



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning
Veileder: Thomas Martinsen

Modellering av energieffektivisering i norske husholdninger i TIMES: Innsikt og usikkerhet

Petter Nielsen

Master i Fornybar Energi

Forord

Denne masteroppgaven avslutter min Master i Fornybar energi, ved Norges Miljø- og biovitenskapelige universitet. Målet med oppgaven er å gi innsikt i modellering av energieffektivisering ved bruk av TIMES, samt undersøke faktorer som medfører usikkerhet ved modellering av energieffektivisering og hvordan disse faktorene påvirker resultatet.

Takk til alle mine medstudenter på Ås som har bidratt til å gjøre min tid ved universitetet både lærerik og underholdende. Takk også til professorer og hjelpelærere som har delt av sin kunnskap og bidratt til min utdanning. Spesiell takk rettes til Thomas Martinsen, min veileder for denne oppgaven, som har bidratt med god innsikt og veiledning.

Jeg vil gjerne også takke Aleksandra Roos i NVE for hjelp til bruk av TIMES modellen og data-anskaffelse, og modelleringsgruppen hos IFE for nyttige innspill knyttet til modelleringen i sluttperioden av oppgaven.

Til slutt en stor takk til familie og venner for støtte og hjelp underveis.

Sammendrag

Norske husholdninger og næringsbygg står for omkring 40 % av energibruken i Norge. For at husholdninger skal bli mer energieffektive kreves oppgradering av stående boligmasse og utbygging av nye energieffektive boliger. Studier viser til et stort potensial for energieffektivisering av bygg i Norge, men tekniske og økonomiske barrierer hindrer utviklingen.

I denne masteroppgaven har jeg modellert flere energieffektiviseringstiltak for å undersøke hvilke som er mest aktuelle å benytte i eksisterende husholdninger, og hvorfor disse tiltakene velges fremfor andre tiltak. Til å gjennomføre modelleringen har jeg benyttet NVEs studentversjon av TIMES-modellen og Wu et al. (2016) sin Modell A. Resultatene fra disse modelleringene vil sammenlignes med hverandre og resultater NVE har funnet ved bruk av SIMIEN. Dette for å gi innsikt i valg av effektiviseringstiltak og barrierer knyttet til modelleringen i TIMES.

Resultatene viser at energieffektivisering i stående husholdninger har et stort potensial. Potensialet er spesielt stort i småhus med standard TEK 69 og eldre. Denne byggkategorien står for over halvparten av den mulige besparelsen. Størst på Sør-øst landet (NO1) er besparelsen for tiltaket etterisolering av yttervegg med potensial på 6 100 GWh, etterfulgt av utskifting av vinduer og dører med potensial på 4 770 GWh. Ved innføring av disse to tiltakene vil 1/3 av varmebehovet for husholdninger i NO1 dekkes. Potensialet forutsetter at tiltakene er uavhengige, noe som ikke er tilfellet, og besparelsen vil derfor bli mindre i virkeligheten.

Tiltakene som ble benyttet av TIMES er energioppfølgingsystem (EOS), for alle byggkategorier i husholdninger, og etterisolering av tak, for småhus TEK 69 og eldre. Innføringen av disse tiltakene gir en gjennomsnittlig årlig besparelse på 907 GWh i NO1. Av denne besparelsen er størsteparten redusert varmebehov med 720 GWh, mens el-spesifikk og varmtvann står for henholdsvis 123 GWh og 63 GWh. Modeller er forenklinger av virkeligheten så denne besparelsen vil ikke oppnås eksakt, men resultatene av modelleringen gir et godt innblikk i hvilke bygg som har det største potensialet og hvilke tiltak som er de mest kostnadseffektive.

Abstract

Norwegian households and commercial buildings represent approximately 40 % of end use energy in Norway. For households to become more energy efficient construction of new more efficient households, renovation and upgrades of existing households are required. Studies shows that there is a large potential for energy efficiency in Norwegian households, but technical and economic barriers halts development.

In this thesis I have used a modelling approach to find the most suitable energy efficiency measures. The models used in this thesis is the student version of NVEs TIMES model and Wu et al. (2016) Model A. The modelling results from these models are compared to each other and results found by NVE using SIMIEN. The comparison is done in order to give insights to why certain measures are chosen, and barriers connected to the modelling of energy efficiency in TIMES.

The results shows that energy efficiency in existing households has a large potential. Especially detached households with TEK 69 and older. This housing category represents more than half of the potential savings. In South-east of Norway (NO1) the greatest savings come from increased insulation of walls, which has a potential of 6 100 GWh, followed by upgrading doors and windows which has a potential of 4 770 GWh. Introducing these two measures would reduce the need for heating in households in NO1 by approximately 33 %. When calculating the potential, I do assume that the measures are independent from each other, which is not the case. The total savings potential is therefore unrealistically high.

The measures used by TIMES includes energy saving systems, for all households, and increased insulation of roofs for detached households with TEK 69 and older. The introduction of these measurements reduces early energy consumption by 907 GWh in NO1. With regards to the savings most come from heat with 720 GWh, while electrical and hot water stands for 123 GWh and 63 GWh. The model is not an accurate depiction of reality, and the achieved savings is probably incorrect. Still the results give good insight as too in what category of buildings has the greatest potential and what measures are the most cost efficient.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	ii
Sammendrag	iii
Abstract	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	vii
Formelliste.....	vii
Tabelliste	vii
Definisjoner og forkortelser	ix
1 Introduksjon	1
1.1 Problemstilling.....	2
1.2 Avgrensninger.....	2
1.3 Oppbygning av oppgaven.....	3
2 Kunnskapsgrunnlag	5
2.1 Modellering av energieffektivisering	5
2.2 Modeller som brukes for å finne lønnsomhet av energieffektivisering.....	6
2.3 Modellering av energieffektivisering i Norge.....	9
2.4 Det norske energisystemet	9
2.5 Energieffektiviseringstiltak	11
2.5.1 Beskrivelse av energieffektiviseringstiltak	11
2.6 Data for energieffektiviseringstiltak.....	13
2.6.1 Besparelse for energieffektivisering.....	15
2.6.2 Kostnader for energieffektivisering.....	17
2.6.3 Etterspørselstyper	17
2.7 Datagrunnlag i TIMES	18
2.7.1 Bygningssektoren	18
2.7.2 Årlig energibehov for bygninger.....	19
2.7.3 Etterspørselsprofiler for bygninger	19
3 TIMES.....	21
3.1 TIMES-Norway.....	21
3.2 VEDA 2.0	23
3.3 Oppbygging av - og sammenhenger i TIMES.....	23
4 Metode	26
4.1 Beregning av besparelse for effektiviseringstiltak	26

4.2	Beregning av investeringskostnader for effektiviseringstiltak	28
4.3	Inkludering av energieffektivisering i TIMES og kjøring av modellen	30
4.4	Oppsetting og kjøring av Wu et al. (2016) Modell A	31
5	Resultater	33
5.1	Potensiell energibesparelse	33
5.2	Investeringskostnad	35
5.3	TIMES.....	37
5.3.1	Investeringer.....	37
5.3.2	Besparelse	38
5.3.3	Dekket etterspørsel.....	39
5.3.4	Strømpris	41
5.4	Wu et al. Modell A.....	41
6	Diskusjon	43
6.1	Diskusjon av resultater	43
6.1.1	Energibesparelse	43
6.1.2	Investeringskostnad	43
6.1.3	TIMES og Modell A	44
6.2	Barrierer og virkning av antakelser	46
6.2.1	Fullkommen konkurranse og rasjonell oppførsel.....	46
6.2.2	Økonomiske barrierer	47
6.2.3	Tekniske barrierer.....	47
6.2.4	Bruk av diskonteringsrente som representasjon for barrierer	48
6.3	Forutsetninger i datagrunnlag.....	50
7	Konklusjon	51
8	Videre arbeid.....	52
9	Kildeliste	53
	Vedlegg.....	56

Figurliste

Figur 1: Det norske energisystemet illustrert ved energikilder, distribusjon og forbruk.....	10
Figur 2: Oppbygningen av bygningssektoren i TIMES	18
Figur 3: Etterspørsel etter forskjellige typer energi gitt i GWh for alle bygg i perioden 2025-2040.....	19
Figur 4: Viser hvordan varmebehovet for husholdninger fordeler seg den første sesongen i året.....	20
Figur 5: Figuren viser forbruksprofilen til varmebehov i husholdninger slik det er fordelt i TIMES.	20
Figur 6: Oversikt over inputkategorier, prosesser og outputkategorier som brukes av TIMES.	22
Figur 7: Figuren viser strukturen i TIMES med handelsvarer og prosesser øverst og eksempler med forskjellige handelsvarer og prosesser lenger ned.....	24
Figur 8: Tidsoppdelingen som er gjeldene for den versjonen av TIMES som benyttes i denne oppgaven. Med denne inndelingen får modellen 208 unike tidsperioder hvert år.....	25
Figur 9: Oversikt over start- og sluttår for de forskjellige milepælsårene som brukes i tidsinndelingen Base i TIMES.	25
Figur 10: Mulig årlig energibesparelse i GWh per tiltak i husholdninger.....	34
Figur 11: MAC-kurve for småhus TEK 69 og eldre.....	37
Figur 13: Strømpriser som finnes av TIMES i året 2030 med og uten energieffektivisering.....	41

Formelliste

Formel 1: Formlene benyttet til beregning av energibesparelse (ES) og tilbakebetalingsperiode (Tp) benyttet av Wu et al. i Modell A.	7
Formel 2: Minimeringsproblem og forutsetninger for Modell A.	7
Formel 3: Formler for beregning av energibesparelse og nettonåverdi i modell B.	8
Formel 4: Minimeringsproblemet som skal løses i Wu et al. modell B. Inkludert grenser og forutsetninger.	8
Formel 5: Formel for beregning av besparelse for energieffektiviseringstiltakene.....	28
Formel 6: Formel for beregning av investeringskostnad (kNOK/GWh) for effektiviseringstiltakene. ...	29

Tabelliste

Tabell 1: Tabellen viser hvordan energibesparelse fra EOS fordeler seg for de forskjellige typene etterspørsel.	13
Tabell 2: Oversikt over energieffektiviseringstiltak, bygningskategorier, byggeårsperioder (TEK) og klimasoner.	14

Tabell 3: Nøkkelverdier for klimadata; årsmiddeltemperatur for de forskjellige byer benyttet i Multiconsults simuleringer.....	15
Tabell 4: Antakelser om utbedring for de forskjellige TEK benyttet av Multiconsult	15
Tabell 5: Tabellen viser hvilke parameterverdier som påvirkes av de forskjellige tiltakene og hvordan disse endrer seg i et eldre småhus i Oslo regionen (TEK 49) når det oppgraderes til TEK 17 standard	16
Tabell 6: Oversikt over hvilke tiltak som påvirker de forskjellige etterspørselskategoriene	17
Tabell 7: Oversikt over hvilke tiltak som er relevante for de ulike TEK.....	27
Tabell 8: Forutsetninger for besparelsesmål (KWh), kostnadsgrense (kr) og grenser for besparelse per tiltak benyttet i denne oppgavens beregning av Wu et al sin Modell A	32
Tabell 9: Tabellene viser de forskjellige verdier som benyttes i denne oppgavens beregning av Modell A.....	33
Tabell 10: Oversikt over hvor stor potensiell årlig besparelse hvert tiltak har og hvordan denne besparelsen fordeler seg på de forskjellige byggkategoriene.....	35
Tabell 11: Oversikt over investeringskostnad i kNOK/GWh for aktuelle tiltak i byggkategoriene for husholdninger. Ut ifra tabellen kan vi se at EOS er det mest kostnadseffektive tiltaket.	36
Tabell 12: Hvilke tiltak TIMES har investert i for ulike byggkategorier NO1 innen husholdninger og hvor stor denne investeringen har vært i forskjellige perioder	38
Tabell 13: Årlig besparelse i GWh for effektiviseringstiltak og tilhørende boligkategori, fordelt på type etterspørsel som reduseres. Tabellen viser også hvordan reduksjonen endrer seg over flere år.....	38
Tabell 14: Oversikt over besparings- og utbygdpotensial for alle tiltak i byggkategorien småhus TEK 69 og eldre.....	39
Tabell 15: Tabellen viser hvor stor andel av energietterspørsel som dekkes av effektivisering, andre nye tiltak og allerede installerte tiltak for forskjellige etterspørselstyper.....	40
Tabell 16: Tabellen viser verdier som er avgjørende for beregningen av ES og Tp. Målcellen viser den minimerte summen av de benyttede tiltakene.	42
Tabell 17: Tabellen viser hvor stor energibesparelse som er oppnådd ved bruk av Modell A, hvor stor andel av besparelsespotensial som er benyttet og den totale investeringen som har blitt gjort.	42

Definisjoner og forkortelser

BEER	Building energy efficiency retrofit. Ettermontering av energieffektivitetstiltak i bygninger
BRA	Bruksareal
Byggkategori	Alle TEK for en type bygg. Husholdninger har to typer byggkategorier TEK 69 og eldre og TEK 87 og nyere
EOS	Energioppfølgingssystem
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
Evalueringsperiode	Tidsperiode som undersøkelser er begrenset til
Husholdninger	boligblokker og småhus
IFE	Institutt for Energiteknikk
Kuldebroverdi	Summen av varmetap fra kuldebroer delt på oppvarmet bruksareal
LCCA	Life-Cycle Cost Analysis (Analyse av livssyklus kostnad)
LCOE	Levelized cost of energy
Lekkasjetall N50	Mål for de samlede luftlekkasjer i et bygg
SFP-faktor	Spesifikk Vifte Effekt: mål på effekten som kreves for å flytte en m ³ luft gjennom ventilasjonen
TEK**	Byggeteknisk forskrift, tallet bak TEK er årstallet den aktuelle versjonen ble vedtatt
U-verdi	Angir varmeisolerende evne. Defineres som $W/(m^2K)$

1 Introduksjon

Klimaendringer som et resultat av utslipp av drivhusgasser, er et av de største problemene verden står ovenfor i dag. Som en del av arbeidet med å overkomme denne utfordringen har FN laget bærekraftsmålene (FN, 2022). Mål 7 «ren energi til alle» nevner energieffektivisering og viser til et behov for stor utvikling innen dette området. Effektivisering vil også være en viktig bidragsyter til mål 13 «stoppe klimaendringene» og mål 11 «bærekraftige byer og lokalsamfunn» (FN, 2022). Effektivisering kan redusere atmosfærisk forurensing, negative eksternaliteter ved energiproduksjon og gi positive sosiale effekter som økt komfort og arbeidsplasser.

Norske husholdninger og næringsbygg stod i 2017 for 40 % av Norges energisluttbruk. Fremover forventes det at energibruken i norske bygg blir stadig mer effektiv, og nye forskrifter, kombinert med teknologiutvikling og bevisstgjøring, vil redusere den totale energibruken i norske bygninger (OED, 2017). NVE (2019) forventer også en reduksjon i den totale energibruken for energisystemet og peker på energieffektivisering som avgjørende for fremtidens energisystem. Å benytte tilgjengelig kraft på best mulig måte kan hindre ny kraftutbygging, samt holde forbruket nede (NVE, 2021a). I perioder hvor det er høye strømpriser og hvor kraftprisen stiger hurtig vil energieffektivisering være ekstra lønnsomt. Energieffektivisering vil også bidra til at denne typen store prisendringer forekommer i mindre grad (Stadelmann, 2017).

Modeller er vanlig å benytte når man skal analysere effekten av nye energiltak. Ved å ta utgangspunkt i faktorer som påvirker dagens situasjon og videreføre trender, kan man etablere scenarier for å undersøke hvordan ulike tiltak vil påvirke fremtidens energisystem. Estimering av langtidsscenarioer er komplisert og krever en prognose knyttet til teknologi- og markedsutvikling. I følge DeCarolis et al. (2017) er dette en av de største utfordringene ved modellering av energisystemer. Modellering av energisystemer krever en forenkling av virkeligheten, og barrierer som politikk, usikker fremtid og uforutsette hendelser er vanskelige å ta hensyn til (Vogel et al., 2015).

Energieffektivisering har flere teknologiske og økonomiske barrierer. I følge Lavenergiutvalget (2009) er de viktigste økonomiske barrierene begrenset kapitaltilgang,

lave energipriser og usikkerhet knyttet til fremtidens økonomi. For de teknologiske barrierene er manglende kompetanseutveksling og utfordringer med utprøving av nye teknologier de viktigste. Ved innføring av energieffektiviseringstiltak i eksisterende bygg følger det ofte med en ekstra kostnad for gjennomføringen av tiltaket. For eksempel kan etterisolering av vegger i en husholdning medføre et mindre bruksareal innendørs, og redusere boligens verdi.

1.1 Problemstilling

I denne oppgaven vil de mest kostnadseffektive tiltakene for husholdninger finnes på to forskjellige måter; en flerkriteria modell utarbeidet av Wu et al. og bruk av NVEs studentversjon av TIMES. Resultatene fra disse modellene vil sammenlignes med hverandre og resultater fra en undersøkelse ved bruk av SIMIEN, for å besvare spørsmålet:

Modellering av energieffektivisering i TIMES - innsikt og usikkerhet?

Formålet med oppgaven er å benytte TIMES for å finne det kostnadseffektive potensialet for husholdninger. I forkant av modelleringen vil besparelespotensial og investeringskostnad for de aktuelle effektiviseringstiltakene regnes ut. For å få innsikt i hvor pålitelig resultatet i TIMES er og hvilke usikkerheter som påvirker resultatet, sammenlignes det med resultater fra Modell A og SIMIEN, som baserer seg på samme datagrunnlag for energieffektiviseringstiltak. Jeg gjennomfører modelleringen i TIMES og modell A, mens modelleringen i SIMIEN er gjort av NVE.

Å sammenligne besparelse og investering i de forskjellige modellene vil gi bedre innblikk i hva som er det lønnsomme potensialet for forskjellige energieffektiviseringstiltak. De forskjellige modellene har også forskjellige barrierer og sammenligningen vil gi innsikt i hvilken effekt dette har på resultatene.

1.2 Avgrensninger

- Det vil kun sees på effektivisering av husholdninger i resultat og diskusjon, men effektiviseringstiltak for kommersielle bygg vil også legges inn i modelleringen for å gi et mer realistisk bilde av det kostnadseffektive potensialet.

- Det sees kun på det norske energisystemet. Import og eksport av kraft vil være med, men det tas ikke hensyn til andre lands produksjon eller etterspørsel.
- Offshoreaktiviteter, med unntak av offshore vind, inkluderes ikke i denne oppgaven da de ikke ligger inne i TIMES. Offshore vind inkluderes grunnet tilkobling til strømmettet på land.
- Innføring av energieffektivisering vil kun modelleres frem til 2042.

1.3 Oppbygning av oppgaven

Strukturen i oppgaven med alle hovedkapitler vil her kort beskrives.

Kunnskapsgrunnlag

I dette kapitlet presenteres litteratur som tar for seg temaer som vil være relevante for arbeidet med modellering av energieffektivisering i husholdninger i Norge. Mye av litteraturen vil diskutere forskjellige typer modeller og hvordan barrierer for energieffektivisering best kan inkluderes i energieffektivisering.

Videre gis det en forklaring av det norske energisystemet og energieffektivisering. Før det gjøres en grundigere gjennomgang av effektiviseringstiltakene som gjennomføres for husholdninger i denne oppgaven, datagrunnlaget som benyttes for tiltakene og de mest relevante data fra TIMES modellen.

TIMES

I denne delen av oppgaven vil TIMES modellen forklares. En generell gjennomgang av TIMES og VEDA vil etterfølges av oppbygning for modellen.

Metode

Dette kapitlet forklarer metoden som er benyttet for å besvare problemstillingen og fremskaffe resultatene i denne oppgaven. Følgende gjennomgås: Beregning av besparelse og kostnader for energieffektiviseringstiltak, hvordan disse er lagt inn og kjøring av TIMES, og oppsett og kjøring av Wu et al. (2016) Modell A.

Resultater

I dette kapitlet vil resultatene fra TIMES og Wu et al. (2016) Modell A presenteres. For å gjøre resultatene oversiktlige vil det kun presenteres tall for NO1. Det vil kun legges frem resultater som er relevante for diskusjonen.

Konklusjon

Oppgaven oppsummeres og problemstillingen besvares.

2 Kunnskapsgrunnlag

I dette kapitlet presenteres litteratur som tar for seg temaer som vil være relevante for arbeidet med modellering av energieffektivisering i husholdninger i Norge. Litteraturen vil presentere forskjellige typer modeller og hvordan barrierer for energieffektivisering best kan inkluderes i energieffektivisering.

Videre gis det en forklaring av det norske energisystemet, før en grundigere gjennomgang av effektiviseringstiltakene som gjennomføres for husholdninger i denne oppgaven, datagrunnlaget som benyttes for tiltakene og relevante data fra TIMES modellen.

2.1 Modellering av energieffektivisering

Mundaca et al. (2010) hevder at ingen metode eller modell er den beste for alle typer energieffektivisering, og valget må tilpasses ut ifra typen problem som skal løses. Den vanligste modelltypen å benytte er energiøkonomiske partiellelikevektsmodeller som skaper likevekt mellom tilbud og etterspørsel i energimarkedet (Loulou, 2016). TIMES er et eksempel på en slik modell.

DeCarolis et al. (2017) hevder at partielle likevektsmodeller kan bidra til å gjøre gode beslutninger knyttet til energieffektiviserende tiltak. Det trekkes frem at de er nyttige for å eksemplifisere fremtidige effekter av teknologi og etterspørsel, og kan benytte sosial diskonteringsrente til å finne utslippsreduksjon og minimere kostnader ved flere teknologier over tid. De tillater rask og effektiv målsøking i komplekse energisystemer, og kan fange opp interaksjoner mellom sektorer som er vanskelige å se i sektorspesifikke modeller (DeCarolis et al., 2017).

Mundaca et al. (2010) viser til kapital- og driftskostnad som de viktigste faktorene ved valg av energieffektiviseringstiltak i modellering, videre de understreker at dette er en forenkling av virkeligheten. Grunnen til dette er at energieffektivisering blir holdt tilbake av mange forskjellige barrierer. Eksempler på barrierer kan være markedssvikt, manglende transaksjonskostnader, irrasjonell oppførsel og imperfekt informasjon (Neij et al., 2009). Disse barrierene er vanskelig å få frem i modellering da de er i kontrast med de vanligste antakelsene i energiøkonomiske likevektsmodeller. Dette gjør at det er vanskeligere å

modellere energieffektivisering på en korrekt måte enn det er å modellere nye energikilder og økt produksjon.

Modeller kan vise til gode besparelser ved bruk av lønnsomme tiltak, men tiltakene lar seg ikke alltid gjennomføre. Nesten all modellering av energieffektivisering i stående bygg har begrenset seg til en bestemt type representativt bygg. Alle bygninger har unike geografiske og driftsmessige løsninger, og effektiviseringstiltak må derfor bli subjektivt undersøkt for hvert eneste bygg (Stadelmann, 2017). I tillegg til ovennevnte barrierer knyttet til energieffektivisering gjør dette at det blir en forskjell mellom realisert- og kostnadseffektivt potensial. Denne forskjellen refereres til som «the efficiency gap».

En høy diskonteringsrente blir ofte brukt for å minske «the efficiency gap». Høy diskonteringsrente vil gi energieffektiviseringstiltakene en lavere nåverdi og i modellering av energieffektivisering benyttes ofte en høy diskonteringsrente for å representere effekten av de forskjellige barrierene ved implementering (Stadelmann, 2017).

Diskonteringsrenta klarer ikke å fange opp hele forskjellen vi ser mellom det faktiske markedet og det som modelleres. Dette skyldes bl.a. barrierer knyttet til utbygging av energieffektivisering, men kan også handle om hvordan vi måler energieffektivisering. Det å måle effekten og kostnaden av energieffektivisering er i virkeligheten en usikker prosess som mangler en standard metode (Ang, 2006).

2.2 Modeller som brukes for å finne lønnsomhet av energieffektivisering

Forskjellige modeller har forskjellige styrker og svakheter (Kheiri, 2018). For å finne lønnsomheten av effektiviseringstiltak er det blitt foreslått å bruke flerkriteria modeller kalt BEER (Building energy efficiency retrofit). Denne typen modeller tar for seg spesifikke bygg eller byggkategorier for å finne ut hvordan man best mulig kan effektivisere gjeldende bygg (Diakaki et al., 2008). De to modellene som er introdusert i dette delkapittelet representerer to typiske kategorier BEER modeller. Modell B er en LCCA modell (Life-cycle cost analysis), og Modell A er ikke det. Hovedforskjellen er at Modell B tar hensyn til ytelsessvikt for tiltakene, som skader, slitasje og feil på anlegg.

Wu et al. (2016) benytter to forskjellige modeller for å beregne kostnader for energieffektiviseringstiltak. Den første modellen, Modell A, er en flerkriteria modell som har

fokus på årlig energibesparelse og tilbakebetalingstid. Energibesparelse og tilbakebetalingstid defineres i Modell A som vist i Formel 1, hvor x er beslutningsvariabelen og x_i representerer nummeret til det gjeldende bygget. a_i er den gjennomsnittlige årlige besparelsen for bygg i , b_i er enhetsprisen for tiltak i i bygg i ; c er strømpris; r er prosentvis økning i strømpris; t er livstid for tiltaket og T er evalueringsperioden.

Formel 1: Formlene benyttet til beregning av energibesparelse (ES) og tilbakebetalingsperiode (T_p) benyttet av Wu et al. i Modell A.

$$ES = \sum_{i=0}^I a_i x_i,$$

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i x_i}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n a_i x_i c (1+r)^t / T},$$

I denne modellen blir ES energibesparelse etter innføring av tiltak og T_p er tilbakebetalingstid beregnet som forholdet mellom investeringskostnad og økonomisk besparelse per år. λ_1 og λ_2 er positive vekter som til sammen er lik en, I er maksimum antall bygg som tiltak installeres i, α er et energibesparingsmål (KWh) og β er totalt budsjett for tiltakene. Denne modellen finner den best mulige løsningen ved bruk av minimeringsproblemet og forutsetningene vist i Formel 2. De beste tiltakene vil bli de som har kort tilbakebetalingstid og høy energibesparelse.

Formel 2: Minimeringsproblem og forutsetninger for Modell A.

$$\min \lambda_1 T_p - \lambda_2 ES,$$

$$s. t. \begin{cases} 0 \leq x_i \leq I_i, i = 1, \dots, I, \\ ES \geq \alpha, \\ \sum_{i=1}^n b_i x_i \leq \beta, \end{cases}$$

I den andre modellen benyttet av Wu et al. (2016) finner de i tillegg til energibesparelse og tilbakebetalingstid, Nettonåverdi (NNV). Denne modellen inkluderer også vedlikeholds/driftskostnader og tar hensyn til innblanding fra andre tiltak. Med andre tiltak mener Wu et al. samme tiltak, men med forskjellig kostnad og besparelse, for eksempel etterisolering av vegg med forskjellige typer isolasjon (Wang et al., 2014).

Wu et al. (2016) antar at det er I typer bygg hvor det kan installeres tiltak og at det er J_i typer andre tiltak som kan benyttes. Tiltak j brukt i bygg i , kalles (i,j) . Ved å la x_i^j ($j=1, 2, \dots, J_i$) bestemme antallet andre tiltak, kan energisparing og NNV kalkuleres ved bruk av Formel 3.

Formel 3: Formler for beregning av energibesparelse og nettonåverdi i modell B.

$$ES = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} a_i^j x_i^j(t),$$

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{B(t)-C(t)}{(1+d)^t} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} b_i^j x_i^j(0)$$

T er i Formel 3 evalueringsperiode og $x_i^j(t)$ er antall iverksatte andre tiltak i år t . $x_i^j(0)$ er andre tiltak som settes i gang samtidig med hovedtiltaket i år 0, a_i^j er gjennomsnittlig årlig energibesparelse og b_i^j enhetspris. $B(t)$ er økonomisk besparelse som konsekvens av tiltak, $C(t)$ er årlig vedlikeholdskostnad, d er diskonteringsrenten i NNV beregningen.

Tilbakebetalingstid (T_p) definert som tidspunktet hvor $NNV = 0$. En viktig forskjell mellom Modell A og b ligger i at $x_i^j(t)$ varierer over tid i modell B, mens den i a er ansett som en konstant.

Modell B er i likhet med Modell A satt opp som et minimeringsproblem, se Formel 4. Ved å løse dette minimeringsproblemet finner de tiltakene som gir størst besparelse og samtidig gir raskest og mest avkastning(Wu et al., 2016).

Formel 4: Minimeringsproblemet som skal løses i Wu et al. modell B. Inkludert grenser og forutsetninger.

$$\min - \lambda_1 ES - \lambda_2 NPV + \lambda_3 T_p,$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^{J_i} x_i^j(0) \leq q_i, i = 1, 2, \dots, I, \\ ES \geq \alpha, \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} b_i^j x_i^j(0) \leq \beta, \\ T_p \leq T_0, \end{cases}$$

Som i minimeringsproblemet til Modell A skal summen av λ -faktorer være lik 1. α og β har også samme betydning som i a, mens T_0 i figur 4 er forventet tilbakebetalingstid og q_i er totalt antall tiltak som kan installeres i hver bygg type (i).

De to modellene ender opp med å gi forskjellige resultat når Wu et al. benytter de på to eksempelbygninger. I Modell A blir besparelsen lik for alle år, mens i Modell B faller besparelsen over tid som et resultat av slitasje. Modell B har dog muligheten til å investere ved en senere anledning, så besparelse i denne modellen kan øke ved et tidspunkt etter

evalueringssperioden. I begge tilfeller er tiltakene som installeres de som gir størst besparelse til lavest kostnad(Wu et al., 2016).

Det er svært utfordrende å modellere kostnader og gevinster knyttet til energieffektivisering som ikke er direkte knyttet til investering og driftskostnad. Dette skyldes bl.a. mangel på data. Fortsatt er energieffektivisering lønnsomt i mange tilfeller (Adisorn et al., 2021). Mundaca et al. (2010) konkluderer i sin evaluering med at innføringen av energieffektiviseringstiltak i husholdninger er en sammensatt og komplisert prosess som ikke på en god måte kan fanges opp ved bruk av tekno-økonomiske modeller. De understreker allikevel at modeller som er oppsatt på en god måte gir viktige rammeverk for organisering av informasjon og kan gi verdifull innsikt.

2.3 Modellering av energieffektivisering i Norge

NVE (2021b) har ved hjelp av SIMIEN simulert ulike energieffektiviseringstiltak for forskjellige bygninger fordelt på TEK og ulike klimasoner. De fant at det for norske næringsbyggbygg er et besparelspotensiale på nesten 9 TWh til en kostnad av 1 kr/KWh. For småhus og boligblokker fant de et besparingspotensial på henholdsvis 3 TWh og 1 TWh til samme kostnad. Denne undersøkelsen baserte seg på det samme datagrunnlaget som jeg har benyttet i denne oppgaven.

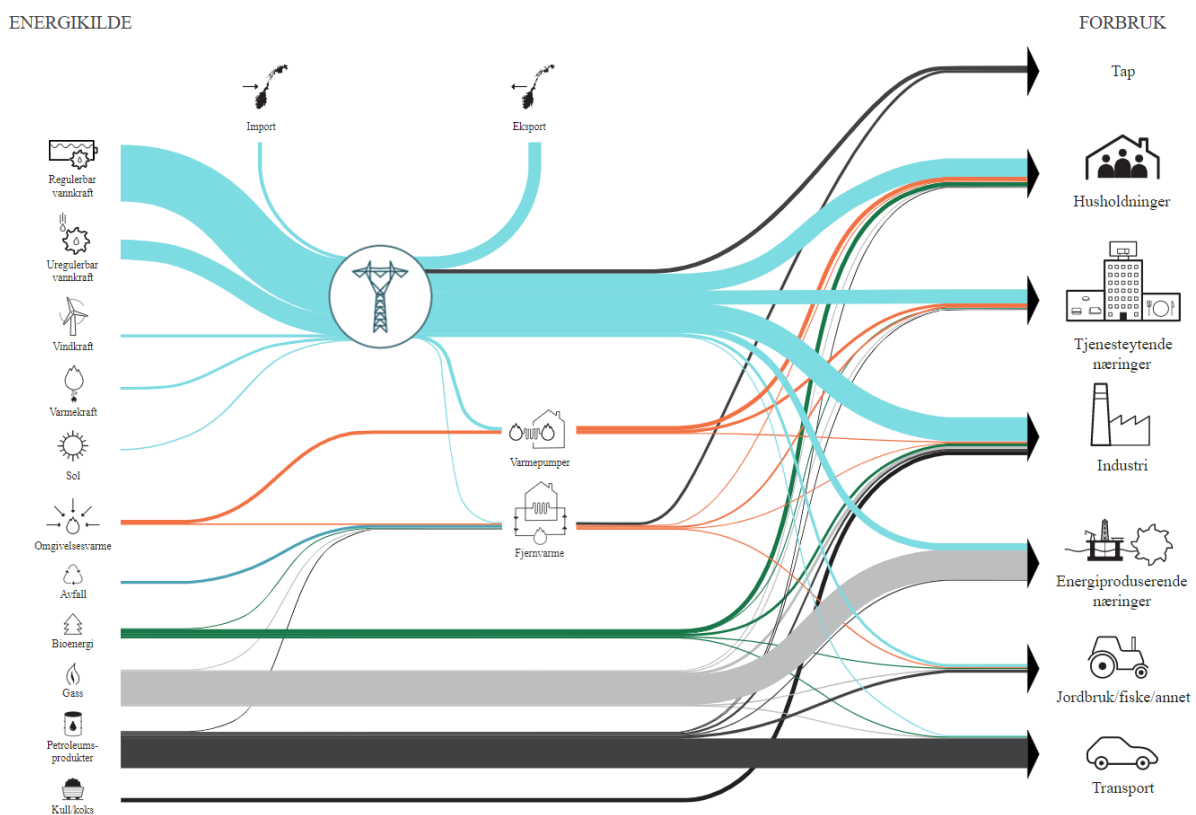
Tiltakene som ble tatt i bruk ved NVE (2021b) sin modellering av energieffektivisering i SIMIEN er EOS, natt- og helgesenking, etterisolering av vegg og tak, energieffektivt belysningsutstyr og tiltak på ventilasjon. For husholdninger ble tiltakene EOS, etterisolering tak og natt- og helgesenking benyttet (Roos, 2022). I denne modelleringen ble det benyttet diskonteringsrenter mellom 6 % og 12 %.

2.4 Det norske energisystemet

Hensikten med energisystemer er å levere energitjenester til sluttbrukere. FNs klimapanel definerer et energisystem som alle komponenter knyttet til produksjon, omgjøring, distribusjon og bruk av energi (Barret et al., 2014). Denne definisjonen oppsummerer presist hva begrepet energisystem innebærer, uten å gå i detalj på hvor komplekse energisystem kan være.

Det norske energisystemet er unikt ved at over halvparten av energibruk dekkes av elektrisitet, og at ca. 90 % av denne elektrisiteten er produsert med vannkraft. En stor del av denne vannkraften er regulerbar noe som gjør at det er rimelig å regulere produksjonsmengden. Det er annerledes for de fleste energisystemer i Europa hvor termisk kraftproduksjon basert på fossilt brensel fortsatt er dominerende.

I Norge står vannkraft for den største andelen av elektrisitetsproduksjonen, mens husholdninger, tjenesteytende næringer og industri står for det meste av bruken, se Figur 1. En andel av denne elektrisiteten vil bidra til å dekke bygningers behov for oppvarming og avkjøling ved bruk av energitjenesteteknologier. Varme til husholdninger, tjenesteytende næringer og industri kommer også fra fjernvarme og varmepumper. I tillegg er bioenergi i form av ved en vanlig metode for oppvarming i husholdninger. Effektiviseringstiltakene i denne oppgaven påvirker hovedsakelig varmeetterspørsel, men enkelte påvirker også elektrisitet og varmtvann.



Figur 1: Det norske energisystemet illustrert ved energikilder, distribusjon og forbruk. Figuren viser hvor forskjellige typer energibærere kommer fra og hvor de forbrukes(OED, 2022). Figuren viser at en stor andel av produsert elektrisitet (øverst, lyseblå) går til husholdninger og tjenesteytende næringer.

2.5 Energieffektiviseringstiltak

I dette avsnittet gis det en grundigere forklaring av de forskjellige effektiviseringstiltakene som benyttes i modellene i denne oppgaven. Videre gjennomgås tiltak for husholdninger, forutsetninger og beregninger gjort av Multiconsult, samt hvilke etterspørrelstyper de forskjellige tiltakene påvirker.

2.5.1 Beskrivelse av energieffektiviseringstiltak

Etterisolering vegg

For tiltaket etterisolering av vegg gjøres det i småhus følgende endringer; ny kledning, overflatebehandling og utbytting av vinduer. Utbytting av vinduer er nødvendig for at lufttetthet skal kunne heves til TEK 17 nivå, og besparelsen som kommer ved bedring i lufttettheten blir derfor delt 50/50 med tiltaket skifte dører og vinduer. For TEK 87 er det kun gavlveggen på småhus som forbedres.

For boligblokker skjer isolering av ytterveggen annerledes. Her legges det pussisolasjon utenpå eksisterende fasade og installeres nye sålbenkbeslag (utvendig vinduskarm). Her er det også kun gavlvegg som er interessant for TEK 87. For både småhus og boligblokker forutsettes det en forlengelse av tak. I realiteten vil energibesparelsen for isoleringstiltak følge utetemperaturen, men i modelleringen vil den følge behovsprofilen for oppvarming i TIMES.

Etterisolering tak/loft

Etterisolering av tak/loft forutsetter i småhus enkeletterisolering av kaldluft med 100-300 mm isolasjonsmateriale. For boligblokker avhenger tiltaket av tidligere TEK. For eldre bygg fjernes gammel isolasjon og det etterisoleres. TEK69 antas å ha kompakttak, hvor papptekkingen fjernes og erstattes med ny etter at etterisolering er gjennomført. TEK 87 tiltaket er kun beskrevet som etterisolering i Multiconsults rapport.

Etterisolering gulv

Forbedringen som skjer i tiltaket etterisolering av gulv er for eldre og TEK 69 boligblokker og småhus en forbedring av etasjeskillene og bedring av isolasjonen mot bakken. For TEK 87

lages det i boligblokker et etasjeskille av betong mot uoppvarmet kjeller, mens i småhus forbedres fundamentet mot grunnen.

Skifte vinduer og dører

Ved skifte av vinduer og dører settes det inn nye som holder TEK 17 standard. Forbedringen i lufttetthet deles 50/50 med tiltaket etterisolering av vegg. Etablering av balansert ventilasjon med varmegjenvinning har som forutsetning at småhus kun har en flate og at det etableres et aggregat på kaldtloft. For boligblokker er forutsetningene for dette tiltaket at det etableres kabelanlegg i gamle skorsteinspiper og søppelsjakter.

Energieffektiv belysning

Energieffektiv belysning innebærer å bytte alle lyspærer med LED lys. Et bytte til LED lys vil medføre mindre varmeproduksjon fra lyspærer noe som påvirker varmebehovet.

Multiconsult antar at 70 % av energien som blir spart ved endring til LED lys må brukes til å erstatte varmen produsert fra vanlige lyspærer. Dette medfører en kraftig redusert total besparelse for tiltaket.

Energioppfølgingssystem (EOS)

Det finnes flere løsninger for etablering av energioppfølgingssystem (EOS). Nødvendig måleutstyr, program, etc. varierer, men det kan være et så enkelt tiltak som å få timesdata fra strømlleverandør. Med EOS får huseier en god kontroll på energibruken uke for uke og kan dokumentere gevinstene ved andre enøktiltak. Dette vil motivere huseier til å legge en større innsats i å oppnå besparelse. Energibesparelsen ved energioppfølging er erfaringsmessig på 2-10 % av netto energiforbruk før enøk, avhengig av førtilstand og bruk av EOS. Type løsning og kostnad avhenger av dagens situasjon og detaljnivå på EOS. EOS kan gjøres manuelt eller automatisk, hvorav manuelt er mest aktuelt for småhus og boligblokker. EOS er det eneste tiltaket som i denne oppgaven påvirker flere etterspørselstyper, se Tabell 1.

Tabell 1: Tabellen viser hvordan energibesparelse fra EOS fordeler seg for de forskjellige typene etterspørsel.

Type husholdning	Varme	Varmtvann	Elektrisitet
Småhus, TEK 69 og eldre	66,4 %	11,4 %	22,2 %
Småhus, TEK 87 og nyere	60,3 %	13,1 %	26,6 %
Boligblokker, TEK 69 og eldre	66,4 %	11,4 %	22,2 %
Boligblokker, TEK 87 og nyere	60,3 %	13,1 %	26,6 %

Natt- og helgesenking

Natt- og helgesenking kan være en del av et EOS system, men er i denne oppgaven satt opp som et eget tiltak. Forbedringen som her representerer tiltaket, er innføring av automatisk nattsenking på elektriske ovner og erstatning av gamle ovner (NVE, 2020).

2.6 Data for energieffektiviseringstiltak

Data for energieffektiviseringstiltak er hentet fra «kostnader for energieffektivisering» (2021a) gjennomført av Multiconsult på bestilling fra NVE. Multiconsult har beregnet energibesparelse og kostnad for 13 energieffektiviseringstiltak i bygg. Datagrunnlaget for bygningsmassen er fra 2021, og bygningsmassen er delt inn i 13 forskjellige bygningskategorier, 4 byggeperioder og 5 klimasoner, se Tabell 2. Ulike byggetekniske forskrifter (TEK) representerer de 4 byggeperiodene. Besparelse ved innføring av tiltakene beregnes som en oppgradering fra nåværende TEK til TEK 17, som er dagens nybyggstandard (Multiconsult, 2021a).

Tabell 2: Oversikt over energieffektiviseringstiltak, bygningskategorier, byggeårsperioder (TEK) og klimasoner.

<u>Energieffektiviseringstiltak</u>	<u>Bygningskategorier</u>
Etterisolering vegg	Småhus
Etterisolering tak/loft	Boligblokk
Etterisolering gulv	Barnehage
Utskifting vinduer og dører	Kontorbygning
Natt- og helgesenkning	Skolebygning
Forbedring varmegjenvinning ventilasjon	Universitet/høgskole
Forbedring vifteeffektivitet (SFP)	Sykehus
Behovsstyring ventilasjon (DCV)	Sykehjem
Styringssystem belysning	Hotellbygning
Energieffektivt belysningsutstyr	Idrettsbygning
Automatisk solskjerming	Forretningsbygning
Energioppfølgingsystem (EOS)	Kulturbygning
SD-anlegg	Lett industri / verksted
<u>Byggeårsperioder (TEK-referanser)</u>	<u>Klimasteder (geografiske landssoner)</u>
Eldre (enn TEK49)	Bergen
TEK69	Kristiansand
TEK87	Oslo
TEK97	Tromsø
	Trondheim

Multiconsult (2021b) har i sin revisjon av energikarakterskala funnet at TEK for ulike bygningskategorier, med unntak av barnehager, på en god måte representerer den energimerkede bygningsmassen i forhold til størrelse på byggene. I denne oppgaven er ikke barnehage i fokus, så datagrunnlaget som har blitt benyttet for denne kategorien vil ikke utdypes videre. Utgangspunktet som benyttes for de forskjellige byggkategoriene er de tall som er definert i TEK standarden for de aktuelle byggkategorier. Enkelte korreksjoner har blitt gjort grunnet nye krav som er gjeldene for alle bygg. Tiltak på bygg som holder TEK 10 og høyere standard regnes ikke som aktuelt, og dette er begrunnet med at besparelsen vil bli liten. Analysen inkluderer derfor kun bygg til og med TEK 97, som tilsvarer 76 % av arealet for stående husholdninger (NVE, 2020).

Multiconsult har ved hjelp av SIMIEN gjennomført simuleringer for 5 geografiske soner i Norge som representeres av byene Oslo, Kristiansand, Bergen, Trondheim og Tromsø. Disse byene er også representative for hver sin strømregion. Det er benyttet klimadata som er forhåndsinstallert i SIMIEN. Årsmiddeltemperatur som vist i Tabell 3, er blant klimadataene

som er benyttet. Årsmiddeltemperatur er en nøkkelverdi som brukes for beregning av størrelsestilpasset effektbehov til romoppvarming.

Tabell 3: Nøkkelverdier for klimadata; årsmiddeltemperatur for de forskjellige byer benyttet i Multiconsults simuleringer.

Sted	Årsmiddeltemperatur
	°C
Oslo	6,3
Kristiansand	7,9
Bergen	7,5
Trondheim	5,1
Tromsø	2,9

For å finne besparelse for de 13 tiltakene i hver enkelt byggkategori har Multiconsult sett på endringen som må gjøres for at den nåværende TEK standarden skal bli hevet til TEK 17 nivå. De har deretter gjort et anslag på hva denne endringen vil koste. Detaljer knyttet til hva som gjøres for forskjellige tiltak i husholdninger og industri kan sees i vedlegg 1, 2 og 3.

2.6.1 Besparelse for energieffektivisering

Som et utgangspunkt for beregningen av besparelse har Multiconsult satt opp flere startpunkt for de forskjellige byggkategoriene som tilsvarer en TEK standard med noen justeringer. Med mekanisk avtrekk og småluftmengder som var vanlig i 1969 og tiden etter, tilfredsstilles ikke kravene i arbeidsmiljøloven (1991). At byggene tilfredsstiller disse kravene med hensyn til ventilasjon og kjøling er satt som en forutsetning. Det antas derfor for alle TEK installert nyere ventilasjon, samt innlagt lokal kjøling. Det antas også at bygg som er konstruert etter en TEK standard eldre enn TEK 87 ikke har natt- og helgesenking. Tiltak og gjeldene antakelser vises i Tabell 4.

Tabell 4: Antakelser om utbedring for de forskjellige TEK benyttet av Multiconsult. Det gjøres antakelser for alle TEK knyttet til innføring av nyere ventilasjon, lokal kjøling og natt- og helgesenking.

TEK	Antakelse		
	Nyere ventilasjon	Innlagt lokal kjøling	Natt- og helgesenking
TEK97	Ja	Ja	Ja
TEK87	Ja	Ja	Nei
TEK69	Ja	Ja	Nei
Eldre TEK	Ja	Ja	Nei

Etter å ha definert disse utgangspunktene har de sammenlignet energibruken for hver bygningskategori før og etter at effektiviseringstiltak innføres, hvor forskjellen i energibruk er spart energi. Det benyttes flere parametere til å måle forbedring, og disse varierer mellom tiltakene, se Tabell 5.

Tabell 5: Tabellen viser hvilke parameterverdier som påvirkes av de forskjellige tiltakene og hvordan disse endrer seg i et eldre småhus i Oslo regionen (TEK 49) når det oppgraderes til TEK 17 standard. Forklaring av parameterverdier finnes under definisjoner og forkortelser.

Tiltak	Parameterverdier	Fra	Til
Etterisolering vegg	U-verdi yttervegg [W/m ² K]	0,96	0,18
	Lufttetthet, lekkasjetall N50 [1/h]	5,00	2,80
	Normalisert kuldebroverdi [W/m ² ,K]	0,05	0,03
Etterisolering tak/loft	U-verdi tak [W/m ² K]	0,81	0,13
Etterisolering gulv	U-verdi gulv [W/m ² K]	0,61	0,10
Skifte vinduer og dører	U-verdi vinduer/ dører [W/m ² K]	2,8	0,8
	Lufttetthet, lekkasjetall N50 [1/h]	5,0	2,8
	Solfaktor fast solskjerming	0,75	0,4
Natt- og helgesenking	Set.punkt oppvarming utenfor driftstid [°C]	22,0	20
Varmegjenvinning, ventilasjon	Varmegjenvinning ventilasjon [%]	0,0	0,8
	Frostsikringstemperatur [oC]	Naturlig ventilasjon	Ingen
	SFP-faktor [kW/(m ³ /s)]	Naturlig ventilasjon	1,5
Energieffektivt belysningsutstyr	Internlaster, belysning [W/m ²]	11,1	1,95
Energioppfølgingssystem (EOS)	Prosentvis besparelse på alle energiposter		2 %

Total besparelse ved hvert tiltak finnes så ved å ta gammel energibruk og trekke fra ny energibruk, et utdrag av denne beregningen kan sees i vedlegg 4.

Med hensyn til småhus og boligblokker er det nyttig å merke seg standardene som er brukt. Et småhus i disse beregningene har 2 etasjer og et oppvarmet bruksareal på 160 m². En boligblokk har 3 etasjer, oppvarmet bruksareal på 900 m² og grunnflate på 300 m².

2.6.2 Kostnader for energieffektivisering

Kostnader for de forskjellige tiltakene er funnet ved å se på kostnaden av å gjennomføre endringene som er beskrevet for hvert tiltak i kapitlet «Beskrivelse av energieffektiviseringstiltak». Ut ifra dette har Multiconsult laget en oversikt over høy, medium og lav kostnad for tiltakene. Lav kostnad representerer oppgradering av nye bygg (TEK 87-97), høy kostnad gamle bygg (TEK 69 og eldre) og middels kostnad bygg i midten (TEK 69-87). For de tiltak hvor TEK 97 ikke er aktuell, benyttes TEK 49 og eldre for høy kostnad, TEK 69 for middels kostnad og TEK 87 for lav kostnad.

2.6.3 Etterspørselstyper

Effektiviseringstiltakene kan redusere etterspørsel fra fire ulike kategorier; oppvarming, varmtvann, strøm og nedkjøling. De fleste tiltak påvirker kun varme, men enkelte som EOS påvirker flere, se Tabell 6. TIMES har ingen etterspørsel for kjøling i husholdninger, men for effektiviseringstiltak hvor kjøling er aktuelt for husholdninger er effekten så liten at den av Multiconsult er satt lik null. For kommersielle bygg er alle etterspørselstypene aktuelle. I tilfeller hvor påvirkningen er minimal eller ja (noe) er den også satt lik null.

Tabell 6: Oversikt over hvilke tiltak som påvirker de forskjellige etterspørselskategoriene. Kjøling er kun aktuelt for kommersielle bygg, da TIMES ikke har denne etterspørselskategorien for husholdninger.

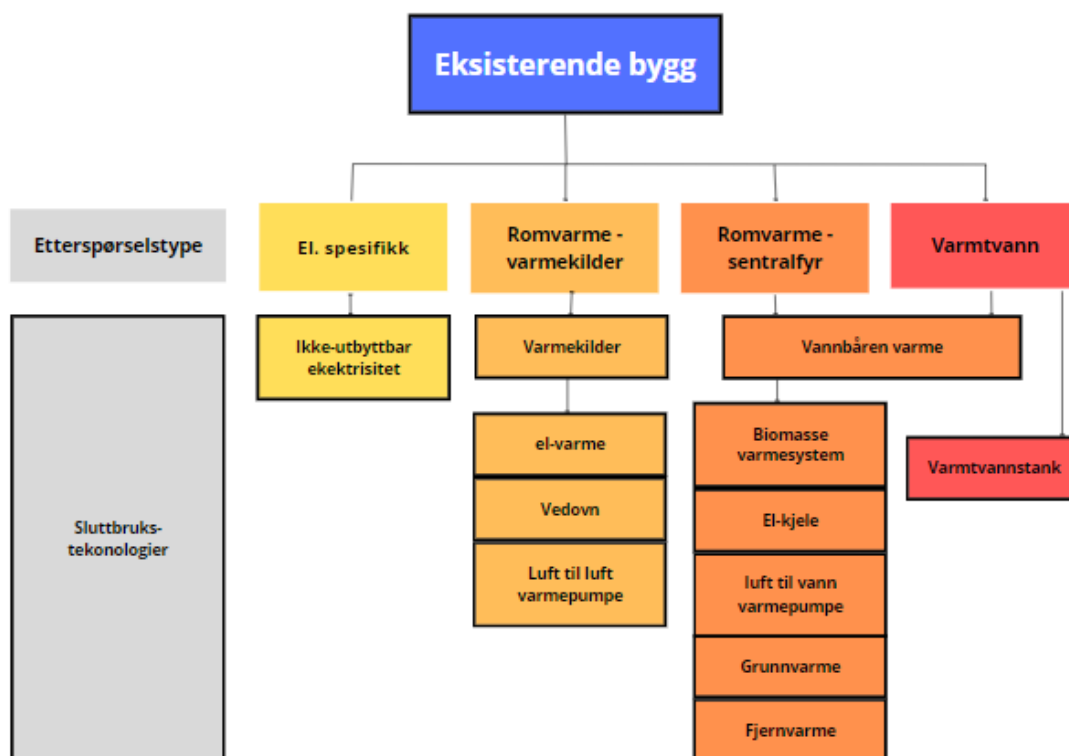
PÅVIRKNING	Etterspørselskategorier			
	Oppvarming	Varmtvann	Strøm	Kjøling
Tiltak				
Etterisolering vegg	Ja	Nei	Minimalt	Ja (noe)
Etterisolering tak	Ja	Nei	Minimalt	Ja (noe)
Etterisolering gulv	Ja	Nei	Minimalt	Ja (noe)
Utskifting vinduer og dører	Ja	Nei	Minimalt	Ja (noe)
Natt- og helgesenkning	Ja	Nei	Minimalt	Minimalt
Forbedring varmegjenvinning ventilasjon	Ja	Nei	Minimalt	Nei
Energieffektivt belysningsutstyr	Ja	Nei	Ja	Ja
Energioppfølgingssystem (EOS)	Ja	Ja	Ja	Ja

2.7 Datagrunnlag i TIMES

I TIMES benyttes baseline 21 scenariet som er basert på EUs Climate Target Plan og utviklet i forbindelse med arbeidet knyttet til Fit for 55. Dette scenariet er grunnsenarioet i denne oppgaven. Energieffektivisering, fornybarpolitikk og transportpolitikk har alle utgangspunkt i 2017.

2.7.1 Bygningssektoren

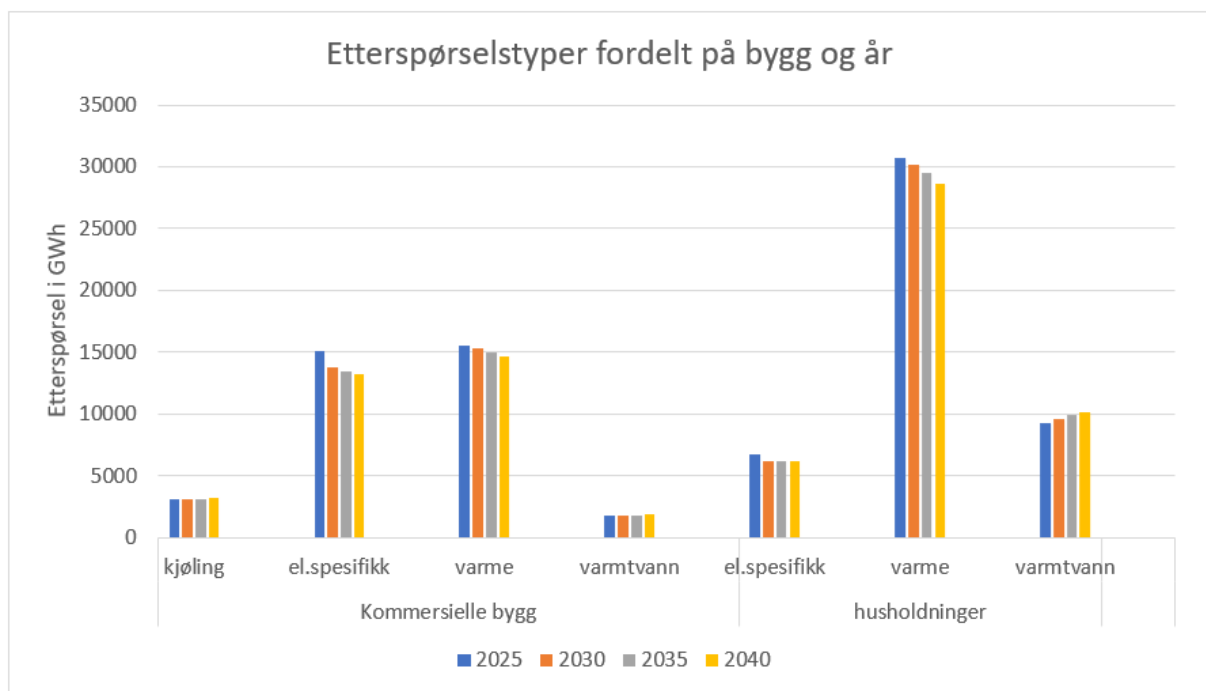
Bygningssektoren i TIMES er delt inn i husholdninger og ikke-husholdninger, som i denne oppgaven kalles kommersielle bygg. Alle bygg i disse kategoriene er igjen delt inn i nye og eksisterende bygg. Eksisterende bygg har teknologier som bidrar til å dekke etterspørselen i startåret, mens i nye bygg må det gjøres investeringer for å dekke etterspørselen. Oppbygningen av bygningssektoren er lik for nye og eksisterende bygg, men effektiviseringstiltakene vil kun påvirke eksisterende bygg, se Figur 2.



Figur 2: Oppbygningen av bygningssektoren i TIMES. Oppbygningen er lik for nye og eksisterende bygg, men energieffektiviseringstiltakene vil kun påvirke eksisterende bygg.

2.7.2 Årlig energibehov for bygninger

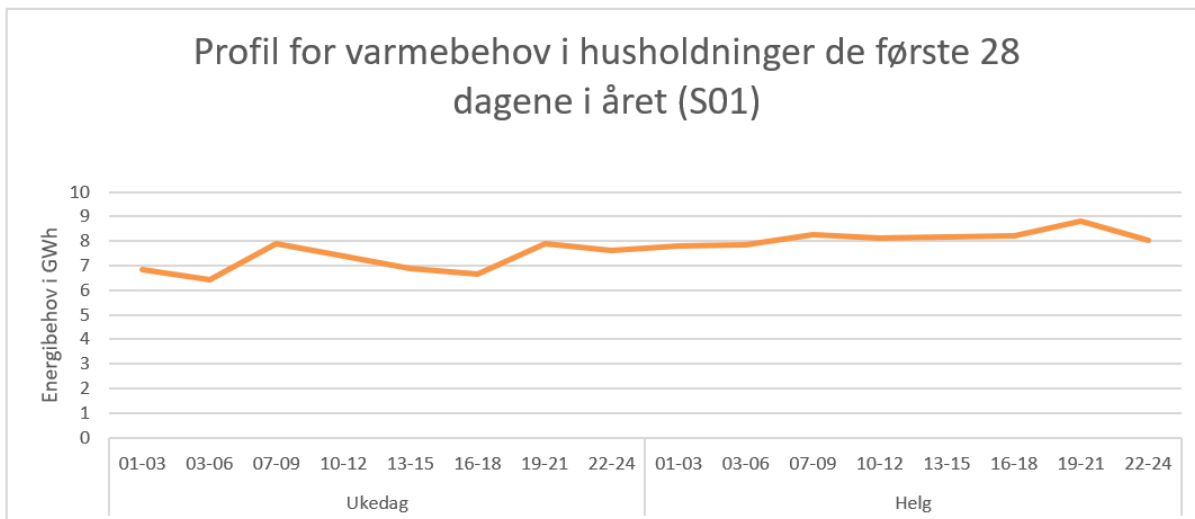
Energieterspørsel for bygninger er i TIMES basert på dagens forbruk og prosjektert inn i fremtiden. Energieterspørsel for alle regioner reduseres hvert femte år med mellom 1-6 % avhengig av region og etterspørsel type. Det er tre forskjellige typer etterspørsel for småhus og boliger; varme, strøm og varmtvann. Kommersielle bygg har i tillegg en etterspørsel etter kjøling. Det er størst etterspørsel etter varme i både husholdninger og kommersielle bygg, se Figur 3.



Figur 3: Etterspørsel etter forskjellige typer energi gitt i GWh for alle bygg i perioden 2025-2040.

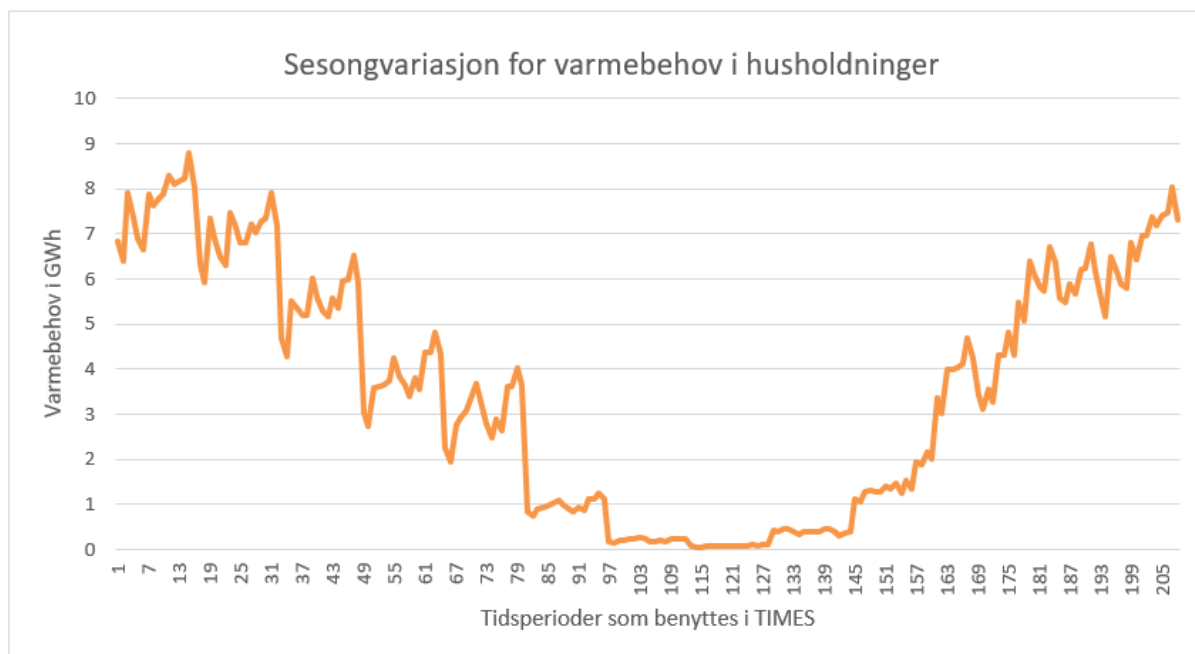
2.7.3 Etterspørselsprofiler for bygninger

Alle etterspørselstyper er fordelt utover tidsperiodene som benyttes i TIMES, se Figur 8. Forbruket for husholdninger er høyest om morgenen i perioden kl. 07-09 og om kvelden i perioden kl. 19-21. Dette gjelder for både helger og hverdager, men den etterspurte effekten er generelt litt høyere i helger enn på hverdager. Forskjellen i etterspørsel varierer mer på hverdager, se Figur 4. For kommersielle bygg er det i ukedagene en tydelig forbrukstopp midt på dagen i ukedagene og lite forbruk i helgen.



Figur 4: Grafen viser hvordan varmebehovet for husholdninger fordeler seg den første sesongen i året. Tallene på den horisontale linjen representerer 3 timers intervallene som benyttes i TIMES. 01-03 representerer dagens 3 første timer, 03-06 de 3 neste, osv. Oppgitt energibehov gjelder for alle timer innen den gitte tidsperioden.

For sommersesongene er det et mye lavere energibehov, med mindre markante topper, se Figur 5. Dette gjelder for alle etterspørselstyper med unntak av kjøling som har en omvendt trend. Det meste av energibehovet i husholdninger er varme, så denne etterspørselen påvirker den generelle energibruksprofilen mest.



Figur 5: Figuren viser forbruksprofilen til varmebehov i husholdninger slik det er fordelt i TIMES. Toppene er dagtid og dalene er netter. Det er totalt 13 toppene og daler, disse tilsvarer hverdag og helg i de 13 sesongene som benyttes i TIMES. Varmebehovet som oppgis er behov per time og er likt i hver tidsperiode.

Varmebehovet er størst i starten og slutten av året og mindre i midten, se Figur 5. Tidsoppdelingen som brukes i TIMES har kun 208 tidsenheter per år, og dette gjør at varmebehovet ikke helt speiler virkeligheten, f.eks. tas det ikke hensyn til ekstremhendelser som uvanlig kalde dager.

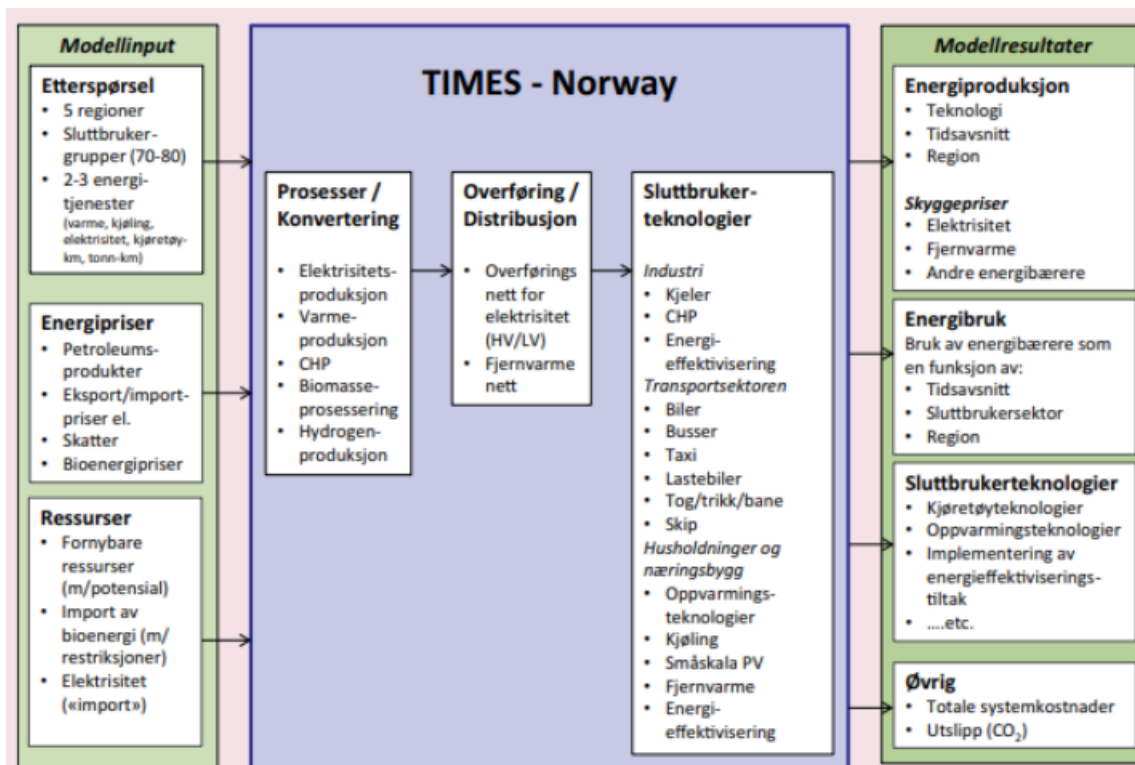
3 TIMES

I denne delen av oppgaven vil TIMES modellen forklares. En generell gjennomgang av TIMES og VEDA vil etterfølges av oppbygning for modellen.

3.1 TIMES-Norway

Utviklingen av IFE-TIMES-Norway begynte i 2017 som et samarbeid mellom NVE og IFE. Basert på denne modellen har NVE sin studentversjon av TIMES blitt utviklet, og det er studentversjonen som brukes i denne oppgaven. Modellen vil heretter kun refereres til som TIMES. Den er basert på tidligere versjoner av TIMES-Norway og MARKAL-Norway. Rammeverket TIMES er bygget på er utviklet av IEA- ETSAP (Den internasjonale energiorganisasjonen – Energi-, teknologi- og systemanalyse programmet) og bruker programmeringsspråket GAMS (General Algebraic Modelling System)(IFE, 2020).

TIMES er en teknologirik teknisk-økonomisk likevektsmodell for den norske energisektoren. Informasjon og estimater knyttet til etterspørsel og tilgjengelige ressurser legges inn i modellen eksogent. En av styrkene til modellen er at forsynings siden har mange detaljerte prosesser: Det skilles mellom forskjellige distribusjonsnett, biltransport modelleres med forskjellige drivstoff og teknologier, og detaljert beskrivelse av energibærerproduksjon. Hvordan modellen er bygget opp kan sees i Figur 6 nedenfor.



Figur 6: Oversikt over inputkategorier, prosesser og outputkategorier som brukes av TIMES (Rosenberg & Espegren, 2014).

TIMES er en teknologirik modell som gir en detaljert beskrivelse av det norske energisystemets ressurser, energibærere, konverteringsteknologier og etterspørsel. Modellen er en optimaliseringsmodell som betyr at objektfunksjonen til modellen har som mål å minimere kostnaden av energitjenester og produksjon, og samtidig dekke etterspørselen. Denne optimaliseringen gjør TIMES ved å ta investeringsbeslutninger knyttet til drift, produksjon og utbygging av nye teknologier (IFE, 2020). I TIMES er pris og mengde av forskjellige handelsvarer i likevekt, som betyr at det alltid produseres eksakt den mengden av en vare som er etterspurt av forbruker. Dette gir oss maksimalt økonomisk overskudd. For at denne balansen skal være mulig å oppnå antar modellen fullkommen konkurranse og perfekt informasjon.

Mulighetene ved bruk av TIMES modellen begrenser seg ikke til rene energiproblemer. Modellen kan brukes til å representere klimautslipp og materialbruk som er relatert til energisystemet. I tillegg kan modellen brukes for å gjøre vurderinger og se på effekter av energirelaterte klimatiltak. Disse simuleringene blir ganske presise grunnet detaljnivået for teknologier og energiresurser i alle energibrukene sektorer.

3.2 VEDA 2.0

Veda 2.0 er et skallprogram for TIMES. Et skallprogram som brukes til modellstyring er et brukergrensesnitt som gjør det enklere å jobbe med de forskjellige delene av en modell. Dette inkluderer håndtering av data, oppstart av modellgenerator og solver, samt undersøkelse av resultater.

Alle data som legges inn i VEDA 2.0 er organisert i Excel-filer. VEDA 2.0 integrerer informasjon fra disse Excel-filene til interne databaser for å gjøre håndtering av data enklere. VEDA forbereder og leverer en TIMES modell som blir frembrakt og løst ved hjelp av GAMS. GAMS sender så resultatene tilbake til VEDA 2.0.

Til forskjell fra tidligere VEDA versjoner har ikke VEDA 2.0 separert front-end og back-end, men er begge deler i samme program. VEDA 2.0 er delt inn i forskjellige moduler som alle har forskjellig funksjon. Navigator brukes til å håndtere Excelfiler. Browse, Items list og Items details brukes til å se på modelldata og sammenhenger mellom dataene. Run manager brukes til å velge ut hvilke data man ønsker å ha med i modellen og sender modellen til løsning i GAMS. Results gir oversikt over resultatene og mulighet til å gjøre enkle analyser med dem (KanORS-EMR, 2020).

3.3 Oppbygging av - og sammenhenger i TIMES

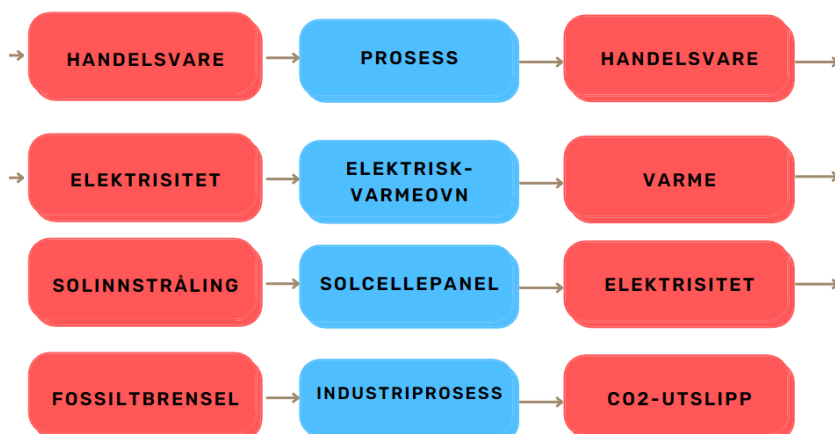
Studentversjonen av TIMES består av seks grunnfiler hvor det defineres forskjellige teknologier, sammenhenger mellom de og hvilke enheter de benytter. I korte trekk kan det fordeles slik: Filene industri, bygninger og transport definerer sluttbruk for sine respektive områder. Filen for kraft inneholder strømproduserende teknologier som vann-, vind- og solkraft. Filen for fjernvarme inneholder fjernvarme og kraftvarme (CHP), mens alle typer drivstoff er definert i den siste filen.

I tillegg til basefilene er det tre andre typer filer i TIMES: SubRES-filer som inneholder teknologier som ikke er definert i modellen fra før. Handelsfiler som bestemmer strømpris i tilgrensende land og behandler inn- og utlandshandel. Scenariofiler som kan være prosjektspesifikke og gir informasjon, verdier og begrensninger til teknologier definert i

base- og SubRES-filene. For at en scenariefil skal kunne brukes av modellen må prosessen allerede være definert i Base eller SUBres.

Referanse energisystemet (RES) i TIMES består av tre komponenter: Prosess, handelsvare og flyt. Prosesser (teknologier) representerer fysiske kraftverk, kjøretøy, apparater, energieffektiviseringssystem osv. som gjør en type handelsvare om til en annen handelsvare. Prosesser kan igjen deles inn primære prosesser som f.eks. utvinning av olje, konverteringsprosesser som f.eks. produksjon av varme fra biomasse og sluttprosesser som bruk av fjernvarme til oppvarming av bolig. Flere prosesser kan produsere samme handelsvare og denne handelsvaren kan så bli brukt videre av en eller flere prosesser. F.eks. vil de fleste teknologier som produserer strøm, levere denne handelsvaren ut til nettet hvor alle prosesser som forbruker strøm kan benytte den.

Handelsvarer omfatter alt som forbrukes og produseres av prosesser. Dette kan være materialer, energibærere, energibehov og utslipp. Flyt er det som binder prosesser og handelsvarer sammen. Flyt er handelsvarer som er knyttet til og beskrives av spesifikke prosesser og modellen vil under optimeringen bestemme hvor mye av hver handelsvare som skal produseres. Basert på denne strukturen vil TIMES lage ligninger slik at tilbud og etterspørsel for de forskjellige handelsvarene havner i likevekt, Figur 7.



Figur 7: Figuren viser strukturen i TIMES med handelsvarer og prosesser øverst og eksempler med forskjellige handelsvarer og prosesser lenger ned.

Grunnet at TIMES er en langsiktig modell er tidsoppdelingen og sluttåret for modellering viktig. Denne versjonen har tretten sesonger i løpet av ett år, skiller mellom ukedager og helg, og deler hvert døgn inn i åtte, med tre timer i hver del, se Figur 8. Dette gir 208 unike

tidsperioder som til sammen representerer ett år. For å best mulig kunne representere faktisk produksjon og etterspørsel er hver tidsperiode gjennomsnittet av de første 3 timene over 20 dager for hverdager og over 8 dager for helgedager. Dette gjør at alle hverdagstidsperioder totalt inneholder 60 timer, mens helgetidsperioder inneholder 24 timer. På denne måten blir forholdet mellom antallet helge- og hverdager riktig.

Sesong	Uke-	Tidsperioder
S01	Ukedag	01-03
S02	Helg	04-06
S03		07-09
S04		10-12
S05		13-15
S06		16-18
S07		19-21
S08		22-24
S09		
S10		
S11		
S12		
S13		

Figur 8: Tidsoppdelingen som er gjeldene for den versjonen av TIMES som benyttes i denne oppgaven. Med denne inndelingen får modellen 208 unike tidsperioder hvert år.

2050 er det seneste sluttåret modellen kan kjøre til, men det er enkelt å endre tidshorizonten for modelleringen. Når scenarioet settes opp, velges et milepælsår som avslutningsår for scenarioet. For tidsinndelingen Base, som er den vanligste å bruke, er hvert femte år et milepælsår, med unntak av milepælårene 2018 og 2019 som begge består av ett år og 2021 som består av tre år, se Figur 9.

Periode varighet (år)	Start år	Sluttår	Milepælsår
1	2018	2018	2018
1	2019	2019	2019
3	2020	2022	2021
5	2023	2027	2025
5	2028	2032	2030
5	2033	2037	2035
5	2038	2042	2040
5	2043	2047	2045
5	2048	2052	2050

Figur 9: Oversikt over start- og sluttår for de forskjellige milepælsårene som brukes i tidsinndelingen Base i TIMES.

Informasjon som legges inn i TIMES ved bruk av grunn-, subRES-, handels- og scenariofiler er alltid knyttet til et milepælsår. Informasjonen som legges inn kan være kostnader, installert kapasitet, øvre- og nedregrenser, brukstid, etterspørsel, mm. Siden denne informasjonen er knyttet til milepælsårene vil TIMES interpolere og ekstrapolere disse dataene for å gi verdier til nærliggende år. Data legges inn på denne måten for at modellen skal være raskere å kjøre.

TIMES sin etterspørsel er ikke-elastisk, hvilket skyldes at etterspørselen i modellen er lagt inn eksogent, så den vil ikke endre seg på kort sikt ved endringer i pris. På lang sikt kan TIMES reagere på endringer i pris ved å investere annerledes. Så det kan sies at modellen har elastisitet i forhold til investeringer. Den eksogene etterspørselen gjør også at ingen goder i TIMES er krysselastiske. Det vil si at prisen på et gode endres ikke av at det investeres i et annet gode.

Denne versjonen av TIMES kjører deterministisk. Det vil si at modellen ikke har noen innebygd usikkerhetsfaktor og at ingen av parameterne i modellen følger en sannsynlighetsfordeling. Dette gjør at modellen kun kan finne gjennomsnittstall eller typetall. Modellen tar ikke hensyn til tilfeldighet og variasjon i tidsavhengige prosesser (UIO, 2019).

4 Metode

Dette kapittelet forklarer metoden som er benyttet for å besvare problemstillingen og fremskaffe resultatene i denne oppgaven. Følgende er gjort:

- Beregning av besparelse for energieffektiviseringstiltak
- Beregning av investeringskostnad for energieffektiviseringstiltak
- Innlegging av tiltak i TIMES og kjøring av modellen
- Oppsetting og kjøring av Wu et al. (2016) Modell A

4.1 Beregning av besparelse for effektiviseringstiltak

For å finne de øverste grensene for årlig potensiell besparelse har jeg regnet ut hvor mye besparelse, i GWh, som kan komme fra hvert tiltak i hver region. For kommersielle bygg er

denne besparelsen oppgitt samlet for alle TEK standarder, mens for boliger og småhus er den delt inn i TEK 69 og eldre og TEK 87 og nyere.

Multiconsult (2021a) har oppgitt besparelse i kWh/m² fordelt på alle tiltak som er aktuelle for de forskjellige byggkategoriene. Ikke alle tiltak er aktuelle for alle TEK, se Tabell 7, så for de tiltak hvor en TEK ikke er aktuell vil kun resterende TEK for tiltaket bli brukt.

Tabell 7: Oversikt over hvilke tiltak som er relevante for de ulike TEK. TEK som holder standarden til TEK 10 og nyere regnes ikke som aktuelt å innføre effektiviseringstiltak på.

Tiltak og hvilken TEK de er relevante for				
Tiltak	Eldre	TEK69	TEK87	TEK97
Etterisolering vegg	Ja	Ja	Ja	Nei
Etterisolering tak	Ja	Ja	Ja	Nei
Etterisolering gulv	Ja	Ja	Ja	Nei
Utskifting vinduer og dører	Ja	Ja	Ja	Nei
Natt- og helgesenkning	Ja	Ja	Ja	Nei
Forbedring varmegjenvinning ventilasjon	Ja	Ja	Ja	Ja
Energieffektivt belysningsutstyr	Ja	Ja	Ja	Ja
Energioppfølgingssystem (EOS)	Ja	Ja	Ja	Ja

For å få total potensiell besparelse, må besparelsen ganges med tilgjengelig BRA. Besparelse vil endre seg avhengig av byggkategori, tiltak og region, og areal vil endre seg avhengig av tiltak, region og tidsperiode. Potensiell energibesparelse er regnet ut ved bruk av Formel 5. I denne formelen er Airt gjennomsnittlig areal for alle TEK i byggkategori i, i tidsperiode t for region r. Bijr er total besparelse for byggkategori i for tiltak j i region r. Det deles på 1 000 000 for å konvertere enheten fra kWh til GWh. Dette fordi TIMES leser den potensielle besparelsen som GWh. Tiltakene er ikke innbyrdes uavhengige og effekten av å bygge ut et tiltak, kan derfor redusere besparelsen fra et annet tiltak. Dette tas ikke hensyn til i utregningen.

Formel 5: Formel for beregning av besparelse for energieffektiviseringstiltakene. Airt er areal for byggkategori i, i region r, i tidsperiode t. Bijr er besparelsen for byggkategori i for tiltak j i region r. Det deles på 1 000 000 for å få den benevningen som benyttes i TIMES (GWh).

$$\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{13} \sum_{r=1}^5 \sum_{t=1}^3 \left(\frac{Airt * Bijr}{1000000} \right)$$

A = Gjennomsnittlig areal (m²)

B = Total besparelse (KWh/m²)

i = Byggkategori

t = Tidsperiode

4.2 Beregning av investeringskostnader for effektiviseringstiltak

Beregningen av kostnader for energieffektivisering som benyttes i TIMES er basert på kostnadene som Multiconsult har funnet. Kostnadene som benyttes av Multiconsult har en innregnet mva. på 25 % som fjernes før den kan benyttes i TIMES. Dette gjøres fordi TIMES er en samfunnsøkonomisk modell. Videre er det bare kostnaden kategorisert som middels som benyttes. Dette fordi det vil gjøres en gjennomsnittsberegning av areal og besparelse for de forskjellige byggkategoriene og tiltakene, og en middels kostnad er best egnet til å representere dette gjennomsnittet.

Alle teknologier benytter totalkostnad, med unntak av etterisolering vegg og etterisolering tak hvor det benyttes merkostnad. Dette fordi disse tiltakene nesten utelukkende gjennomføres i sammenheng med oppussing eller liknende.

Multiconsult har oppgitt investerings- og driftskostnader i kr/m² og besparelse i KWh/m², så for å finne faktiske kostnader ble kostnad og besparelse multiplisert med areal for gjeldende bygningsgrupper i de forskjellige regionene, NO1-NO5. I kommende tidsperioder vil det bli endringer i hvor mye stående bruksareal det vil være for hver TEK i hver bygningsgruppe ettersom nye bygg kommer til og gamle oppgraderes/fjernes.

Totalkostnaden for tiltakene er satt lik i alle regioner, og reduseres med ti prosent hvert tiår som et resultat av læringseffekter. Denne reduksjonen gjelder også for merkostnaden

knyttet til tiltakene isolering av vegger og tak. Besparelsen varierer avhengig av middeltemperatur og TEK på byggene i regionen, NO1 har f.eks. en overvekt av gamle boligblokker og besparelspotensial for denne bygningsgruppen er derfor høy.

Investeringskostnaden for tiltakene ble funnet ved å ta den utregnete gjennomsnittlige totalkostnaden multiplisere med arealet til gjeldene byggkategori og dividere den på tusen for å få kostnaden i kNOK. Deretter ble den dividert på gjennomsnittsbesparelse i GWh multiplisert med arealet for gjeldene byggkategori ved innføring av gjeldene tiltak for bygningstypen. Dette for å få kostnaden i kNOK/GWh som er den enheten TIMES leser, se Formel 6.

Formel 6: Formel for beregning av investeringskostnad (kNOK/GWh) for effektiviseringstiltakene. C_{ij} er gjennomsnittlig kostnad for byggkategori i , med tiltak j . $0,9^{t-1}$ representerer prisreduksjonen i hver tidsperiode. A_{itr} er det gjennomsnittlige arealet for byggkategori i , i tidsperiode t , i region r . B_{ijr} er den gjennomsnittlige besparelsen for byggkategori i med tiltak j i region r .

$$\sum_{i=1}^{15} \sum_{j=1}^{13} \sum_{r=1}^5 \sum_{t=1}^3 \frac{\left(\frac{(C_{ij} * 0,9^{t-1}) * A_{itr}}{1000} \right)}{\left(\frac{A_{itr} * B_{ijr}}{1000000} \right)}$$

A = Areal (m²)

C = Gjennomsnittlig kostnad (kr)

B = Gjennomsnittlig besparelse (kwh)

i = Byggkategori

j = Teknologi

t = Tidsperiode

r = Region (NO1, ..., NO5)

0,9 = Læringseffekt

Investeringstiltakene for boliger og småhus er delt inn i to kategorier. Grunnen til dette er stor forskjell i areal og besparelse for boliger og småhus som er eldre og nyere enn TEK 69. Kategoriene de har blitt delt inn i er TEK 87 og nyere, og TEK 69 og eldre. For tiltak som ikke er aktuelle for TEK 97 er kun tall for TEK 87 brukt.

Driftskostnader er kun aktuelt for EOS i boligblokker, og har en kostnad på 4 kr/m²/år for begge kategorier. Driftskostnader har blitt regnet ut på samme måte som investeringskostnad, og blir lagt inn i TIMES som en årlig kostnad.

4.3 Inkludering av energieffektivisering i TIMES og kjøring av modellen

For å legge inn nye teknologier i TIMES kan basis-, SubRES eller scenariefiler benyttes. Jeg har benyttet en kombinasjon av de to siste. SubRES er en type filer som utelukkende benyttes for å legge inn teknologier som ikke finnes i modellen fra før. Dette betyr at filen definerer en ny teknologi og kobler den opp til energisystemet som allerede er i modellen.

Det er praktisk å benytte en SubRES fil for modelleringen av energieffektiviseringstiltak siden det gjør det enkelt å ta teknologien inn og ut av energisystemet i modellen. Ved å inkludere den og ta den ut kan vi se på hvordan teknologien påvirker andre deler av energisystemet. Alle teknologier som defineres i SubRES_energy_efficiency ligger med fleksibel Input (FI) som gjør at modellen velger hvorvidt den vil benytte seg av disse teknologiene.

Etterspørsel er lagt inn i TIMES eksogent vil ikke kunne endre seg når modellen kjører. Besparelse blir derfor lagt inn som en handelsvare som produseres ved innføring av energieffektiviseringstiltak. Da kan det leses ut av modellen hvor mye energi som har blitt spart ved å se på hvor mye besparelse som har blitt produsert. Det opprettes to forskjellige handelsvarer for besparelse, en for husholdninger og en for kommersielle bygg. Dette fordi husholdninger og kommersielle bygg har forskjellige etterspørselsprofiler i TIMES og energieffektiviseringstiltakene følger disse profilene.

Hver teknologi må så defineres for hvert aktuelle bygg. Store forskjeller i areal og besparingspotensial for nye og gamle boliger og småhus gjorde at det var fornuftig å dele disse bygningskategoriene i to ved beregning av kostnader og besparelse. Disse bygningskategoriene har derfor to definerte prosesser per teknologi, en for bygninger opp til TEK 69 og en for bygninger fra TEK87.

Når en teknologi beskrives i SubRES oppretter vi en prosess. For alle teknologier i SubRES_energy_efficiency er handelsvaren som går inn i prosessen besparelse (CSV) og handelsvaren som går ut spesifikk besparelse knyttet til f.eks. varmebehovet for

husholdninger. Alle isolasjonstiltakene og utbygging av dører og vinduer sendes til en spesifikk besparelse for tiltak hvor effekten er sesongavhengig. Besparelsen blir her justert opp mot sesongprofilen for husholdninger og kommersielle bygg, før den endelige effekten av tiltakene vises i dekket varmebehov.

Startår for teknologien er definert som 2022 for alle energieffektiviseringstiltakene. 2022 var et naturlig valg siden det er året vi nå befinner oss i. Å sette 2022 som startår betyr at disse teknologiene først kommer til syne i året 2025 siden det er det førstkommende milepælsåret i TIMES.

Det er benyttet en diskonteringsrente på 15 % for energieffektivisering i husholdninger og 11 % for næringsbygg. Det er satt en høy diskonteringsrente grunnet usikkerheten knyttet til den faktiske effekten og kostnaden av tiltaket. Diskonteringsrenten er høyere for husholdninger enn for næringsbygg siden effekter på næringsbygg er bedre dokumentert.

I SUBres filen defineres også øvre grenser for besparelse av tiltakene for hver region og prosentvis fordeling av tiltak som påvirker forskjellige typer energietterspørsel. Etter at dette er definert i SUBres-filene vil TIMES gå inn i scenario filen som hører til SUBres filen og hente informasjon knyttet til investeringskostnad og driftskostnad for de ulike tiltakene.

For å kjøre modellen med den nye teknologien må modellen først synkroniseres i Navigator-fanen, og deretter inkluderes i et scenario i run manager-fanen. Når SUBres-filen og tilhørende scenariofil er inkludert vil energieffektivisering kunne benyttes som teknologi ved neste kjøring av modellen.

4.4 Oppsetting og kjøring av Wu et al. (2016) Modell A

Wu et al. (2016) Modell A anvendes på tiltakene som er aktuelle for småhus TEK 69 og eldre i NO1. Verdier for besparelse og kostnader settes lik de verdier som er lagt inn i TIMES for å gi et best mulig sammenligningsgrunnlag. Formler for beregning av Modell A vises i Formel 1 og Formel 2 i kunnskapsgrunnlaget.

TIMES ikke har en øvre grense for hva den kan investere, og den totale investeringen gjort i energieffektivisering for småhus TEK 69 og eldre i TIMES er satt som en øvre grense for Modell A. Uten en øvre investeringsgrense vil Modell A investere i alle tiltak som er

lønnsomme når grensen for ES settes $ES > 0$. Ved å benytte en øvre grense vil kun de mest lønnsomme tiltakene benyttes.

Det er satt opp grenser for hvor mye energi som kan spares ved hvert tiltak, denne grensen er funnet ved bruk av areal som er tilgjengelig for de forskjellige tiltakene og dekker derfor grensen for tilgjengelig areal som benyttes av Wu et al. (2016), se Tabell 8.

Tabell 8: Forutsetninger for besparelses mål (KWh), kostnadsgrense (kr) og grenser for besparelse per tiltak benyttet i denne oppgavens beregning av Wu et al sin Modell A. Besparelses mål er oppgitt i KWh og kostnadsgrensen er oppgitt i NOK.

Besparelses mål	-	>=	768 207 083
Tiltak	Besparelse (KWh)		Maks besparelse (KWh)
Etterisolering vegg	-	<=	5 026 695 044
Etterisolering tak/loft	-	<=	1 816 312 476
Etterisolering gulv	-	<=	1 876 632 816
Skifte vinduer og dører	-	<=	3 702 998 682
Natt og helgesenking	-	<=	1 166 193 250
Varmegjenvinning, ventilasjon	-	<=	877 996 068
Energioppfølgingssystem (EOS)	-	<=	437 188 424
Energieffektivt belysningsutstyr	-	<=	938 817 818
Kostnadsgrense	-	<=	5 908 430 418

I tillegg til besparelse og kostnader for alle tiltakene behøves det strømpris, prosentvis økning i strømpris, levetid og evalueringsperiode. Evalueringsperioden settes til 20 år, da evalueringsperioden som benyttes i denne oppgaven er 2022-2042. Livstid varierer mellom tiltakene, og for alle tiltak med livstid lenger enn evalueringstiden er livstid satt lik evalueringstid. Resultatene i baseline scenariet i TIMES gir en strømpris på 0,55 kr/KWh, og den prosentvise økningen for strømprisen er 2 % i perioden 2020 -2040, disse verdiene brukes i Modell A.

Wu et al. (2016) benytter i Modell A minimering for å finne det optimale resultat. ES settes negativ slik at den maksimeres og tilbakebetalingstid settes positiv. Det er også en vekting av besparelse og tilbakebetalingstid. I denne beregningen settes besparelse og tilbakebetalingstid som like viktig, og vektet begge med 0,5. Når alle verdier er på plass legges formelen for beregning inn i en excel-celle og problemløser brukes til å minimere målcellen. Målcellen er summen av $\lambda_1 T_p - \lambda_2 ES$, se Tabell 9.

Tabell 9: Tabellene viser de forskjellige verdier som benyttes i denne oppgavens beregning av Modell A. I cellene under minimering ligger formelen $\lambda_1 T_p - \lambda_2 E_S$ og målcellen er summen av denne beregningen for alle tiltakene. Ved å minimere målcellen vil modellen investere i de tiltak som gir høyest besparelse og lavest tilbakebetalingsperiode.

Tall	Verdier
Prosentvis økning i strømpris	0,02
Strømpris	0,55
Evalueringsperiode	20

Vekt	
Vekt ES	Vekt T _p
0,5	0,5

Tiltak	m ²	ES	Inesteringskostnad	Livstid	Minimering
Etterisolering vegg	-	75,0	1370,0	60,0	0,0
Etterisolering tak/loft	-	27,1	155,1	60,0	0,0
Etterisolering gulv	-	28,0	2355,0	60,0	0,0
Skifte vinduer og dører	-	55,3	1972,0	30,0	0,0
Natt og helgesenking	-	17,4	657,1	15,0	0,0
Varmegjenvinning, ventilasjon	-	13,1	122,0	20,0	0,0
Energioppfølgingssystem (EOS)	-	6,5	6,3	10,0	0,0
Energieffektivt belysningsutstyr	-	13,5	600,0	15,0	0,0

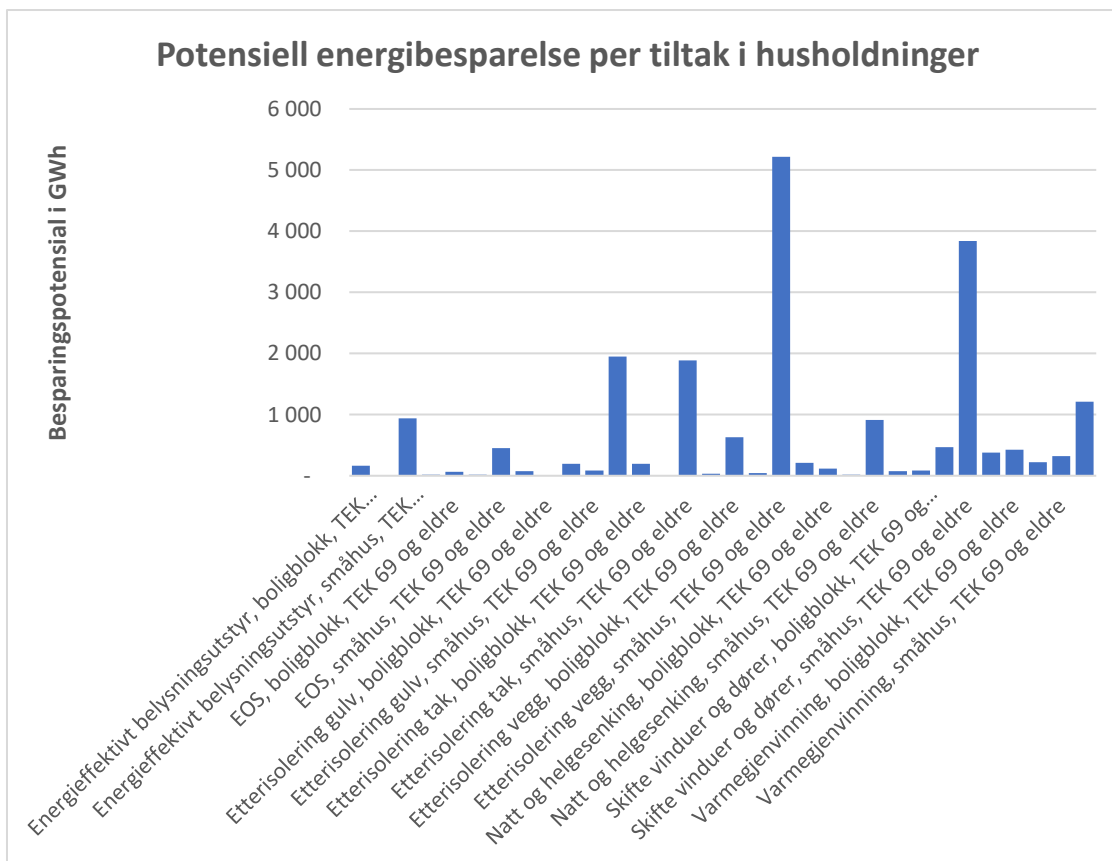
Målcelle
0,000

5 Resultater

I dette kapitlet vil resultatene av beregningen presentert i metodekapittelet presenteres. For å gjøre resultatene oversiktlige vil det kun presenteres tall for NO1. Det vil kun legges frem resultater som er relevante for diskusjonen.

5.1 Potensiell energibesparelse

Beregningen av potensiell årlig energibesparelse for effektiviseringstiltakene viser tydelig at det er småhus TEK 69 og eldre som har det største potensialet, se Figur 10. Totalt for alle byggkategorier i husholdninger er det et årlig besparelsespotensial på 20 274 GWh i NO1.



Figur 10: Mulig årlig energibesparelse i GWh per tiltak i husholdninger. Potensiale av tiltaket for bygg med TEK 69 og eldre vises til venstre, mens potensiale for TEK87 og nyere er til høyre.

Det er store forskjeller mellom den mulige årlige besparelsen for de forskjellige teknologiene. Etterisolering vegg og utskifting av vinduer og dører står for over halvparten av den årlige potensielle besparelsen på med potensiale på 6 100 GWh og 4 770 GWh, se Tabell 10. EOS har lavest mulig besparelse for husholdninger med mulighet for å spare 611 GWh.

Tabell 10: Oversikt over hvor stor potensiell årlig besparelse hvert tiltak har og hvordan denne besparelsen fordeler seg på de forskjellige byggkategoriene.

Tiltak og byggkategori	Sparepotensial (GWh)	Besparelse per tiltak (GWh)
Energieffektivt belysningsutstyr, boligblokk, TEK 69 og eldre	165	1 133
Energieffektivt belysningsutstyr, boligblokk, TEK 87 og nyere	11	
Energieffektivt belysningsutstyr, småhus, TEK 69 og eldre	939	
Energieffektivt belysningsutstyr, småhus, TEK 87 og nyere	18	
EOS, boligblokk, TEK 69 og eldre	64	611
EOS, boligblokk, TEK 87 og nyere	20	
EOS, småhus, TEK 69 og eldre	454	
EOS, småhus, TEK 87 og nyere	73	
Etterisolering gulv, boligblokk, TEK 69 og eldre	11	2 241
Etterisolering gulv, boligblokk, TEK 87 og nyere	195	
Etterisolering gulv, småhus, TEK 69 og eldre	87	
Etterisolering gulv, småhus, TEK 87 og nyere	1 947	
Etterisolering tak, boligblokk, TEK 69 og eldre	196	2 121
Etterisolering tak, boligblokk, TEK 87 og nyere	8	
Etterisolering tak, småhus, TEK 69 og eldre	1 885	
Etterisolering tak, småhus, TEK 87 og nyere	33	
Etterisolering vegg, boligblokk, TEK 69 og eldre	629	6 100
Etterisolering vegg, boligblokk, TEK 87 og nyere	41	
Etterisolering vegg, småhus, TEK 69 og eldre	5 216	
Etterisolering vegg, småhus, TEK 87 og nyere	213	
Natt og helgesenking, boligblokk, TEK 69 og eldre	118	1 124
Natt og helgesenking, boligblokk, TEK 87 og nyere	18	
Natt og helgesenking, småhus, TEK 69 og eldre	911	
Natt og helgesenking, småhus, TEK 87 og nyere	76	
Skifte vinduer og dører, boligblokk, TEK 69 og eldre	83	4 770
Skifte vinduer og dører, boligblokk, TEK 87 og nyere	468	
Skifte vinduer og dører, småhus, TEK 69 og eldre	3 842	
Skifte vinduer og dører, småhus, TEK 87 og nyere	376	
Varmegjenvinning, boligblokk, TEK 69 og eldre	426	2 176
Varmegjenvinning, boligblokk, TEK 87 og nyere	220	
Varmegjenvinning, småhus, TEK 69 og eldre	320	
Varmegjenvinning, småhus, TEK 87 og nyere	1 210	

5.2 Investeringskostnad

Beregningen av investeringskostnad for energieffektiviseringstiltak viser at EOS er det mest kostnadseffektive tiltaket for alle byggkategorier og deretter blir valget av tiltak mer avhengig av byggkategori. Investeringskostnad er oppgitt i kNOK/GWh og tiltak med lav pris og høy besparelse er derfor de som får den laveste investeringskostnaden. Kostnader for alle aktuelle tiltak i de forskjellige byggkategoriene sortert alfabetisk, vises i Tabell 11.

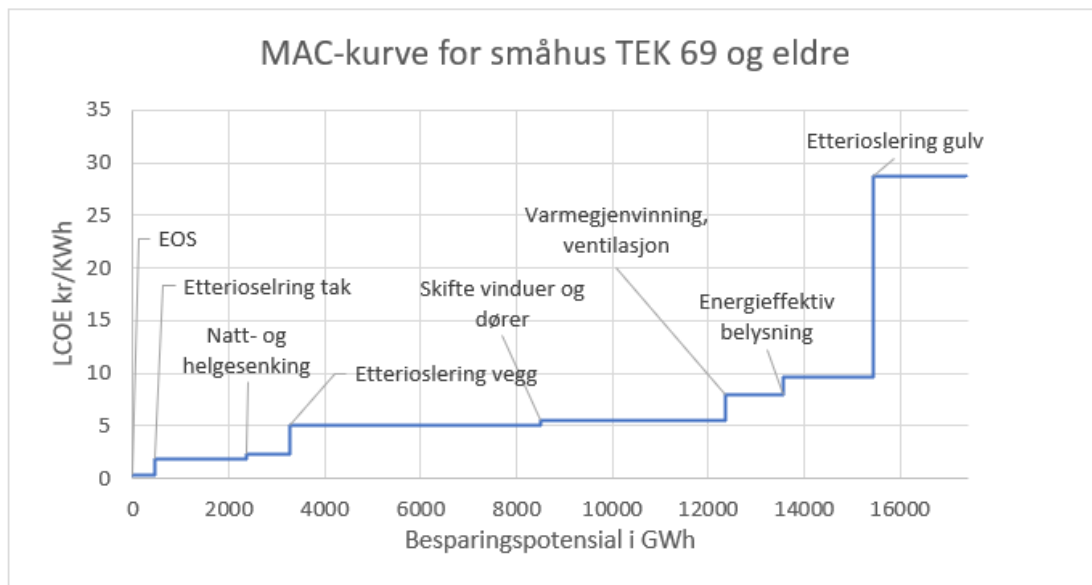
Tabell 11: Oversikt over investeringskostnad i kNOK/GWh for aktuelle tiltak i byggkategoriene for husholdninger. Ut ifra tabellen kan vi se at EOS er det mest kostnadseffektive tiltaket.

Byggkategori og tiltak	Investeringskostnad (kNOK/GWh) for året 2020	
	NO1	
Energieffektivt belysningsutstyr, boligblokk, TEK 69 og eldre		42 857
Energieffektivt belysningsutstyr, boligblokk, TEK 87 og nyere		600 000
Energieffektivt belysningsutstyr, småhus, TEK 69 og eldre		36 861
Energieffektivt belysningsutstyr, småhus, TEK 87 og nyere		300 000
EOS, boligblokk, TEK 69 og eldre		2 249
EOS, boligblokk, TEK 87 og nyere		3 401
EOS, småhus, TEK 69 og eldre		958
EOS, småhus, TEK 87 og nyere		1 577
Etterisolering gulv, boligblokk, TEK 69 og eldre		54 282
Etterisolering gulv, boligblokk, TEK 87 og nyere		57 222
Etterisolering gulv, småhus, TEK 69 og eldre		84 107
Etterisolering gulv, småhus, TEK 87 og nyere		247 895
Etterisolering tak, boligblokk, TEK 69 og eldre		12 813
Etterisolering tak, boligblokk, TEK 87 og nyere		73 563
Etterisolering tak, småhus, TEK 69 og eldre		5 721
Etterisolering tak, småhus, TEK 87 og nyere		43 069
Etterisolering vegg, boligblokk, TEK 69 og eldre		15 790
Etterisolering vegg, boligblokk, TEK 87 og nyere		55 944
Etterisolering vegg, småhus, TEK 69 og eldre		18 267
Etterisolering vegg, småhus, TEK 87 og nyere		59 052
Natt og helgesenking, boligblokk, TEK 69 og eldre		16 552
Natt og helgesenking, boligblokk, TEK 87 og nyere		12 602
Natt og helgesenking, småhus, TEK 69 og eldre		9 312
Natt og helgesenking, småhus, TEK 87 og nyere		7 349
Skifte vinduer og dører, boligblokk, TEK 69 og eldre		49 548
Skifte vinduer og dører, boligblokk, TEK 87 og nyere		64 656
Skifte vinduer og dører, småhus, TEK 69 og eldre		35 692
Skifte vinduer og dører, småhus, TEK 87 og nyere		48 215
Varmegjenvinning, boligblokk, TEK 69 og eldre		21 142
Varmegjenvinning, boligblokk, TEK 87 og nyere		19 017
Varmegjenvinning, småhus, TEK 69 og eldre		44 444
Varmegjenvinning, småhus, TEK 87 og nyere		36 915

Tiltaket EOS har for boligblokker en tilknyttet driftskostnad. For husholdninger er dette det eneste tiltaket som har driftskostnad. For boligblokk TEK 69 og eldre er kostnaden på 73 kNOK/GWh og for Boligblokk TEK 87 og nyere er kostnaden på 265 kNOK/GWh.

For småhus TEK 69 og eldre har det blitt regnet ut LCOE for å gi en oversikt over hvilke tiltak som er mest lønnsomme. En MAC-kurve (Marginal reduksjonskostnadskurve) er satt opp for å vise ved hvilken kraftpris de forskjellige tiltakene er aktuelle. Denne beregningen viser at for småhus TEK 69 og eldre er det EOS, etterfulgt av etterisolering tak og natt- og helgesenking som er de mest lønnsomme tiltakene. Etterisolering gulv har en betydelig høyere LCOE enn de andre tiltakene for denne byggkategorien, se Figur 11: MAC-kurve for småhus TEK 69 og eldre. Kurven viser LCOE for tiltakene og hvor stor besparelse hvert tiltak kan gi.

Den mest kostnadseffektive løsningen er å først benytte tiltaket lengst til venstre og deretter bevege seg mot høyre. Figur 11.



Figur 11: MAC-kurve for småhus TEK 69 og eldre. Kurven viser LCOE for tiltakene og hvor stor besparelse hvert tiltak kan gi. Den mest kostnadseffektive løsningen er å først benytte tiltaket lengst til venstre og deretter bevege seg mot høyre.

5.3 TIMES

5.3.1 Investeringer

Energieffektiviseringstiltakene for boligblokker og småhus som TIMES investerer i for NO1 er etterisolering av tak og EOS. EOS investeres i for alle byggkategorier innen husholdninger, og for småhus TEK 69 og eldre investeres det også i etterisolering av tak/loft. Dette er de fem tiltakene med lavest investeringskostnad, se Tabell 11.

Det investeres ikke i EOS for boligblokker TEK 87 og nyere i den første investeringsperioden (2025), dette skjer først i investeringsperiode 2 (2030), se Tabell 12. Det investeres ikke i EOS for boligblokk TEK 87 og nyere etter endt teknisk levetid, slik som det gjøres for EOS i de andre bygningskategoriene.

Tabell 12: Hvilke tiltak TIMES har investert i for ulike byggkategorier NO1 innen husholdninger og hvor stor denne investeringen har vært i forskjellige perioder. Investeringene som vises, er oppgitt i kNOK.

Tiltak og byggkategori	2025	2030	2035	2040
Etterisolering tak/loft, småhus, TEK 69 og eldre	3 418 422,74	1 102 506,30	401 657,05	
EOS, Boligblokk, TEK 69 og eldre	183 764,55		138 768,39	
EOS, Boligblokk, TEK 87 og nyere		80 154,12		
EOS, Småhus, TEK 69 og eldre	556 163,87		429 680,45	
EOS, Småhus, TEK 87 og nyere	152 674,99		131 141,83	

I alle tilfeller hvor det investeres i EOS, investeres det helt til grensen for besparelse er nådd. Investeringssummen for tiltakene vil reduseres for de senere periodene. Grunnen er en prisreduksjon på 1 % i året som et resultat av læringseffekter og at det blir mindre BRA for de forskjellige byggkategoriene i husholdninger.

5.3.2 Besparelse

Mindre tilgjengelig BRA er grunnen til at besparelsen til EOS tiltakene går ned i hver periode. Det er en økning i besparelse i 2030 da tiltaket EOS for boligblokk TEK 87 og eldre gjennomføres. Besparelsen for etterisolering tak småhus TEK 69 og eldre øker frem til 2035. Dette fordi tiltaket tas i bruk på et større BRA hvert år, se Tabell 13.

Tabell 13: Årlig besparelse i GWh for effektiviseringstiltak og tilhørende boligkategori, fordelt på type etterspørsel som reduseres. Tabellen viser også hvordan reduksjonen endrer seg over flere år. Denne endringen skyldes nedgang i BRA for byggkategoriene.

Tiltak og byggkategori	Type etterspørsel redusert	2025	2030	2035	2040
Etterisolering tak/loft, småhus, TEK 69 og eldre	Varme	272,17	369,78	407,01	407,01
EOS, Boligblokk, TEK 69 og eldre		37,10	35,10	32,62	30,13
EOS, Boligblokk, TEK 87 og nyere			11,90	11,90	
EOS, Småhus, TEK 69 og eldre		290,49	277,75	261,27	244,80
EOS, Småhus, TEK 87 og nyere		48,46	48,46	48,46	48,46
EOS, Boligblokk, TEK 69 og eldre	Elspesifikk	16,39	15,51	14,41	13,31
EOS, Boligblokk, TEK 87 og nyere			5,26	5,26	
EOS, Småhus, TEK 69 og eldre		97,01	92,76	87,25	81,75
EOS, Småhus, TEK 87 og nyere		16,18	16,18	16,18	16,18
EOS, Boligblokk, TEK 69 og eldre	Varmtvann	8,06	7,63	7,09	6,55
EOS, Boligblokk, TEK 87 og nyere			2,58	2,58	
EOS, Småhus, TEK 69 og eldre		49,69	47,51	44,70	41,88
EOS, Småhus, TEK 87 og nyere		8,29	8,29	8,29	8,29

Av den totale energibesparelsen som oppnås i husholdninger skjer 85 % i byggkategorien småhus TEK 69 og eldre. Det er kun en liten del av potensialet i denne byggkategorien som utnyttes. Dette viser at det tekniske potensialet er mye større enn det lønnsomme potensialet. Ser vi på tallene for småhus TEK 69 og eldre, i Tabell 13, kan vi se at besparelsen er mindre i år 2040 enn 2035, men om vi ser det i sammenheng med totalt besparingspotensial kan vi se at den utbygde kapasiteten for denne byggkategorien øker, se Tabell 14.

Tabell 14: Oversikt over besparings- og utbygdpotensial for alle tiltak i byggkategorien småhus TEK 69 og eldre. Ut ifra tabellen kan vi se at utbygd potensiale i GWh reduseres fra 2035 til 2040, men at prosenten av potensialet som er utbygd øker.

Småhus, TEK 69 og eldre	2025	2030	2035	2040
Besparingspotensial	16 781,7	16 128,2	15 282,8	14 437,5
Utbygdpotensial	709,4	787,8	800,2	775,4
Prosent av potensial utbygd	4,23 %	4,88 %	5,24 %	5,37 %

5.3.3 Dekket etterspørsel

Det er i TIMES teknologier som allerede er antatt installert eller som modellen tvinges til å installere (STOCK). Dette gjør at behovet som effektiviseringstiltakene kan redusere minsker ytterligere. TIMES har i tillegg andre tiltak som kan velges for de forskjellige etterspørselskategoriene. Andre tiltak blir i større grad enn effektiviseringstiltak bygget ut for å dekke etterspørselen, se Tabell 15.

Tabell 15: Tabellen viser hvor stor andel av energietterspørsel som dekkes av effektivisering, andre nye tiltak og allerede installerte tiltak for forskjellige etterspørselstyper.

Etterspørselstype	År	2025	2030	2035	2040
Varme	Allerede installert (STOCK)	8 531,67	5 617,03	3 181,62	1 309,11
	Effektiviseringstiltak	648,22	742,99	761,26	730,40
	Andre tiltak	3 308,80	5 596,15	7 448,80	8 634,62
	Totalt varmebehov	12 488,69	11 956,18	11 391,69	10 674,13
Varmtvann	Stock (allerede inninstallert)	3 462	2 648	1 819	1 274
	Effektiviseringstiltak	66	66	63	57
	Andre tiltak	68	789	1 516	1 915
	Totalt varmtvannbehov	3 597	3 503	3 398	3 246
El. Spesifikk	Elektrisitet som ikke kan erstattes	2 442	2 032	1 895	1 748
	Effektiviseringstiltak	130	130	123	111
	Andre tiltak	-	-	-	-
	Totalt el. Spesifikt behov	2 571	2 162	2 018	1 859

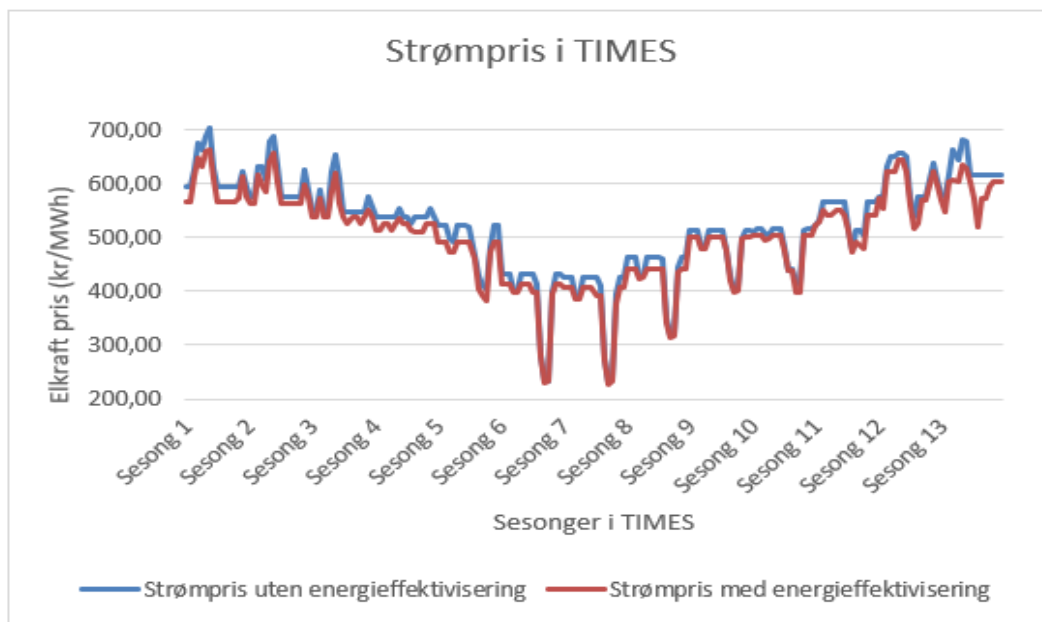
Kun en liten andel av varmeetterspørselen dekkes av effektiviseringstiltak, og etter hvert som den allerede installerte kapasiteten reduseres øker andelen andre tiltak, se Tabell 15. Tiltakene som her benyttes for å dekke varmebehovet er elektrisk oppvarming, oppvarming ved bruk av biomasse og luft til luft varmepumper. Disse tiltakene har en lavere samlet investerings- og driftskostnad enn tiltaket etterisolering av tak, og den andelen av som bygges ut av dette tiltaket er det resterende behovet som ikke STOCK, EOS og andre tiltak klarer å dekke.

For varmtvann kommer all besparelsen fra energieffektivisering fra EOS, og det eneste andre tiltaket som bygges ut i denne etterspørselskategorien er elektrisk oppvarming av vann. EOS er det eneste effektiviseringstiltaket for husholdninger som påvirker varmtvannetterspørsel, så for denne etterspørselskategorien er alt tekniskpotensial benyttet i periodene 2030 og 2035. I 2020 og 2040 har vi ikke EOS for boligblokker TEK 87 og nyere, og i disse årene ligger derfor effektiviseringen noe under det tekniske potensialet.

EOS dekker en del av elforbruket, og resten dekkes av elektrisitet fra strømmettet. TIMES har ingen andre tiltak som direkte påvirker etterspørsel for elektrisitet, og energieffektiv belysning er for kostbart til at det benyttes.

5.3.4 Strømpris

Økt bruk av energieffektivisering påvirker strømprisen. Den største prisforskjellen er på 97,71 kr/MWh og den minste er på 0,36 kr/MWh. Gjennom året er prisforskjellen minst i sesong 9 og størst i sesong 13, se Figur 12. Merk at strømprisen påvirkes også av effektiviseringstiltak benyttet i kommersielle bygg.



Figur 12: Strømpriser som finnes av TIMES i året 2030 med og uten energieffektivisering. Merk at y-aksen starter på 200 kr/MWh. Vi kan se at energieffektivisering medfører en reduksjon i pris.

5.4 Wu et al. Modell A

Wu et al. (2016) Modell A gir investering i EOS og etterisolering tak for byggkategorien småhus TEK 69 og eldre. Det vil investeres i EOS helt til maks potensiale for denne teknologi er nådd, og vil deretter investeres i energieffektivisering av tak. I Tabell 16 vises det hvor stort BRA som er bygget ut med de aktuelle tiltakene. For EOS er det alt tilgjengelig BRA, mens for etterisolering tak er det rett under halvparten.

Tabell 16: Tabellen viser verdier som er avgjørende for beregningen av ES og Tp. Målcellen viser den minimerte summen av de benyttede tiltakene. M2 viser hvor stort BRA som har blitt benyttet for hvert tiltak. Her kan vi se at det kun er tiltakene EOS og etterisolering av tak som benyttes.

Tall	Verdier
Prosentvis økning i strømpris	0,02
Strømpris	0,55
Evaluerings tid	20

Vekt	
Vekt ES	Vekt Tp
0,5	0,5

Tiltak	m2	ES	Inesteringskostnad	Livstid	Minimering
Etterisolering vegg	-	75,0	1370,0	60,0	0,0
Etterisolering tak/loft	35 404 961	27,1	155,1	60,0	-331128437,1
Etterisolering gulv	-	28,0	2355,0	60,0	0,0
Skifte vinduer og dører	-	55,3	1972,0	30,0	0,0
Natt og helgesenking	-	17,4	657,1	15,0	0,0
Varmegjenvinning, ventilasjon	-	13,1	122,0	20,0	0,0
Energioppfølgingssystem (EOS)	67 022 601	6,5	6,3	10,0	-114052887,0
Energieffektivt belysningsutstyr	-	13,5	600,0	15,0	0,0

Målcelle
-445181324,112

Det som hindrer modellen i å investere i flere tiltak er kostnadsgrensen, som tilsvarer det totale investeringsbeløpet brukt for denne byggkategorien i TIMES, se Tabell 17. Den besparelsen som oppnås ved bruk av Modell A er 1 396 GWh. 959,5 GWh kommer som et resultat av investering i etterisolering tak og 437 GWh fra EOS.

Tabell 17: Tabellen viser hvor stor energibesparelse som er oppnådd ved bruk av Modell A, hvor stor andel av besparelspotensial som er benyttet og den totale investeringen som har blitt gjort.

Besparelses mål	1 396 662 860 >=	768 207 083
-----------------	------------------	-------------

Tiltak	Besparelse (KWh)		Maks besparelse (KWh)
Etterisolering vegg	-	<=	5 026 695 044
Etterisolering tak/loft	959 474 436	<=	1 816 312 476
Etterisolering gulv	-	<=	1 876 632 816
Skifte vinduer og dører	-	<=	3 702 998 682
Natt og helgesenking	-	<=	1 166 193 250
Varmegjenvinning, ventilasjon	-	<=	877 996 068
Energioppfølgingssystem (EOS)	437 188 424	<=	437 188 424
Energieffektivt belysningsutstyr	-	<=	938 817 818

Kostnadsgrense	5 908 430 418 <=	5 908 430 418
----------------	------------------	---------------

For å undersøke hvilke tiltak som er lønnsomme ved bruk av Modell A kan man fjerne kostnadsgrensen og optimalisere besparelsen. Modell A viser da at de lønnsomme tiltakene, rangert fra minst til mest lønnsomt, er skifte vinduer og dører, etterisolering av vegg, etterisolering av tak og EOS. Ingen av de andre tiltakene vil benyttes siden utbygging av disse

vil føre til en positiv verdi i minimeringscellen og dermed ikke bidra til at målcellen reduseres.

6 Diskusjon

I diskusjonsdelen av oppgaven gjennomgås og diskuteres resultatene, antakelser lagt til grunn for beregning og datagrunnlaget. Målet er å best mulig besvare problemstillingen til oppgaven; modellering av energieffektivisering i TIMES – innsikt og usikkerhet?

6.1 Diskusjon av resultater

6.1.1 Energibesparelse

Det kommer frem av resultatene at den potensielle besparelsen er størst for TEK 69 og eldre. Dette skyldes et stort stående areal i denne byggkategorien og en stor besparelse per m². Spesielt er det stående arealet stort i NO1, og beregnet potensiell besparelse for alle tiltak i denne regionen er derfor veldig store for denne byggkategorien.

Beregningen av potensiell besparelse gir en mulig energibesparelse omtrent dobbelt så stor som det faktiske varmebehovet. Dette skjer som et resultat av at tiltakene ikke er innbyrdes uavhengige. Hverken metoden benyttet til beregning av besparelse, TIMES eller Modell A tar hensyn til redusert effekt av et tiltak om et annet er benyttet. Dette fører til en overvurdering av energieffektiviseringspotensiale og bidrar til at modellene bygger ut mer energieffektivisering.

6.1.2 Investeringskostnad

Middels kostnad er brukt for å regne ut kostnaden av de forskjellige tiltakene, se kapittel 4.2. Denne er benyttet istedenfor et gjennomsnitt da de TEK som har middels kostnad er de som har størst BRA. Dermed representerer gjennomsnittskostnaden for gjennomføringen av tiltaket den faktiske kostnaden på en dårligere måte enn middels kostnad.

Småhus og boligblokker er delt opp i kategoriene TEK 69 og eldre og TEK 87 og nyere, og bruk av middels kostnad medfører en noe lavere investeringskostnad for byggkategorien TEK 69 og eldre, og en høyere investeringskostnad for TEK 87 og nyere. Oppgradering av nyere bygg gir lavere besparelse enn oppgradering av eldre bygg, og siden investeringskostnaden i

TIMES er oppgitt i kNOK/GWh medfører dette at TEK 87 og eldre får en høyere investeringskostnad. Mer energieffektivisering kunne ha blitt benyttet i TEK 87 og eldre ved bruk av en kostnad som er mer riktig for disse gruppene.

Tiltakene etterisolering vegg og etterisolering tak benytter middels merkostnad istedenfor middels totalcost. Dette fordi disse tiltakene antas å gjennomføres som et tilleggstilskudd ved oppussing og andre endringer på bygg. Denne antakelsen gir etterisolering tak og etterisolering vegg mye gunstigere investeringskostnad. Benyttes totalcosten istedenfor merkostnaden blir etterisolering vegg halvparten så lønnsomt, mens etterisolering tak blir 13 ganger mindre lønnsomt. Endres denne antakelsen vil det føre til redusert utbygging av etterisolering tak og etterisolering vegg.

6.1.3 TIMES og Modell A

6.1.3.1 Sammenlikningsgrunnlag

TIMES er en mer avansert modell enn Wu et al. Modell A. TIMES tar hensyn til hele energisystemet, mens Modell A kun ser på lønnsomheten av effektiviseringstiltak. De har allikevel en ganske lik måte å vurdere effektiviseringstiltak på. I TIMES benyttes kNOK/GWh og i Modell A benyttes $\lambda_1 T_p - \lambda_2 E_S$. Ser vi kun på disse to elementene finner vi at i begge tilfeller er tiltakene like avhengig av besparelse som av pris, så lenge Modell A vektet 0,5 for begge λ .

Ved å benytte investert kostnad for energieffektivisering i en byggkategori, strømpris og prisøkning fra TIMES i Modell A, gir det et godt grunnlag for å si noe om hva som er en realistisk besparelse for den investerte summen. Modell A har blitt begrenset til kun en byggkategori da den ikke er egnet til å se på flere byggkategorier samtidig.

All data for kostnad og besparelse i Modell A hentet fra Multiconsult er oppgitt i $x/m^2/\text{år}$. Det er derfor benyttet m^2 som beslutningsvariabel istedenfor hele bygninger. Antatt bruksareal for småhus i denne oppgaven er $160 m^2$ og alternativet ville vært å gange opp alle tall med $160 m^2$ for å få verdi per småhus. Denne ekstra beregningen anses som overflødig da man ved å benytte kun m^2 vil få like god innsikt i hvilke tiltak som er foretrukket av modellen, uten at det påvirker sammenlikningsgrunnlaget.

6.1.3.2 Besparelse

Den totale kostnadseffektive besparelsen som ble funnet av NVE ved bruk av SIMIEN var ca. 3 TWh i småhus og opp mot 1 TWh i boligblokker. Besparelsen ved innføring av energieffektivisering i TIMES er for småhus 1,8 TWh og for boligblokker 0,15 TWh, dette er samlet for alle regioner. Besparelsen som oppnås i TIMES er mindre enn den som oppnås i SIMIEN. Forskjellen er bl.a. et resultat av lavere diskonteringsrente, men selv om en lavere diskonteringsrente benyttes for TIMES blir ikke besparelsen like stor som i SIMIEN.

NVE har satt et krav om at lønnsomme tiltak må ha en LCOE på under 1 kr/KWh. Dette gjør at svært få tiltak kan gjennomføres for husholdninger. Skulle dette kravet vært benyttet for tiltakene benyttet i TIMES ville kun EOS vært aktuelt for småhus og ingen tiltak ville vært aktuelle for boligblokker. Dette viser at det er en forskjell i beregningen av besparelse og kostnad som brukes i de to modellene. Ved å bruke verdiene som er lagt inn i SIMIEN ville vi sett en større utbygging av effektivisering i TIMES.

Besparelsen oppnådd ved bruk av Modell A er større enn for TIMES. I TIMES blir det en samlet årlig besparelse for byggkategorien småhus TEK 69 og eldre på 768 GWh i NO1, mens ved bruk av Modell A blir det en besparelse på 1 396 GWh. En av grunnene er at Modell A gjør alle investeringer i år 1, og det er derfor ikke mulig å investere i det samme tiltaket flere ganger. Dette gjør at alt TIMES investerer i EOS i 2035 går til å investere i etterisolering tak i Modell A. Dessuten har ikke Modell A en diskonteringsrate for energieffektiviseringstiltakene, noe som gjør at tiltakene er billigere for Modell A enn for TIMES. Denne forskjellen viser at sammensetningen av utbygde effektiviseringstiltak vil endres, dersom året det er mulig å investere i endres.. I tillegg vil redusert diskonteringsrente medføre en større utbygging av effektiviseringstiltak.

TIMES inkluderer flere etterspørselstyper, dette gjør ikke Modell A. EOS påvirker tre forskjellige typer etterspørsel, og ville blitt valgt også om den utelukkende påvirket varmebehov og varmtvannsbehov. Dette vises ved å se på de andre teknologiene som brukes til å dekke disse behovene, som har høyere samlede investering- og driftskostnader enn EOS. Hadde EOS kun påvirket elektrisitet ville teknologien ikke blitt benyttet da det finnes andre billigere alternativer som kan produsere elektrisitet til en lavere pris. Av effektiviseringstiltakene for husholdninger påvirker 6 av 8 kun varme, og EOS som påvirker

flere etterspørselstyper velges også i Modell A. Varierte etterspørselstyper virker derfor å ikke påvirke valget av effektiviseringstiltak i særlig grad.

6.1.3.3 *Investering*

TIMES og Modell A velger begge å investere i EOS systemer og etterisolering loft for småhus TEK 69 og eldre. Begge modeller minimerer kostnader, og velger derfor de mest kostnadseffektive tiltakene for denne byggkategorien. Dette underbygger også Mundaca et al. (2010) sin påstand om at kapital- og driftskostnader er de viktigste faktorene ved modellering av energieffektivisering. EOS og etterisolering av tak er også to av de tre tiltakene som ble valgt i NVEs simuleringer av energieffektiviseringstiltak i SIMIEN. Alle modeller velger EOS og etterisolering tak. Dette gir god innsikt i hvilke effektiviseringstiltak som er de mest aktuelle å bygge ut, men variasjonene i investeringene skaper usikkerhet knyttet til størrelsen på investeringen.

6.1.3.4 *Strømpris*

Etterspørselen i TIMES er lagt in eksogent og endrer seg derfor ikke som et resultat av de reduserte strømprisene. I stedet øker eksport av kraft til utlandet når det benyttes mindre kraft i Norge. Eksogen etterspørsel gjør også at det ikke blir noen tilbakeslagseffekt. Lavere energipriser gjør at det bygges ut mindre effektivisering siden de reduserte prisene gjør det mindre lønnsomt. Med endogen etterspørsel og tilbakeslagseffekt kunne effektivisering ha ført til en økning i etterspørsel av energi og dermed en prisøkning.

6.2 *Barrierer og virkning av antakelser*

6.2.1 *Fullkommen konkurranse og rasjonell oppførsel*

TIMES har begrensninger som påvirker resultatet. Modellen baserer seg bl.a. på fullkommen konkurranse og rasjonell oppførsel. TIMES tar ikke hensyn til negative eksterne effekter som ikke er kostnadsfestet og har en uelastisk etterspørsel.

EOS er tiltaket som blir mest påvirket av antakelsen om rasjonell oppførsel. Besparelsen i EOS er basert på at huseier gjør en innsats for å redusere sitt forbruk dersom huseier blir oppmerksom på mulighetene. Spesielt er dette tilfellet for husholdninger hvor manuelle EOS

tiltak er de mest aktuelle. En ikke-rasjonell oppførsel vil da føre til mindre besparelse og tiltaket ville fått en høyere investeringskostnad. Dette ville ført til mindre utbygging av EOS.

Fullkommen konkurranse er ikke mulig å få til i virkelighetens kraftmarked. Lover tilknyttet produksjon, reguleringer knyttet til etablering av ny kraft og manglende mulighet til å velge hvem som produserer kraften som sluttbruker benytter, gjør at fullkommen konkurranse ikke kan opprettholdes. Antakelsen om fullkommen konkurranse i TIMES gjør at barrierer som hindrer utbygging av energieffektivisering i virkeligheten blir oversett. Mangelfull informasjon om energieffektivisering og effektene av det, samt ikke-prissatte kostnader knyttet til gjennomføring av tiltak medfører ingen ekstra kostnad, og blir derfor ikke inkludert. Antakelsen om fullkommen konkurranse gjør at modellen bygger ut mer energieffektivisering enn det som er realistisk.

6.2.2 Økonomiske barrierer

Kapitaltilgang er en av de vanligste utfordringene ved energieffektivisering, da investeringskostnaden ved mange av tiltakene er høye. I Modell A ser vi tydelig at kapitalkostnaden er den begrensende faktoren for hvor mye effektivisering som bygges ut. Dette problemet tar ikke TIMES hensyn til da modellen i prinsippet har uendelig med ressurser å investere. Grensen som hindrer en videre investering i TIMES er knyttet opp mot etterspørselen og at hele behovet er dekket. Dette gjør at den modellerte utbygging av effektiviseringstiltak blir høyere enn den reelle, spesielt for husholdninger hvor kostnaden ofte bæres av huseier.

6.2.3 Tekniske barrierer

Tekniske barrierer som kompetanseutveksling og vanskeligheter med innføring av nye tiltak tas ikke hensyn til av TIMES, men det kan legges inn i data modellen bruker. Jeg har i denne oppgaven lagt in en prisreduksjon for tiltakene som et resultat av læringseffekter. Denne læringseffekten er tenkt å komme fra bruk og utvikling av teknologier, og kompetanseutveksling på tvers av bygg og teknologier. Den innlagte læringseffekten gjenspeiler ikke nødvendigvis den reelle læringseffekten, og større læringseffekt vil føre til mer lønnsomhet.

Inkludering av læringseffekter for tiltak som et resultat av at de blir benyttet ville føre til en redusert kostnad og større utbygging av EOS og etterisolering tak. Hvorvidt den innlagte læringseffekten bidrar til å gjøre den modellerte mengden energieffektivisering større eller mindre enn det som er realistisk er avhengig av virkelige læringseffekter.

6.2.4 Bruk av diskonteringsrente som representasjon for barrierer

Et av argumentene for å benytte TIMES til modellering av energieffektivisering er at TIMES kan bruke diskonteringsrente for å representere eksterne effekter og ikke-økonomiske barrierer. Tanken er at diskonteringsrenten ved å påvirke prisen på tiltaket vil utligne forskjellen på det kostnadseffektive potensialet og det virkelige potensialet. En høy diskonteringsrente vil gjøre tiltak mindre lønnsomme, og vil i energieffektivisering sitt tilfelle kunne representere manglende kunnskap hos sluttbruker og indirektekostnader ved gjennomføring av tiltak. I praksis øker kun diskonteringsrenten kostnaden ved å gjennomføre et tiltak, og det er usikkert hvor godt økt kostnad kan representere ikke-økonomiske barrierer.

Diskonteringsrenten klarer ikke å fange opp hele forskjellen fra hva vi ser i faktiske markeder og det som modelleres. Dette skyldes usikkerhet knyttet til indirekte kostnader og eksterne effekter. Bruk av diskonteringsrente vil bidra til å inkludere disse effektene i modellen, men uten å vite hvor store effektene er kan det ikke settes en riktig diskonteringsrente.

Diskonteringsrenten kan derfor gi innsikt i den samlede effekten av alle barrierer, men det vil være tilknyttet en viss usikkerhet da det må gjøres et anslag på størrelsen av diskonteringsrenten. Den høye diskonteringsrenten for energieffektivisering benyttet i TIMES medfører en undervurdering av det kostnadseffektive potensialet.

6.2.4.1 Kraftpris

Uvisshet knyttet til fremtidige kraftpriser medfører usikkerhet til resultatene i modellen. Arbeidet med TIMES-Norway begynte i 2017 og det stilles spørsmål ved flere av prognosene som gjøres i modellen. I 2022 er CO₂- og gassprisen høyere enn det som antas i modellen. Kombinert med lite vann i vannkraftsmagasinene gir dette en kraftpris som er mye høyere enn den som finnes i TIMES. Med kraftprisen som så langt har vært i 2022 ville flere av

energieffektiviseringstiltakene vært lønnsomme og modellen måtte ha benyttet flere teknologier.

Usikkerheten knyttet til fremtidige energipriser bidrar også til usikkerhet rundt Modell A. En kraftpris på 0,55 kr/KWh er benyttet i utregningen, men denne representerer ikke dagens strømpris. Denne strømprisen inkluderer ikke avgifter og er derfor lavere enn kostnaden vil være for en husstand. En høyere kraftpris vil i Modell A gagne de tiltak som gir større besparelse.

6.2.4.2 Evalueringsperiode

En evalueringsperiode på 20 år, med start i 2022 ble benyttet i denne oppgaven. Dette kan ha hatt en innvirkning på hvilke tiltak som blir benyttet av TIMES og Modell A. En lengre evalueringsperiode vil i større grad gagne tiltakene som har store besparelser og lang levetid. Spesielt etterisoleringstiltakene med en teknisk levetid på 60 år og høye besparelser ville bli mer aktuelle med en lengre evalueringsperiode. Tiltakene EOS og natt- og helgesenking med levetid på henholdsvis 10 og 15 år ville blitt mindre aktuelle.

I TIMES vil EOS fortsatt kunne være et aktuelt tiltak siden investeringskostnadene er lave og det kan investeres i EOS flere ganger før den samlede investeringen blir så store at det er mer lønnsomt å investere i andre tiltak. Modell A legger alle investeringer til år 0 så ved bruk av denne modellen vil EOS og de andre tiltakene med kort teknisk levetid bli mindre aktuelle etter hvert som evalueringsperioden øker.

6.2.4.3 Tidsinndeling

TIMES er delt inn i 208 tidsperioder som til sammen skal representere et helt år. Fordelen med å ha tidsperiodene fordelt på denne måten er at det går raskere å kjøre modellen, men konsekvens av inndelingen er at alle tidsperioder kun representerer gjennomsnittsverdier for disse periodene. En lav tidsoppløsning og eksogent innlagt etterspørsel gjør at TIMES ikke tar hensyn til ekstremvær og andre kortsiktige uforutsette hendelser som kan oppstå. Det er usikkert hvorvidt en mer detaljert tidsoppløsning ville ført til mer eller mindre utbygging av effektivisering.

6.3 Forutsetninger i datagrunnlag

Alle tall for energieffektivisering i denne oppgaven baserer seg på Multiconsult (2021a) sitt arbeid med kostnader for energieffektivisering og data som ligger inne i TIMES. For å komme frem til data benyttet i denne oppgaven er det gjort flere forutsetninger og forenklinger som kan påvirke det endelige resultatet.

Multiconsults bruk av TEK standarder for å kategorisere bygg medfører at store bygningsmasser generaliseres og endres til en felles standard. De har undersøkt bruken av TEK som representasjon av stående bygg og har funnet at det er en god metode, men det gjøres også antakelser knyttet til de forskjellige TEK. Det antas at alle TEK har installert nyere ventilasjon og innlagt lokal kjøling. Dette er omfattende tiltak og det virker usannsynlig at alle bygg med TEK 87 og eldre har innført disse tiltakene. Antakelsene om lokal kjøling og nyere ventilasjon medfører at energibesparelspotensialet for kjøling i bygninger blir mindre. Denne påvirkningen er ikke avgjørende for husholdninger ettersom TIMES ikke benytter etterspørselstypen kjøling for denne bygningsgruppen. Energibesparelsen for effektiviseringstiltak som påvirker lufttetthet og ventilasjon vil være redusert som et resultat av at nyere ventilasjon antas installert. Ved å fjerne antakelsene om installert ventilasjon og innlagt lokalkjøling, ville det blitt utbygd mer energieffektivisering som et resultat av at besparelsen fra tiltakene ville vært større.

Grensen som er satt på inkludering av bygg til og med TEK 97 fører til at 24 % av BRA i husholdninger ikke blir inkludert. Dette er begrunnet med at besparelsen for disse byggene vil bli liten. Ser vi på besparingspotensial, se Figur 10, ser vi at besparelsen i de eldre byggkategoriene i alle tilfeller er høyere enn for de nyere. I tillegg er kostnaden per GWh spart i nesten alle tilfeller større for nyere enn eldre bygg. Med bakgrunn i dette kan det antas at få av byggene med TEK 10 og høyere standard har et kostnadseffektivt potensial, det kan fortsatt tenkes at f.eks. et EOS system kunne bidratt til besparelse. Det å ikke inkludere nye bygg medfører en reduksjon i den modellerte utbyggingen av effektivisering, da alle muligheter til å bygge ut effektiviseringstiltak i disse bygg med TEK 10 og nyere tas bort.

I Multiconsult (2021a) sin utregning av besparelse har de kun benyttet årsmiddeltemperatur for de forskjellige områdene. Ved bruk av årsmiddeltemperatur tas det ikke hensyn til

ekstremvær eller perioder av året hvor det er veldig kaldt eller varmt, noe som kan påvirke besparelsen for alle tiltak som er avhengig av utetemperatur. Ved å regne besparelse i forhold til utetemperaturen ville det for isoleringstiltakene gitt et mer riktig bilde av hvordan besparelsen fordeler seg utover året. Ved å la besparelsen følge etterspørselskurven i TIMES blir den bedre fordelt enn det som i realiteten ville vært tilfellet, og dette medfører en økning i utbygging av sesongbaserte tiltak i TIMES.

7 Konklusjon

I denne oppgaven har jeg ved hjelp av modellering i TIMES funnet det kostnadseffektive potensialet for energieffektivisering i husholdninger. For å få innsikt i hvor pålitelig resultatet er og hvilke usikkerheter som kan endre resultatet, sammenlignes resultatene fra TIMES med resultater fra Modell A og SIMIEN med samme datagrunnlag for energieffektivisering.

Ved modellering gjøres det forenklinger og lages prognoser. Dette gjør det vanskelig å ta hensyn til barrierer som hindrer utbygging av energieffektivisering. Manglende mulighet til å ta hensyn til barrierer ved innføring av energieffektiviseringstiltak og antakelse om fullkommen konkurranse er de største usikkerhetskildene ved energieffektivisering i TIMES. Sammenligning av besparelse og investering i de forskjellige modellene viser at det er en usikkerhet knyttet til hva som er lønnsomt potensiale for forskjellige tiltak.

Forskjellige barrierer og antakelser knyttet til modelleringen i denne oppgaven bidrar til at besparelsen som finnes av TIMES blir ulik den reelle besparelsen. Det er dog vanskelig å si hvor stor denne forskjellen er. Med dagens kraftpris og den høye diskonteringsrenten som er benyttet for effektivisering i TIMES kan det konkluderes med at resultatet i TIMES er en undervurdering av kostnadseffektivbesparelse. Dette underbygges også av større besparelse i Modell A og SIMIEN.

Sammenligning av resultatene fra SIMIEN, Modell A og TIMES viser at modellene benytter de samme tiltakene. På grunn av dette kan vi konkludere med at modellering av energieffektivisering i TIMES gir innsikt i hvilke tiltak som er de mest lønnsomme å gjennomføre, og hvilke byggkategorier energieffektiviseringstiltak bør rettes mot for størst mulig utbygging til lavest mulig pris.

TIMES har svært mange teknologier, noe som gjør at man kan finne hvilke tiltak som vil bli tatt i bruk dersom kraftpris og etterspørsel øker. Dette gir verdifull innsikt i hvordan beslutningstakere på best mulig måte kan løse økende etterspørsel og høye kraftpriser.

8 Videre arbeid

Videre arbeid som kan gi ytterligere innsikt i modellering av energieffektivisering i TIMES er bl.a.:

- Utarbeide en oversikt over hvilke energieffektiviseringstiltak som allerede er gjennomført i forskjellige bygg og benytte oppdaterte data i TIMES.
Klimabarometeret sin oversikt over effektivisering vil være et godt utgangspunkt.
- Justere kraftprisgrunnlaget i TIMES for å gjøre det mer likt dagens situasjon.
- Finne faktorer som ved valg av en type energieffektivisering reduserer effekten av de andre tiltakene. Tiltak som påvirker de samme parameterne vil være mindre aktuelle å bygge ut samtidig, så dette er et godt utgangspunkt.
- Endre CO₂-priser for å se på hvordan dette påvirker utbygging av energieffektivisering.
- For å få en bedre innsikt i hvilken TEK som har den største besparelsen kunne besparelsen blitt regnet ut for hver TEK i hver byggkategori og deretter lagt sammen. Denne metoden gir bedre oversikt over hvordan besparelse fordeler seg blant forskjellige TEK.

9 Kildeliste

- Adisorn, T., Tholen, L., Thema, J., Luetkehaus, H., Braungardt, S., Huenecke, K. & Schumacher, K. (2021). Towards a More Realistic Cost–Benefit Analysis—Attempting to Integrate Transaction Costs and Energy Efficiency Services. *Energies*, 14 (1): 152.
- Ang, B. W. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy–GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy*, 34 (5): 574-582. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.011>.
- Barret, J., de Coninck, H., Morejon, C. F. D., Mathur, R. & Nakicenovic, N. (2014). Drivers, Trends and Mitigation. I: IPCC. Tilgjengelig fra: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter5.pdf (lest 31.03.2022).
- DeCarolis, J., Daly, H., Dodds, P., Keppo, I., Li, F., McDowall, W., Pye, S., Strachan, N., Trutnevyte, E., Usher, W., et al. (2017). Formalizing best practice for energy system optimization modelling. *Applied Energy*, 194: 184-198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.001>.
- Diakaki, C., Grigoroudis, E. & Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40 (9): 1747-1754. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.03.002>.
- FN. (2022). *Ren energi til alle*. I: sambandet, F. (red.): FN. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle> (lest 21.04).
- IFE. (2020). *Documentation of IFE-TIMES-Norway v1*. I: IFE (red.). Documentation IFE-TIMES-Norway.
- inkluderingsdepartementet, A.-o. (1991). *Arbeidsmiljøloven*.
- KanORS-EMR. (2020). *Introduction VEDA 2.0*. I: KanORS-EMR (red.): GitHub. Tilgjengelig fra: <https://veda-documentation.readthedocs.io/en/latest/pages/introduction.html> (lest 02.03.22).
- Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92: 897-920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>.
- Lavenergiutvalget. (2009). *Energieffektivisering Hovedrapport*. Globalasset: OED. Tilgjengelig fra:

- https://www.regjeringen.no/globalassets/upload/oed/rapporter/oed_energieffektivisering_lavopp.pdf (lest 02.05.2022).
- Loulou, R. (2016). Documentation for the TIMES modell part 1. I: IEA. Tilgjengelig fra: <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp> (lest 05.01.2022).
- Multiconsult. (2021a). *Kostnader for energieffektivisering i bygg*. NVE. NVE.no: NVE.
- Multiconsult. (2021b). *Notat 5_ kostnader for energieffektivisering*. I: Multiconsult (red.).
- Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E. & McNeil, M. (2010). Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models. *Annual Review of Environment and Resources*, 35 (1): 305-344. doi: 10.1146/annurev-environ-052810-164840.
- Neij, L., Mundaca, L. & Moukhametshina, E. (2009). *Choice-decision determinants for the (non) adoption of energy efficiency technologies in households*.
- NVE. (2019). *Strømforbruk mot 2040*. I: NVE (red.). Hjemmeside NVE: NVE.
- NVE. (2020). *Energieffektiviseringspotensiale i bygg med bakgrunn* I: NVE (red.). nve.no.
- NVE. (2021a). *Energieffektivisering*. nve.no: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energi/energisystem/energibruk-effektivisering-og-teknologier/energieffektivisering/> (lest 07.04).
- NVE. (2021b). *Energieffektivisering i norske bygninger kan redusere energibruken tilsvarende 10 prosent av Norges strømforbruk*. I: NVE (red.). Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/energieffektivisering-i-norske-bygninger-kan-reducere-energibruken-tilsvarende-10-prosent-av-norges-stromforbruk/>.
- OED. (2017). *energibruken i ulike sektorer. Energifakta Norge*.
- OED, O.-o. e. (2022). *Alt du trenger å vite om norsk energisektor*. I: OED (red.). Energifaktaorge. Tilgjengelig fra: <https://energifaktanorge.no/> (lest 01.04).
- Roos, A. (2022). *Modellering av energieffektivisering som gjort av NVE* (01.04.2022).
- Rosenberg, E. & Espegren, K. A. (2014). *CenSES- energifremskrivninger mot 2050*. Tilgjengelig fra: https://www.ntnu.no/documents/7414984/202064323/CenSES-Energiframskrivning+Rapport_final.pdf/c25df82b-c5ec-48d1-a567-fa35d0890bc6 (lest 02.02).

- Stadelmann, M. (2017). Mind the gap? Critically reviewing the energy efficiency gap with empirical evidence. *Energy Research & Social Science*, 27: 117-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.03.006>.
- UIO. (2019). *Modeller*. I: UIO (red.).
<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/m/modeller.htm>
Tilgjengelig fra:
<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/m/modeller.htm>
(lest 06.04.2022).
- Vogel, J. A., Lundqvist, P. & Arias, J. (2015). Categorizing Barriers to Energy Efficiency in Buildings. *Energy Procedia*, 75: 2839-2845. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.568>.
- Wang, B., Xia, X. & Zhang, J. (2014). A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*, 77: 227-235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.025>.
- Wu, Z., Wang, B. & Xia, X. (2016). *Large-scale building energy efficiency retrofit: Concept, model and control*. Energy Policy. Tilgjengelig fra: <http://dx.doi.org/10.1016/energy.2016.04.124>.

Vedlegg

Vedlegg 1: Oversikt over hva som gjøres for de forskjellige tiltakene ved energieffektivisering i kommersielle bygg.

Energieffektiviseringstiltak	Kommentar
Etterisolering vegg	Pussisolasjon (utenpå eksisterende fasade) og nye sålebenkbeslag (utvendig vinduskarm). Forutsetter forlengelse av tak. (kun på gavlvegg for TEK 87)
Etterisolering tak/loft	Eldre – Kald loft: Fjerning av gammel isolasjon og etterisolering TEK69 – Kompakttak: Riving papptekking, etterisolering, ny tekking TEK 87 – Etterisolering. (Ikke mer beskrivende i rapport)
Etterisolering gulv	Eldre – Kald kjeller, etasjeskiller med stubbeloftsleire TEK69 og 87 – Gulv på grunn.
Skifte vinduer og dører	Energibesparelse avhenger av byggeperiode. Gir også noe forbedring i lufttetthet.
Varmegjenvinning, ventilasjon	Ombygging med ny varmegjenvinner og evt. skifte ut eksisterende aggregat.
Natt- og helgesenking	Lav kostnad – sentral styring. Forutsetter manuelle radiatorventiler. Middels/ høy kostnad – Aktuator og romføler for radiator. Få/ mange soner.
Forbedring effektivitet vifter (SPF)	Reimdrevene vifter byttes med direktdrevne vifter for forbedring av SPF.

Behovsstyring ventilasjon	Oppgraderer ventilasjonsanlegg. Redusert luftmengde og bedre varmegjenvinning.
Styringssystem belysning	Automatisk lysstyring: Bevegelsessensorer og dimming i forhold til dagslys
Energieffektivt belysningsutstyr	Bytte til LED lys. Priser lav/middels/ høy basert på kompleksitet, og markedspris.
Automatisk solskjerming	Aktuelt for TEK69 og eldre. Kan gi høyere oppvarmingsbehov på vinteren. Kun positiv energibesparelse for kontorbygg og universiteter.
Energioppfølgingssystem (EOS)	Etablering av Energioppfølgingssystem. Pris avhenger av automatikk og kompleksitet.
SD- Anlegg	Installasjon av SD-anlegg. Pris avhenger av kompleksitet og antall anlegg.

Vedlegg 2: Oversikt over hva som gjøres for de forskjellige tiltakene ved energieffektivisering i boligblokk.

Energieffektiviseringstiltak i boligblokk	Kommentar
Etterisolering vegg	Pussisolasjon (utenpå eksisterende fasade) og nye sålebensbeslag (utvendig vinduskarm). Forutsetter forlengelse av tak. (kun på gavlvegg for TEK 87)
Etterisolering tak/loft	Eldre – Kald loft: Fjerning av gammel isolasjon og etterisolering TEK69 – Kompakttak: Riving papptekking, etterisolering, ny tekking TEK 87 – Etterisolering. (Ikke mer beskrivende i rapport)

Etterisolering gulv	Eldre – Kald kjeller, etasjeskiller med stubbeloftsleire TEK69 – Gulv på grunn. TEK 87 – Etasjeskiller av betong mot uoppvarmet kjeller
Skifte vinduer og dører	Energibesparelse avhenger av byggeperiode. Gir også noe forbedring i lufttetthet.
Varmegjenvinning, ventilasjon	Etablering av balansert ventilasjon med varmegjenvinning. Kanalanlegg etableres i gamle skorsteinspiper og søppelsjakter. Medfører også servicekostnader.
Natt- og helgesenking	Lav kostnad - lokal nattsenkingsautomatikk på el.ovner Middels - Automatikk med sentral styring Høy – Komplette utskiftning av til nye ovner med automatikk
Energieffektivt belysningsutstyr	Bytte til LED lys. Priser lav/middels/ høy basert på kompleksitet, kvalitet og markedspris.
Energioppfølgingssystem (EOS)	Lav kostnad – Manuell kostnadsfri EOS Middels kostnad – timesdata fra netteier til ekstern EOS Høy kostnad – flere undermålere, logging, individuell varmemåling pr boenhet.

Vedlegg 3: Oversikt over hva som gjøres for de forskjellige tiltakene ved energieffektivisering i småhus.

Energieffektiviseringstiltak i småhus	Kommentar
---------------------------------------	-----------

Etterisolering vegg	Utflytting av vinduer, ny kledning og overflatebehandling. Forutsetter forlengelse av tak. (kun på gavlvegg for TEK 87)
Etterisolering tak/loft	Forutsetter enkel etterisolering av kaldtloft med 100 – 300 mm isolasjonsmateriale
Etterisolering gulv	Til og med TEK49 – Kald kjeller, etasjeskiller med stubbeloftsleire TEK69 – Gulv på grunn. TEK 87 – Fundament gulv: armert betong, markplate og ringmur
Skifte vinduer og dører	Energibesparelse avhenger av byggeperiode. Gir også noe forbedring i lufttetthet.
Varmegjenvinning, ventilasjon	Etablering av balansert ventilasjon med varmegjenvinning. Forutsetter småhus på én flate med etablering av aggregat på kaldloft.
Natt- og helgesenking	Lav kostnad - lokal nattsenkingsautomatikk på el.ovner Middels - Automatikk med sentral styring Høy – Komplette utskiftning av til nye ovner med automatikk
Energieffektivt belysningsutstyr	Bytte til LED lys. Priser lav/middels/ høy basert på kompleksitet, kvalitet og markedspris.
Energioppfølgingssystem (EOS)	Manuell kostnadsfri EOS. For eksempel ved å benytte timesdata fra nettleverandør.

Vedlegg 4: Multiconsults SIMIEN simuleringer for energiltak versjon «Eldre-Oslo» energibesparelse.

Energiposter	Småhus 160		Bolighus 900		Barnehage 300		Kontorbym 3600		Skolebygning 2400		Universitets- 3600		Sykehus 3600	
	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt	nergibudsett	Spesifikt
Forbruk før enøk	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]
Romoppvarming	43 860	274,1	182 592	202,3	75 099	250,3	369 106	102,5	324 968	135,4	355 282	98,7	301 137	83,6
Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0	0,0	0	0,0	17 278	57,8	183 339	50,9	156 496	65,2	238 577	66,3	604 811	168,1
Oppvarming av tappevann	4 768	29,8	26 820	29,8	3 000	10,0	18 000	5,0	24 000	10,0	18 000	5,0	108 000	30,0
Vifter (ventilasjon)	0	0,0	0	0,0	15 008	50,0	176 140	48,9	131 877	54,9	229 050	63,6	546 539	151,6
Pumper	232	1,4	1 213	1,3	1 636	5,5	27 717	7,7	5 135	2,1	29 367	8,2	27 620	7,7
Belysning	10 372	64,8	58 332	64,8	18 711	62,4	195 040	54,2	108 960	45,1	228 908	63,6	372 210	103,4
Teknisk utstyr	2 803	17,5	15 768	17,5	1 566	5,2	124 050	34,5	30 960	12,9	124 050	34,5	168 192	46,7
Romkjøling	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	60 849	16,9	0	0,0	40 590	11,3	6 397	1,8
Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0	0,0	0,00	0,0	1 864	6,2	44 991	12,5	21 939	9,1	58 417	16,2	107 972	30,0
Total	62 035	388	284 725	316	134 162	447	1 199 232	333	803 725	335	1 322 241	367	2 242 878	623
Heating	43 860	274	182 592	203	92 377	308	552 445	153	481 454	201	593 859	165	905 948	252
WaterHeat	4 768	30	26 820	30	3 000	10	18 000	5	24 000	10	18 000	5	108 000	30
Elspecific	13 407	84	75 313	84	36 321	123	522 947	145	276 332	116	611 375	170	1 114 561	313
Cooling	0	0	0	0	1 864	6	105 840	29	21 939	9	99 007	28	114 369	32
Parameterverdier fra - til	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til	Fra	Til
U-verdi yttervegg [W/m²K]	0,96	0,18	1,30	0,18	0,96	0,18	1,30	0,18	1,30	0,18	1,30	0,18	1,30	0,18
Lufttetthet, lekkasjeetall N50 [1/h]	5,00	2,80	2,50	1,95	3,00	1,80	2,50	1,95	3,00	1,80	2,50	1,95	3,00	1,95
Normalisert kuldebroverdi [W/m²K]	0,05	0,03	0,12	0,03	0,03	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03
Forbruk etter enøk	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]
Romoppvarming	26 410	165,1	105 798	117,6	57 445	191,5	239 909	66,6	235 382	98,1	226 345	62,9	168 709	46,5
Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0	0,0	0	0,0	17 089	57,0	180 251	50,1	154 862	64,5	234 303	65,1	596 791	165,6
Oppvarming av tappevann	4 768	29,8	26 820	29,8	3 000	10,0	18 000	5,0	24 000	10,0	18 000	5,0	108 000	30,0
Vifter (ventilasjon)	0	0,0	0	0,0	15 008	50,0	176 140	48,9	131 877	54,9	229 050	63,6	546 539	151,6
Pumper	216	1,4	951	0,7	1 621	5,4	27 094	7,5	4 876	1,9	29 739	8,3	28 167	7,6
Belysning	10 372	64,8	58 332	64,8	18 711	62,4	195 040	54,2	108 960	45,1	228 908	63,6	372 210	103,4
Teknisk utstyr	2 803	17,5	15 768	17,5	1 566	5,2	124 050	34,5	30 960	12,9	124 050	34,5	168 192	46,7
Romkjøling	0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	83 943	23,3	0	0,0	59 636	16,6	12 347	3,4
Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0	0,0	0,00	0,0	1 864	6,2	44 991	12,5	21 939	9,1	58 417	16,2	107 972	30,0
Total	44 569	278,6	207 369	230,4	116 304	387,7	1 089 418	302,6	712 066	296,5	1 208 448	335,8	2 108 947	585,8
Energibesparelse	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]	[kWh/år]	[kWh/m²]
Romoppvarming	17 450	109	76 794	85	17 654	59	129 197	36	89 576	37	128 937	36	132 428	37
Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	0	0	0	0	189	1	3 088	1	1 624	1	4 274	1	8 020	2
Oppvarming av tappevann	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vifter (ventilasjon)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pumper	16	0	562	1	15	0	623	0	459	0	-372	0	-567	0
Belysning	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Teknisk utstyr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Romkjøling	0	0	0	0	0	0	-23 094	-6	0	0	-19 046	-5	-5 950	-2
Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	17 466	109	77 356	86	17 858	60	109 814	30	91 659	38	113 793	32	133 931	37
Besparselse Heating	17 450	109	76 794	85	17 843	59	132 285	37	91 200	38	133 211	37	140 448	38
Besparselse WaterHeat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Besparselse Elspecific	16	0	562	1	15	0	623	0	459	0	-372	0	-567	0
Besparselse Cooling	0	0	0	0	0	0	-23 094	-6	0	0	-19 046	-5	-5 950	-2
Besparselse total i %	28	28	27	27	13	13	9	9	11	11	9	9	6	6
Besparselse Heating i %	40	40	42	42	19	19	24	24	19	19	22	22	16	15
Besparselse WaterHeat i %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Besparselse Elspecific i %	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Besparselse Cooling i %	0	0	0	0	0	0	-22	-22	0	0	-19	-19	-5	-5



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway