for energieffektiviseringen; de beste løsningene for fleksibiliteten må også understøttes.
- Da de totale beregningene her betegnes som for dårlige, anbefales det videre å gjøre simuleringer på for eksempel gjennomsnittsbyggene i SIMIEN, BUILDopt eller annet program for å undersøke faktisk varmetap i bygg før og etter renovering.
- For at beregninger som dette skal kunne aggregeres, anbefales det videre å kartlegge dagens standard i bygg, som inkluderer andelen av bygg hvor det er foretatt renovering.
- Uten mer presise bygningsdata kunne tallene alternativt blitt aggregert ut fra oppvarmingsetterspørsel fordelt på bygningskategorier. Men denne informasjonen finnes heller ikke detaljert nok i dag og må derfor også arbeides videre med.
- Flere renoveringstiltak, eller innføring av andre fleksible løsninger, som for eksempel innføring av elbillading eller fleksible varmtvannstanker, kan også analyseres og sammenlignes med lastforskyvning av oppvarming av bygg.

Referanser

- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2017). *Essentials of Meteorology - An Invitation to the Atmosphere* (8 ed.).
- Arteconi, A., Mugini, A., & Polonara, F. (2019). Energy flexible buildings: A methodology for rating the flexibility performance of buildings with electric heating and cooling systems. *Applied Energy*, 251.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113387>
- Bøeng, A. C. (2022). Har verden nok fornybar strøm til transportsektoren. *SSB*.
<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/artikler/har-verden-nok-fornybar-strom-til-transportsektoren>
- Bøhn, T. I. (2021). *Kostnader for energieffektivisering i bygg* (2535-8235). (NVE Ekstern rapport Issue.
- Celsio, H. O. (2022). Til Energikommisjonen: Fjernvarme og termisk energi i samspill med kraftsystemet .
- Climate-data. (2024). *Climate-Data: Klima i Norge* <https://no.climate-data.org/europa/norge-38/>
- DIBK. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*.
<https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17>
- Dokka, T. H. (2023). Peak shaving, elbillading og utnyttelse av solstrøm - SIMIEN.
<https://simien.no/peak-shaving-elbillading-og-utnyttelse-av-solstrom/>
- Edvardsen, K. I., & Ramstad, T. Ø. (2017). *Trehus - Håndbok SINTEF*.
- EGGE, H. (2023). Denne skolen får strøm fra solceller og gjenbrukte elbilbatterier - SINTEF.
<https://www.sintef.no/siste-nytt/2023/denne-skolen-far-strom-fra-solceller-og-gjenbrukte-elbilbatterier/>
- El-proffen. (2024). *Tjenester - Varme - Panelovn*.
<https://www.elproffen.no/tjenester/varme/panelovn>
- Energidepartementet. (2024a). *Kraftmarkedet*. <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftmarkedet/>
- Energidepartementet. (2024b). *Strømnettet*. <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftnett/>

- Energikommisjonen. (2023). NOU 2023: 3 Mer av alt - raskere. <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/nou202320230003000dddpdfs.pdf>
- Espedal, K. J. (2022). *Bygningsfysikk* (7 ed.).
- FN. (2023). *Mål 11 - Bærekraftige byer og lokalsamfunn, gjør byer og lokalsamfunn inkluderende, trygge, robuste og bærekraftige*. <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn>
- Fortum. (2023). *Gjennomsnittlig strømforbruk*. <https://www.fortum.com/no/strom/alt-om-strom/stromforbruk>
- Geving, S. (2021). *Praktisk bygningsfysikk*.
- IEA. (2019). Summary report: Energy in Buildings and Communities Programme Annex 67 Energy Flexible Buildings.
- Ioakimidis, C. S., Thomas, D., Rycerski, P., & Genikomsakis, K. N. (2018). Peak shaving and valley filling of power consumption profile in non-residential buildings using an electric vehicle parking lot. *Energy*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.128>
- Klimautvalget. (2023). Omstilling til lavutslipp, veivalg for klimapolitikken mot 2050. *NOU 2023: 25*. <https://www.regjeringen.no/contentassets/781d27de14fd4065af33a864a49cea11/klimateutvalget-2050-web-2.pdf>
- Langevin, J., Harris, C. B., Satre-Meloy, A., Chandra-Putra, H., Speake, A., Present, E., Adhikari, R., Wilson, E. J. H., & Satchwell, A. J. (2021, Aug). US building energy efficiency and flexibility as an electric grid resource. *Joule*, 5(8), 2102-2128. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.06.002>
- Li, H., Wang, Z., Hong, T., & Piette, M. A. (2021). Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications [Review]. *Advances in Applied Energy*, 3, Article 100054. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100054>
- Magnussen, I. H. (2024). *Kostnadsberegningsskildringer gitt over mail fra NVE fra prosjektet vedrørende energieffektiviseringspotensiale i bygg utført av Multicosult for NVE*.
- Marotta, I., Guarino, F., Cellura, M., & Longo, S. (2021). Investigation of design strategies and quantification of energy flexibility in buildings: A case-study in southern Italy. *Journal*

- of Building Engineering*, 41.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102392>
- MET. (2024). *Metrologisk institutt - Norsk klimaservicesenter Observasjoner og værstatistikk*. <https://seklima.met.no/kss>
- Nagel, N. O., Jåstad, E. O., & Martinsen, T. (2024). The grid benefits of vehicle-to-grid in Norway and Denmark: An analysis of home- and public parking potentials *Energy*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130729>
- NVE. (2022). *Norsk og nordisk effektbalanse fram mot 2030 (20/2022)*.
https://publikasjoner.nve.no/rapport/2022/rapport2022_20.pdf
- NVE. (2023a). *Data for utbygde vindkraftverk i Norge*.
<https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/data-for-utbygde-vindkraftverk-i-norge/>
- NVE. (2023b). *Energisystem - Solkraft*. <https://www.nve.no/energi/energisystem/solkraft/>
- NVE. (2023c). *Energisystem - vannkraft*.
<https://www.nve.no/energi/energisystem/vannkraft/>
- NVE. (2023d). *Energisystem- kraftproduksjon*.
<https://www.nve.no/energi/energisystem/kraftproduksjon/>
- NVE. (2023e). *Hvor stor andel av vannkraften i Norge er fleksibel? .*
https://publikasjoner.nve.no/fakta/2023/fakta2023_01.pdf
- NVE. (2023f). *NVEs svar til Energikommisjonen*.
- NVE, Horne, H., Roos, A., Magnussen, I. H., Buvik, M., & B., L. (2020). *Faktark nr.7/2020 Norge har et betydelig potensial for forbrukerfleksibilitet i sektorene bygg, transport og industri*. https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_07.pdf
- NVE & DIBK. (2022). *Underlag for langsiktig strategi for energieffektivisering ved reovering av bygninger .*
<https://publikasjoner.nve.no/diverse/2022/Underlag.for.langsiktig.strategi.for.energi.effektivisering.ved.reovering.av.bygninger2022.pdf>

- OED. (2022). *Endringer i lover og forskrifter fra 1. juli 2022 fra Olje- og energidepartementet*. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/justerer-innforingen-av-ny-nettleiemodell2/id2920706/>
- RME. (2024). *I kraftsystemet handler mye om fysikk*. <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/slik-fungerer-kraftsystemet/i-kraftsystemet-handler-mye-om-fysikk/>
- Rosenberg, E., Seljom, P., & Authen, M. L. (2023). *Buliding enery efficiency measures in Norwegian energy system analysis*. <https://hdl.handle.net/11250/3091918>
- Sartori, I., Pedrero, R. A., Bagle, M., Haaskjold, K., Seljom, P., Rosenberg, E., Schäffer, L. E., Granado, P. C., & Tomasgard, A. (2023). *Flexbuild final report*. <https://hdl.handle.net/11250/3097899>
- Seljom, P., Rosenberg, E., & Haaskjold, K. (2023). The Effect and Value Ofend-Use Flexibility in the Low-Carbon Transition of the Energy System. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4523740>
- Shirazi, E., & Jadid, S. (2017). Cost reduction and peak shaving through domestic load shifting and DERs. *Energy*, 124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.148>
- Simienergi. (2024). *Simulering av energibruk og inneklime i bygg*. <https://simien.no>
- SSB. (2024). *Bygningsmassen*. <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/bygg-og-anlegg/statistikk/bygningsmassen>
- Statnett. (2021). *Derfor har vi prisområder* <https://www.statnett.no/om-statnett/bli-bedre-kjent-med-statnett/om-strompriser/fakta-om-prisomrader/>
- Statnett. (2022). *Det eksepsjonelle kraftåret 2021*. <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemeldinger/nyhetsarkiv-2022/det-eksepsjonelle-kraftaret-2021/>
- Sølsnæs, M. (2024). *Faktura fra Fjordkraft som viser effekttrapp og effektpris for april 2024*.

- Sørensen, Å. L., Morsund, B. B., Andresen, I., Sartori, I., & Lindberg, K. B. (2024). Energy profiles and electricity flexibility potential in apartment buildings with electric vehicles – A Norwegian case study. *Energy and Buildings*, 305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113878>
- Tang, H., & Wang, S. (2021). Energy flexibility quantification of grid-responsive buildings: Energy flexibility index and assessment of their effectiveness for applications. *Energy*, 221.
- THEMA. (2022). *Har vi fleksibilitet nok til å balansere kraftsystemet fram mot 2050?* (2022-20). <https://www.regjeringen.no/contentassets/5f15fcec3143d1bf9cade7da6afe6e/no/sved/vedlegg4.pdf>
- Thorvaldsen, K. E., Backe, S., & Farahmand, H. (2024). Long-term operational planning for flexible residential buildings with seasonal storage and capacity-based grid tariffs. 309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114066>
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (6., Ed.).

Vedlegg

Vedlegg 1

Vedlegg 1: Tabell over Kontrollberegningsverdier på varetilskudd fra NS:3031: 2014 Tabell A.2.

Bygningskategori	Belysning [W/m ²]	Utstyr [W/m ²]	Personer [W/m ²]
Småhus	2,0	1,8	1,5
Boligblokk	2,0	1,8	1,5
Barnehage	8,0	2,0	6,0
Kontorbygning	8,0	11,0	4,0
Skolebygning	10,0	6,0	12,0
Universitets- og høyskolebygning	8,0	11,0	6,0
Sykehus	8,0	8,0	2,0
Sykehjem	8,0	4,0	3,0
Hotellbygning	8,0	1,0	2,0
Idrettsbygning	8,0	1,0	10,0
Forretningsbygning	15,0	1,0	10,0
Kulturbygning	8,0	1,0	3,2
Lett industribygning, verksted	8,0	10,0	2,0

Vedlegg 2

Vedlegg 2: Tabell over Kontrollberegningsverdier på innendørstemperaturer hentet fra NS:3031: 2014 Tabell A.3.

Bygningskategori	Settpunkt temperaturer for oppvarming [° C]	
	«I driftstiden»	«Utenfor driftstiden»
	Øvre komfort temperatur	Nedre komfort temperatur
Småhus	21	19
Boligblokk	21	19
Barnehage	21	19
Kontorbygning	21	19
Skolebygning	21	19
Universitets- og høyskolebygning	21	19
Sykehus	21	19
Sykehjem	21	19
Hotellbygning	21	19
Idrettsbygning	19	17
Forretningsbygning	21	19
Kulturbygning	21	19
Lett industribygning, verksted	21	19

Vedlegg 3

Vedlegg 3: Forklaring av tiltakenes antatte påvirkning på forskyvningspotensialet

Tiltak	Påvirker forskyv. pot.	Kommentar
Etterisolering vegg	Ja	Ved beregning av transmisjonstapet
Etterisolering tak	Ja	Ved beregning av transmisjonstapet
Etterisolering gulv	Ja	Ved beregning av transmisjonstapet
Utskiftning vinduer og dører	Ja	Ved beregning av transmisjonstapet
Redusert innendørstemperatur på netter og i helger	Nei	Forskyvningspotensialet beregnes for toppplasttimene om formiddagen og ettermiddagen
Forbedring varmegjenvinning ventilasjon	Ja	Ved beregning av ventilasjonstapet
Forbedring vifteeffekt (SFP)	Ja	Ved beregning av ventilasjonstapet
Behovsstyrt ventilasjon (DCV)	Ja	Ved beregning av ventilasjonstapet
Styringssystem belysning	Nei	Forskyvningspotensialet beregnes for toppplasttimene som antas å være når bygget er i bruk, og det antas at styringssystemet har liten påvirkning på effektreduksjon i rommene da.
Energieffektivt belysningsutstyr	Nei	Bruker kontrollberegningstall for alt utstyr i boligen som avgir varme, og da eneste tiltak i tilknytning til utstyr er på belysning, ble andelsberegningene her enda et usikkert moment og sees derfor bort ifra ved beregningen av forskyvningspotensialet.
Automatisk solskjerming	Nei	Det blir i disse beregningene fokusert på oppvarming (og ikke kjøling). Effektiviseringen knyttet til solskjerming tas derfor ikke med.
Energioppfølgingssystem (EOS)	Nei	EOS antas å ikke ha en direkte påvirkning på oppvarmingseffekten da det heller brukes for å kartlegge og forbedre systemer i fremtiden. Men det kan absolutt være relevant for eksempel å prøve ut dette i en forflytningsperiode.
SD-anlegg	Nei	Det samme gjelder her som for EOS.

Vedlegg 4

Vedlegg 4: Tabell som viser scenario 1 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
			1	Etterisolering vegg	x										
2	Etterisolering tak	x													
3	Etterisolering gulv	x													
4	Utskiftning vinduer og dører	x													

Vedlegg 5

Vedlegg 5: Tabell som viser scenario 2 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Etterisolering vegg			x											
2	Etterisolering tak			x											
3	Etterisolering gulv			x											
4	Utskiftning vinduer og dører			x											

Vedlegg 6

Vedlegg 6: Tabell som viser scenario 3 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Etterisolering vegg				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	Etterisolering tak				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	Etterisolering gulv				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	Utskiftning vinduer og dører				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Vedlegg 7

Vedlegg 7: Tabell som viser scenario 4 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
6	Forbedring varmegjenvinning ventilasjon		x	x											
7	Forbedring vifteeffekt (SFP)														
8	Behovsstyrt ventilasjon (DCV)														

Vedlegg 8

Vedlegg 8: Tabell som viser scenario 5 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
6	Forbedring varmegjenvinning ventilasjon				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	Forbedring vifteeffekt (SFP)				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	Behovsstyrt ventilasjon (DCV)				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Vedlegg 9

Vedlegg 9: Tabell som viser scenario 6 og hvilke tiltak som blir innført fordelt på bygningskategori

Nr.	Tiltak	Bygningstype														
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	Etterisolering vegg		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	Etterisolering tak		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	Etterisolering gulv		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4	Utskiftning vinduer og dører		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	Natt- og helgesenkning		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	Forbedring varmegjenvinning ventilasjon		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7	Forbedring vifteeffekt (SFP)				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	Behovsstyrt ventilasjon (DCV)				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
9	Styringssystem belysning				x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	
10	Energieffektivt belysningsutstyr		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
11	Automatisk solskjerming				x		x	x	x	x			x	x		
12	Energioppfølgingsystem (EOS)		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
13	SD-anlegg				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Vedlegg 10

Vedlegg 10: Oppvarmingsteknologiandeler for bruk til aggregering av forskyvningspotensialet

Oppvarmingsteknologiandeler – til bruk under aggregering av data		
	Andel som ikke er strøm	Andel som må trekkes fra totalen for å få faktisk forbruk på grunn av effekt
NO1	11,7 %	30,2 %
NO2	7,0 %	28,3 %
NO3	10,8 %	27,7 %
NO4	8,0 %	25,9 %
NO5	8,5 %	27,7 %
Samlet for Norge	9,7 %	28,7 %



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway