

Miljøoptimal oppgradering av eksisterende boliger

Steinar Fredriksen
Lars Johnsgård Jensen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Rolf André Bohne, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Miljøoptimal oppgradering av eksisterende boliger	Dato: 09.06.2014		
	Antall sider (inkl. bilag): 189		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Steinar Fredriksen og Lars Johnsgård Jensen			
Faglærer/veileder: Rolf André Bohne			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Ingen			

Klimaendringer er en av de største utfordringene for verdenssamfunnet i dag og FNs klimapanel har identifisert boligsektoren som et satsningsområde for utslippsreduksjoner. Fire femtedeler av dagens boliger skal fortsatt stå i 2040 og omfattende oppgraderinger er nødvendig.

Beregninger viser at det er mulig å nå både EUs målsetning om 17 % reduksjon i energiforbruket innen 2020 og FNs klimapanelers målsetning om halvering av klimagassutslippene innen 2040. Oppgraderingsratene må dobles og energiproduksjonen må bli 13 % renere for å nå målene. Arnstad-rapportens målsetning om en halvering av energiforbruket innen 2040 er derimot mindre realistisk. En fullstendig oppgradering av boligmassen innen 2040 reduserer kun energiforbruket med 45 %.

Miljøoptimalt oppgraderingsnivå er tilnærmet likt passivhus-nivå, med U-verdier under 0,1 W/m²K. I et klimagassperspektiv er nivået sensitivt for renere energi. Renere energi reduserer oppgraderingsbehovet.

Behovsstyring av ventilasjon og nattsinking av temperatur er identifisert som tiltak med stor netto energibesparelse, uten å gå på bekostning av godt innemiljø. "Passiv energidesign" er mindre effektivt, da det tilføres vesentlige mengder bundet energi.

En rask implementering av energibesparende tiltak er nødvendig for å redusere de akkumulerte klimagassutslippene over tid. Endret beboeradferd er identifisert som et effektivt tiltak. En premiering, for eksempel av beboere i små boliger, kan endre beboeradferden i befolkningen.

Beregningene i denne oppgaven er basert på en bottom-up-metode i simuleringsprogrammet SIMIEN. Optimaliseringen er basert på bundet energi og driftsenergi. En fremtidig boligmasse er vurdert basert på en dynamisk modell.

Stikkord:

1. Eksisterende boliger
2. Driftsenergi
3. Bundet energi
4. Optimalisering

Forord

Denne masteroppgaven avslutter en femårig sivilingeniørutdannelse ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Masteroppgaven er skrevet av to studenter ved Institutt for bygg, anlegg og transport og utgjør totalt 60 studiepoeng.

Samfunnet har et stadig økende fokus på klimaendringer og miljø. Vår motivasjon for oppgaven er basert på et ønske om å forbedre miljøytelsen i dagens boligmasse. Hele fire femtedeler av dagens boligmasse står fortsatt i år 2040 og det ligger et stort miljøforbedringspotensial i eksisterende boliger. Flere har skjønnet potensialet og det foreligger planer om å innføre både lavenergi og passivhus som forskriftskrav for eksisterende boliger. Få studier har derimot sett på hva som er optimalt ut i fra et miljøperspektiv. Vi ønsker med denne masteroppgaven å sette søkelyset på hva som er det miljøoptimale oppgraderingsnivået i den eksisterende boligmassen.

I april 2014 la FNs klimapanel frem en ny klimarapport og i rapporten trekkes bygningers store miljøreduksjonspotensial frem. Denne rapporten har vært en inspirasjonskilde for oss. En annen inspirasjonskilde har vært Lars Myhres doktorgrad fra 1995. Myhre har inspirert oss med sitt grundige arbeid og ryddige fremstilling.

Det rettes en stor takk til vår veileder Rolf André Bohne for gode samtaler gjennom hele semesteret. Bohne har hatt stor tro på masteroppgaven fra første stund og det er hans fortjeneste at vi har skrevet oppgaven sammen.

Vi ønsker også å takke Håvard Solem i Enova, Lars Petter Nilsen i AS Bygganalyse, professor Arvid Dalehaug på BAT ved NTNU og post doc. Stefan Pauliuk på EPT ved NTNU for gode innspill til oppgaven.

Avslutningsvis ønsker vi å rette en stor takk til gutta på kontoret for gode sjakkpartier. I tillegg ønsker vi å takke Marie Rognes og Christopher L. Simonsen for gjennomlesing av oppgaven. Dere har vært til stor hjelp!

Trondheim, 09.06.2014



Steinar Fredriksen



Lars Johnsgård Jensen

Sammendrag

Klimaendringer er en av de største utfordringene for verdenssamfunnet i dag. Kun en umiddelbar og kollektiv reduksjon i utslipp av klimagasser kan snu den negative trenden. FNs klimapanel trekker frem boligsektoren som et satsningsområde og mener det er mulig å oppnå umiddelbare utslippsreduksjoner. Omkring fire femtedeler av dagens boligmasse vil fortsatt stå i år 2040 og omfattende oppgraderinger er nødvendig for å redusere klimagassutslippene.

Formålet med denne oppgaven er å definere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå for eksisterende boliger. Basert på det optimale nivået er myndighetenes klimamålsetninger vurdert. Boligmassen er modellert etter en bottom-up-metode i simuleringsprogrammet SIMIEN. Ulike oppgraderinger er modellert og optimalisert basert på bundet energi og driftsenergi. En vurdering av den fremtidige boligmassen er basert på en dynamisk modell.

Beregninger viser at det er mulig å nå EUs målsetning om en 17 % reduksjon av energiforbruk innen år 2020. En oppgradering til optimalt nivå er nødvendig og dagens oppgraderingsrater må doubles. Arnstad-rapportens målsetning om en halvering av energiforbruket innen år 2040 er mindre realistisk. En fullstendig oppgradering av boligmassen vil kun redusere energiforbruket med omtrent 45 %. FNs klimapanelens målsetning om en halvering av klimagassutslippene innen år 2040 er derimot mulig. I tillegg til en fullstendig oppgradering av boligmassen må utslipp av klimagasser fra produksjon av energi reduseres med omtrent 13 % for å nå halveringsmålet.

En oppgradering av boligmassen mot et passivhus-nivå virker som et miljøoptimalt nivå. Det innebærer U-verdier under $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Løsningen er basert på en energioptimalisering. Sett i et klimagassperspektiv er oppgraderingsnivået sensitivt for ulike energimikser. Renere energiproduksjon reduserer oppgraderingsbehovet.

Installasjon av ventilasjonsanlegg i eksisterende boliger kan bidra til økt energiforbruk. For å redusere energiforbruket og samtidig opprettholde et godt innemiljø anbefales det at et behovsstyrt ventilasjonsanlegg installeres. Nattsinking av innetemperatur er også identifisert som et effektivt energibesparende tiltak som ikke går på bekostning av innemiljø. Både behovsstyring og nattsinking tilfører marginale mengder bundet energi og bidrar derfor til stor netto energibesparelse. "Passiv energidesign" tilfører til gjengjeld vesentlige mengder bundet energi.

En rask implementering av energibesparende tiltak er nødvendig for å redusere akkumulerte klimagassutslipp over tid. Økte forskriftskrav for eksisterende boliger og økonomisk stimuli er aktuelle løsninger. Endret beboeradferd er identifisert som et effektivt tiltak. En premiering av beboere i små boliger, eksempelvis gjennom skattesystemet, kan endre beboeradferden i befolkningen.

Summary

Climate change is one of the biggest challenges facing the society today. Only an immediate and collective reduction of greenhouse gas emissions can reverse the negative trend. IPCC highlights the dwelling sector as a priority area and believes an immediate emission reduction is possible. About 4/5 of the current dwelling stock will still be standing in 2040 and major upgrades are needed to reduce greenhouse gas emissions.

The purpose of this thesis is to define an environmental optimal level of upgrade for existing dwellings. Based on the optimal level of upgrade the government's climate goals are evaluated. The dwelling stock is modeled by a bottom-up approach in a simulation program called SIMIEN. Various upgrades are modeled and optimized based on embodied energy and operational energy. An assessment of a future dwelling stock size is based on a dynamic stock model.

Calculations show that reaching the EU target of a 17 % reduction of energy consumption by 2020 is likely. Upgrade to the optimal level is required and current rates of upgrade need to double. Reaching the Arnstad target of a 50 % reduction of energy consumption by 2040 is less realistic. A complete upgrade of the dwelling stock reduces the energy consumption only by 45 %. On the other side, it is likely to reach the IPCC target of a 50 % reduction of greenhouse gas emissions within 2040. In addition to a complete upgrade of the dwelling stock the emissions of greenhouse gases from energy production need to be reduced by about 13 %, to reach the 50 % target.

An upgrade of the dwelling stock to a level of "passivhus" seems optimal in an environmental perspective. This level involves U-values below 0.1 W/m²K. The level of upgrade is based on an energy optimization algorithm. In a perspective of greenhouse gases, the level of upgrade is sensitive to different energy mixes. Cleaner energy reduces the level of upgrade.

Installation of a ventilation system in existing dwellings contributes to increased energy consumption. To reduce energy consumption and still maintain a sufficient indoor environment, it is recommended to install a demand controlled ventilation system. Lowering the indoor temperature during the night is also identified as an effective energy-saving measure, which do not compromise indoor environment. Both demand control and temperature lowering adds marginal amounts of embodied energy and contributes to significant net energy savings. In contrast, "Passive energy design" brings significant amounts of embodied energy.

A rapid implementation of energy-saving measures is required to reduce cumulative emissions in the long run. Increased legislative requirements for existing dwellings and financial stimuli is assumed to be appropriate solutions. Furthermore, an effective measure identified is shift in occupant behavior. A reward of residents in small dwellings, e.g. through the tax system, can stimulate to a shift in occupant behavior.

Innholdsfortegnelse

Forord	iii
Sammendrag	v
Summary	vii
Innholdsfortegnelse	ix
Forkortelser.....	xi
Kapittel 1	1
1.1 <i>Bakgrunn</i>	1
1.2 <i>Formål og problemstilling</i>	3
Kapittel 2	7
2.1 <i>Bygningspolitikk</i>	7
2.2 <i>Boligmassen</i>	17
2.3 <i>Energiforbruk i bygg</i>	38
2.4 <i>Metoder for modellering av driftsenergi</i>	41
2.5 <i>Forbruk av driftsenergi i boligmassen</i>	43
2.6 <i>Energibesparende tiltak</i>	47
2.7 <i>Materialbruk ved energibesparende tiltak</i>	54
2.8 <i>Miljøvurdering av bygg</i>	62
2.9 <i>Miljøverktøy</i>	65
2.10 <i>Klimagassutslipp</i>	71
2.11 <i>Endringer i boligmassen</i>	73
2.12 <i>Optimalisering</i>	76
Kapittel 3	77
3.1 <i>Metodebruk</i>	77
Kapittel 4	95
4.1 <i>Resultater</i>	95
4.2 <i>Diskusjon</i>	125
Kapittel 5	141
5.1 <i>Konklusjon</i>	141
5.2 <i>Videre arbeid</i>	143
Referanser	145
Vedlegg	163

Forkortelser

Forkortelser	Forklaring
BNP	Bruttonasjonalprodukt
BNL	Byggenæringens Landsforening
BRA	Bruksareal
CO ₂ -ekv.	CO ₂ -ekvivalenter
enøk	Energiøkonomisering
EPD	Environmental Performance Declaration
FE	Funksjonell enhet
GAB-registeret	Grunneiendom, adresser og bygnings-registeret
ICE	Inventory of Carbon and Energy
IPCC	FNs klimapanel
ISO	International Organization for Standardization
KGR	klimagassregnskap.no
KRD	Kommunal- og regionaldepartementet
NHO	Næringslivets Hovedorganisasjon
NIM	Nanoisolasjonsmaterialer
NOU	Norges offentlige utredninger
NBI	Norges byggforskningsinstitutt
PBL	Lov om planlegging og byggesaksbehandling
PCR	Produktkategoriregler
SERG	Skatteetatens sentrale eiendomsregister
SSB	Statistisk Sentralbyrå
TEK10	Forskrift om tekniske krav til byggverk 2010
TOBB	Trondheim og omegn boligbyggelag
U-verdi	Varmegjennomgangskoeffisient
VIP	Vakumisolerte paneler

Kapittel 1

According to a new UN report, the global warming outlook is much worse than originally predicted. Which is pretty bad, when they originally predicted it would destroy the planet

- Jay Leno, programleder for "The Tonight Show"

FNs klimapanel (IPCC) publiserte i løpet av første halvdel av 2014 to rapporter om klimaendringer. Rapportene er utarbeidet av verdens fremste klimaforskere, som har gjennomgått flere tusen modeller og vitenskapelige artikler. Svært entydig konkluderer de med at verdenssamfunnet nå står ovenfor store utfordringer relatert til klimaendringene (IPCC, 2010; IPCC, 2014c; IPCC, 2014d). Klimaendringer er i følge Randers (2012) en av de største utfordringene for den moderne sivilisasjonen og det er i dag liten tvil om at klimaendringene er menneskeskapte (IPCC, 2014c). FNs klimapanel konkluderer med at utfordringene relatert til klimaendringene vil påvirke hele jordkloden. Det vil bli mer ekstremvær, havnivået vil øke, ekstrem tørke vil inntreffe oftere og tilgang på ferskvann vil bli redusert (IPCC, 2014a). En umiddelbar og omfattende omstilling blant verdens befolkning, bedrifter og nasjoner er nødvendig for å snu den negative utviklingen. For å klare dette må ressursforbruket reduseres og ny teknologi utvikles (IPCC, 2014a; IPCC, 2014d; Randers, 2012).

1.1 Bakgrunn

Teorien om menneskeskapte klimaendringer ble introdusert allerede på 1960-tallet og Meadows et al. (1972) adresserte problemet i boka *The Limits to Growth* i 1972 (Randers, 2012). I de påfølgende tiårene medførte et økende ønske om kunnskap rundt klimaendringer blant annet til opprettelsen av FNs klimapanel i 1988 (IPCC, 2010).

Klimarelatert forskning har økt i takt med et økende fokus på problemene relatert til klimaendringer. Fortsatt gjenstår mye arbeid for å samle alle verdens nasjoner til en felles innsats mot klimaendringer. Det har vært gjort flere forsøk, med blant annet Klimakonvensjonen i 1992, Kyotoprotokollen i 1997 og Bali-konferansen i 2007, for å få til en felles avtale om utslippsreduksjoner. I samtlige avtaler har store land valgt å stå utenfor, og det er fortsatt ikke undertegnet en avtale som forplikter samtlige nasjoner til å redusere sine utslipp av klimagasser (Olerud, 2012).

EU-landene har siden 1990-tallet, i motsetning til mange andre industrialiserte land, vært en pådriver for å redusere utslippene av klimagasser. I 1996 bestemte unionen seg for at den globale oppvarmingen må begrenses til en 2 °C økning i forhold til førindustriell gjennomsnittstemperatur (European Council, 1996). Grensen blir ofte kalt 2-gradersmålet og er en tenkt smertegrense for den globale oppvarmingen. 2-gradersmålet er omdiskutert og baseres på en teori fra tyske forskere på 1990-tallet. I følge teorien skal det være mulig å definere en øvre smertegrense for den globale oppvarmingen (WBGU, 1995; WBGU, 1997). Forskere er i dag enige om at den globale oppvarmingen mest sannsynlig ikke vil stoppe på 2 °C. 2-gradersmålet blir allikevel fortsatt brukt av politikere og beslutningstakere for å definere målsetninger relatert til klimaspørsmålet (Graham, 2009; IPCC, 2014d; Randers, 2012).

FNs klimapanel er en av de viktigste bidragsyterne til forskning på klima og klimaendringer. Siden opprettelsen i 1988 har FNs klimapanel jevnlig produsert rapporter om verdens klimatilstand. I den siste rapporten (IPCC AR5 WGIII) blir 2-gradersmålet benyttet som en definert målsetning for å begrense utslippene av klimagasser. I denne rapporten trekkes bygninger frem som en av de største bidragsyterne til global oppvarming. I rapporten konkluderer FNs klimapanel med at det er nødvendig med en reduksjon i utslipp av klimagasser med omtrent 50 % i forhold til et 2010-nivå, for å nå 2-gradersmålet. En stor andel av utslippsreduksjonen må komme fra bygninger (IPCC, 2014b; IPCC, 2014d; Meld. St. 28, 2012).

I 2008 ble alle de store partiene på Stortinget enige om et nasjonalt klimaforlik. Forliket ble vedtatt på Stortinget i 2012 og danner grunnlaget for norsk klimapolitikk frem til 2020. I forliket fokuseres det på forskning og utvikling av teknologi og utslippsreduksjoner (MD, 2012; Rosvold & Olerud, 2014). Utslipp av klimagasser skal reduseres med 15 - 17 millioner tonn CO₂-ekvivalenter (CO₂-ekv) innen 2020 (Rosvold & Olerud, 2014). For bygninger betyr det at energi-effektiviteten må forbedres betydelig (Meld. St. 28, 2012).

EU har i mange år vært en veiviser for energieffektivisering. I det siste energieffektiviseringsdirektivet fra unionen forplikter medlemslandene seg til å

reducere sitt totale energiforbruk med 17 % innen 2020. Bygninger, som står for 36 % av klimagassutslippene i EU, spiller en sentral rolle i energieffektiviseringen (Lavenergiprogrammet, u.å.-b). I 2002 ble EUs første Bygningsenergidirektiv vedtatt. Siden da har det satt rammevilkårene for bygningspolitikken i unionen og vært med på å danne grunnlaget for norsk bygningspolitikk (Lavenergiprogrammet, u.å.-a; Meld. St. 28, 2012). Gjennom revisjoner av Plan- og bygningsloven (PBL) og Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10) implementeres Bygningsenergidirektivets krav i norsk bygningspolitikk (Meld. St. 28, 2012).

På nasjonalt nivå settes det også målsetninger om energieffektivisering. Eli Arnstad publiserte i 2010 en rapport for Kommunal- og regionaldepartementet. I rapporten vurderes mulighetene for energieffektivisering i bygninger og vurderingene bygger videre på EUs energieffektiviseringsdirektiv. Et av målene som settes i rapporten er å halvere energiforbruket fra bygg innen år 2040 (Arnstad et al., 2010).

1.2 Formål og problemstilling

I EUs Bygningsenergidirektiv stilles det krav ved oppgradering av eksisterende bygninger. Kravene gjelder blant annet minimumsstandard på tekniske løsninger og inntreffer ved oppgraderingstiltak som omfatter over 25 % av bygningsverdien eller ved tiltak på klimaskallet (Meld. St. 28, 2012). PBL inneholder også krav ved tiltak på eksisterende bygninger. Etter PBL skal oppgraderingstiltak utføres med samme kvalitet som ved nybygg. I motsetning til EUs Bygningsenergidirektiv mangler loven en tydelig presisering av tiltakets omfang. Det vanskeliggjør myndighetenes regulatoriske virkemidler for å trekke energi- og klimaeffektiv beslutninger. Flere har derfor tatt til orde for en tydeligere presisering av kravsnivå ved tiltak på eksisterende bygninger (Evjenth et al., 2011; Fredriksen, 2013; Kalhagen, 2011).

Ulike studier har vurdert potensialet av å oppgradere den eksisterende bygningsmassen til både passiv-, lavenergi- og TEK10-standard. Studiene bygger på ønsket om å definere et kravsnivå for tiltak på eksisterende bygninger (Meld. St. 28, 2012).

Formålet med denne masteroppgaven er å vurdere hvilket kravsnivå som er optimalt ut i fra et energi- og miljøperspektiv. En utvikling mot bedre isolerte bygg har medført at bundet energi i bygningsmaterialene får en større relativ betydning for det totale energiforbruket til bygningen (Ding, 2004). For å definere et optimalt kravsnivå vil bygningers driftsenergi vurderes mot tilført bundet energi ved oppgraderinger. Basert på en miljøoptimal oppgradering av

boligmassen vurderes det hvor realistisk nasjonale og internasjonale miljø-målsetninger er.

Med bakgrunn i formålet er følgende problemstilling formulert:

Med utgangspunkt i EUs og myndighetenes klimamålsetning, er det mulig og realistisk å redusere energiforbruket fra boliger med 17 % innen 2020 og energiforbruket og klimagassutslippene med 50 % innen 2040?

For å svare på problemstillingen er det utarbeidet fire forskningsspørsmål.

1. Hvordan er den eksisterende boligmassen bygget opp og hvilket forbruk av driftsenergi har boligmassen?
2. Er det mulig å definere et optimalt oppgraderingsnivå for eksisterende boliger ved å vurdere boligens reduserte driftsenergi mot tilført bundet energi ved oppgradering?
3. Hva er energi- og klimagasspotensialet i dagens boligmasse og på hvilke boliger bør oppgraderinger prioriteres?
4. Vil 2-gradersmålet og myndighetenes målsetninger om redusert energiforbruk og klimagassutslipp i boligmassen nås med miljøoptimal oppgraderingsmengde og innen hvilke rammer?

1.3 Avgrensninger

Oppgaven er avgrenset til å vurdere energi- og miljøoppgraderinger i den eksisterende boligmassen. Boliger er valgt fremfor næringsbygg, da de totalt sett forbruker omtrent 30 % mer energi enn næringsbygg (Enova, 2012). Fritidsboliger inngår ikke i definisjonen av en bolig og er derfor ikke vurdert.

På grunn av et økende fokus på miljø og klimaendringer er det valgt å avgrense oppgaven til kun å vurdere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå. Det er ikke tatt hensyn til økonomioptimalt eller sosialoptimalt oppgraderingsnivå. Norske myndigheter ønsker at bygningspolitikken skal bygge på prinsippet om bærekraftig utvikling. Selv om oppgaven ikke definerer et økonomioptimalt eller sosialoptimalt oppgraderingsnivå, er det miljøoptimale oppgraderingsnivået vurdert ut i fra prinsippet om bærekraftig utvikling.

Bygningsvern er en del av en bærekraftig bygningspolitikk. Det er problematisert rundt bygningsvern, og energi og miljøoppgraderinger, men det er ikke tatt hensyn til at enkelte av boligene i Norge er vernet. Vernede boliger kan vanskeliggjøre oppgradering til et miljøoptimalt nivå.

Oppgaven er videre avgrenset til kun å vurdere tilgjengelige og utbredte bygningsmaterialer ved oppgradering. State-of-the-art-bygningsmaterialer er ikke benyttet grunnet at det i liten grad finnes dokumentasjon om materialenes miljøpåvirkning. Ulike plusstiltak, som solceller og solfanger, er heller ikke vurdert i oppgaven. Alle tiltakene som presenteres er basert på tekniske løsninger anbefalt av SINTEF Byggforsk. Gjennomførbarhetene av tiltakene er ikke videre vurdert, utover den diskusjonen som er presentert avslutningsvis i oppgaven.

Energi- og klimagassutslipp fra materialer er beregnet basert på miljødeklarasjoner og miljødatabaser. Det er ikke gjennomført en fullstendig livsløpsanalyse. Oppgaven er begrenset til å se på eksisterende boliger og store deler av en livsløpsanalyse faller derfor bort. Eksempel på deler av en livsløpsanalyse som faller bort er plassering av boligen.

I oppgavens materialanalyse er det valgt å kun fokusere på materialer som har en reell påvirkning på den bundne energien. Det er eksempelvis valgt å se bort i fra festemidler som spiker og skruer.

1.4 Leseveiledning

Oppgaven er bygget opp rundt problemstillingen og forskningsspørsmålene. I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er fire forskningsspørsmål presentert. Spørsmålene danner grunnlaget for både bakgrunnsteori, metodebruk, resultater og diskusjon. I innledningen til hvert kapittel gis en presentasjon av hvilke forskningsspørsmål som relateres til kapittelet.

I kapittel 2 presenteres bakgrunnsteori for oppgaven. Kapittelet innledes med en innføring i myndighetenes bygningspolitikk, for å sette oppgavens resultater og diskusjon i et samfunnsperspektiv. Deretter følger detaljert informasjon om den eksisterende boligmassen og alternative oppgraderinger for boligmassen. Informasjonen presenteres for å kunne vurdere ulike og aktuelle oppgraderings tiltak. Kapittelet avsluttes med en presentasjon av utvalgte metoder for optimalisering av boligmassens oppgraderingsnivå. Blant metodene som presenteres er metoder for beregning av bundet energi i bygningsmaterialer. Avslutningsvis i kapittelet gis en innføring i optimaliseringsteori.

Kapittel 3 er et metodekapittel. Det er anbefalt å lese hele metodekapittelet for å forstå oppgavens resultater. Som Olsson (2011) understreker gir metodekapittelet mulighet til å forstå arbeidet, og dets styrker og svakheter. I metodekapittelet presenteres to skjematisk fremstillinger av arbeidsprosessen. De er presentert for å visualisere fremgangsmåten og en gjennomlesing av fremstillingene er anbefalt.

Kapittel 4 er todelt og består av resultater og diskusjon. Resultatdelen er bygget opp rundt forskningsspørsmålene og en skjematisk fremstilling er vist for kapittelets oppbygning. Sammen med resultatene er det gitt en henvisning tilbake til aktuell metode. Diskusjonen er også strukturert rundt forskningsspørsmålene og i hvert kapittel henvises det til hvilket forskningsspørsmål som diskuteres. I diskusjonen trekkes relevante linjer fra kapittel 1, 2 og 3. Diskusjonsdelen avsluttes med et feilkildekapittel.

Kapittel 5 er todelt og består av konklusjon og videre arbeid. Konklusjonen er basert på oppgavens problemstilling, og diskusjon og resultater fra kapittel 4. Kapittel 5 avsluttes med en anbefaling for videre arbeid.

Enkelte deler av oppgaven har et høyt detaljnivå og er muligens ikke relevant for alle leserne. Det er satt opp følgende leseanbefalinger avhengig av interesse og tidsbruk. Listen er rangert fra en rask gjennomlesning til en fullstendig gjennomgang av oppgaven.

1. Sammendrag og evt. konklusjon
2. Sammendrag, konklusjon og diskusjon relatert til forskningsspørsmål 4
3. Metode, resultater, diskusjon og konklusjon
4. Hele oppgaven, unntatt kapittel 2.2 *Boligmassen*
5. Hele oppgaven
6. Hele oppgaven, inkludert vedlegg og datafiler

For å øke lesbarheten i oppgaven er en del informasjon trukket ut i vedlegg. Denne informasjonen, sammen med vedlagte filer, kan være aktuelt for lesere som ønsker å jobbe videre med oppgaven.

Etter inspirasjon fra *The Chicago Manual of Style* (1993) og *How to Write and Publish a Scientific Paper* (Day, 1998) er fotnoter i tabeller systematisk bygget opp gjennom oppgaven. En fotnote er presentert med en stjerne eller bokstav. En stjerne brukes til å utdype innholdet i tabeller. Bokstaver i det norske og greske alfabetet er brukt for å betegne informasjonskilder i tabellene. Hver informasjonskilde er betegnet med en unik bokstav. I metodekapittelet brukes i tillegg en kombinasjon av bokstav og stjerne (Eksempel^{a*}). Denne kombinasjonen indikerer at informasjonen ikke er hentet direkte fra informasjonskilden, men derimot basert på informasjonskilden.

Kapittel 2

*What is the use of a house if
you haven't got a tolerable
planet to put it on?*

- Henry David Thoreau, amerikansk forfatter og filosof

I dette kapittelet presenteres en teoretisk bakgrunn for oppgaven. Kapittelet er delt i tolv underkapitler og alle er forankret i ett eller flere av forskningsspørsmålene. Forskningsspørsmålene er presentert i kapittel 1.2 *Formål og problemstilling*. Det første kapittelet, 2.1 *Bygningspolitikk*, gir et teoretisk grunnlag for å vurdere oppgaven i et bærekraftperspektiv. Kapittel 2.2 *Boligmassen* til og med kapittel 2.5 *Forbruk av driftsenergi i boligmasse* inneholder informasjon for å definere energibruken og bygge opp en modell for den eksisterende boligmassen. I Kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* og kapittel 2.7 *Materialbruk ved energibesparende tiltak* presenteres ulike oppgraderingstiltak og ulike løsninger for energioppgraderinger av boliger. Disse to kapitlene, sammen med kapittel 2.8 *Miljøvurdering av bygg* og kapittel 2.9 *Miljøverktøy*, danner grunnlaget for beregning av bundet energi i forbindelse med oppgraderinger. I kapittel 2.10 *Klimagassutslipp* presenteres en metode for omregning av energiforbruk til klimagasser, mens det i kapittel 2.11 *Endringer i boligmassen* er presentert en metode for å fremskrive boligmassen til en fremtidige boligmengde. Kapittel 2.12 *Optimalisering* gir en innføring i optimaliseringsteori og danner grunnlaget for optimaliseringene i denne oppgaven.

2.1 Bygningspolitikk

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er det gitt en presentasjon av forskningsspørsmålene. Forskningsspørsmål fire handler blant annet om "innen

hvilke rammer” en miljøoptimal oppgradering av boligmassen må skje. Myndighetene ønsker en bærekraftig bygningspolitikk og det er derfor nødvendig å belyse den miljøoptimale løsningen i en bærekraftkontekst. I dette kapitlet gis det en innføring i sentrale bygningspolitiske områder, med fokus på bærekraft.

Bærekraftprinsippet ble introdusert av Verdenskommisjonen for miljø og utvikling i 1987. Verdenskommisjonen (1987) definerer bærekraftbegrepet på følgende måte: ”Bærekraftig utvikling er utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov”. For å oppnå bærekraft mener Verdenskommisjonen (1987) at det er nødvendig å fokusere på tre forhold i samfunnet. Disse tre forholdene er sosiale forhold, miljø og økonomi. I Stortingsmelding 28 står det at ”bygningspolitikken skal bygge på prinsippene om bærekraftig utvikling” (Meld. St. 28, 2012). En bærekraftig bygningspolitikk skal blant annet sørge for at alle mennesker har lik tilgang til bygninger, at bygningene bygges med god miljøstandard og innenfor rimelige kostnader (Meld. St. 28, 2012).

For bygninger benyttes det i stor grad lovverk og forskrifter for å oppnå en bærekraftig utvikling (Meld. St. 28, 2012).

2.1.1 Bygningslovgivningen

Myndighetene kan styre utviklingen av bygningsmassen i bestemte retninger. Det kan være for å sikre en bærekraftig utvikling eller for å nå internasjonale forpliktelser. For å oppnå en bærekraftig utvikling av bygningsmassen kan myndighetene bruke lover og forskrifter som regulatoriske virkemidler (Meld. St. 28, 2012). Erfaringer fra IPCC (2014b) viser at regulering i mange tilfeller er mer effektivt enn økonomiske insentiver for å nå definerte klimamål.

Lov om planlegging og byggesaksbehandling

Gjennom PBL regulerer myndighetene byggesaker, ivaretar samfunnsinteresser og forvalter arealer. Loven håndterer de miljømessige, økonomiske, sosiale og kulturelle rammene for byggesaker ved å regulere planlegging og ansvarsrett (Plan- og bygningsloven, 2008). I lovens formålsparagraf trekkes det spesielt frem at loven skal fremme bærekraftig utvikling og ivareta prinsippet om universell utforming.

PBL er først og fremst rettet mot nye tiltak, men loven har også en egen bestemmelse for oppgraderingstiltak. Kapittel 31 regulerer krav til eksisterende byggverk. Lovens § 31-2 (1) sier:

Tiltak på eksisterende byggverk skal prosjekteres og utføres i samsvar med bestemmelser gitt i eller i medhold av loven. På byggverk som er,

eller brukes, i strid med senere vedtatt plan, kan hovedombygging... bare tillates når det er i samsvar med planen. (Plan- og bygningsloven, 2008)

Begrepet hovedombygging har ingen klar definisjon i lovverket. Om et tiltak defineres som hovedombygging pliktes utbygger å oppfylle alle minimumskravene i teknisk forskrift. Intensjonen bak begrepet er at det ved omfattende oppgraderinger skal være mulig å pålegge en utbygger en fullstendig oppgradering av bygget og sette bygget i en stand tilsvarende nybygg (Evjenth et al., 2011; Fredriksen, 2013; Kalhagen, 2011).

Oppgraderingstiltak regnes som søknadspliktige etter lovens § 20-1 a og b, som sier:

...må følgende tiltak...ikke oppføres uten at søknad...er sendt kommunen, og den deretter har gitt tillatelse: a) oppføring, tilbygging, påbygging... b) vesentlig endringer eller vesentlig reparasjon av tiltak som nevnt under a. (Plan- og bygningsloven, 2008)

Etterisolering av ytterfasade er et oppgraderingstiltak som i mange tilfeller fører til at eksteriørkarakteren endres og derfor er søknadspliktig etter PBLs § 20-1 (SINTEF, 2004c).

Kravene til oppgraderingstiltak reguleres av kapittel 29. Lovens § 29-5 regulerer tekniske krav: "Ethvert tiltak skal prosjekteres og utføres slik at det ferdige tiltaket oppfyller krav til sikkerhet, helse, miljø og energi..." (Plan- og bygningsloven, 2008).

Selv om et tiltak er søknadspliktig kan det etter PBL gis unntak eller dispensasjon fra kravene i forskriften (Evjenth et al., 2011; Fredriksen, 2013). Unntaksbestemmelsene er regulert av lovens § 19-2 og § 31-2 (4). Lovverket gir mulighet til å innvilge dispensasjon om tiltaket har konsekvenser for helse, miljø og sikkerhet. Fører kravene til uforholdsmessig høye kostnader eller uhensiktsmessig bruk kan det også gis dispensasjon. Det er i slike tilfeller søkers ansvar å synliggjøre behovet for bruk av dispensasjonsparagrafen (Horne, u.å.). Både Evjenth et al. (2011) og Fredriksen (2013) mener at unntaksbestemmelsen kan medføre at oppgraderingstiltak får et lavere kvalitetsnivå enn det som er ønskelig fra myndighetenes side.

Forskrift om tekniske krav til byggverk

Spesifikasjoner og tekniske krav reguleres av "Forskrift om tekniske krav til Byggverk" (TEK10). Forskriften er tilhørende PBL og skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres med god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi

(TEK10, 2010). Forskriften inneholder gjeldene retningslinjene for nye og eksisterende bygninger. Kravene er i utgangspunktet tilpasset med tanke på nye bygg, men gjelder også for eksisterende bygninger. For eksisterende bygninger retter kravene seg i hovedsak kun mot det arbeidet og/eller den delen av byggverket arbeidet utføres (Prop. 91 L, 2011).

2.1.2 Sosiale forhold

Sosiale forhold er en av de tre dimensjonene i bærekraftprinsippet og nødvendig å vurdere for å sikre en bærekraftig utvikling. For å oppnå bærekraftige sosiale forhold i bygningspolitikken nevner Valen et al. (2010) aspekter som utvikling av samfunnsmessige behov, funksjonalitet og universell utforming som eksempler. McKenzie (2004) argumenterer for at organisasjoner og samfunnet generelt ofte undergraver den sosiale dimensjonen av bærekraft. McKenzie (2004) og Evjenth et al. (2011) mener at det må være en balanse mellom de tre dimensjonene for å oppnå bærekraft.

McKenzie (2004) har utviklet en rekke parametere for lettere å kunne indentifisere de sosiale dimensjonene. Eksempler på slike parametere er lik tilgang til viktige tjenester og like muligheter mellom generasjoner. I Stortingsmelding 28 benyttes også økonomi, sosiale forhold og miljø for å beskrive bærekraft. I Stortingsmeldingen trekkes det frem at det bør fokuseres på: "trygghet, inn klima, bokvalitet og trivsel, tilgjengelighet, universell utforming..." for å oppnå bærekraft (Meld. St. 28, 2012).

Universell utforming

"Menneskers likeverd er et prinsipp som er helt grunnleggende i et demokratisk velferdssamfunn som Norge" (NOU 2005:8). Dette er et av hovedbudskapene i Syse-utvalgets innstilling "*NOU 2005:8 Likeverd og tilgjengelighet*". Innstillingen ble senere til "Diskriminerings- og tilgjengelighetsloven". I lovens § 15 står det at universell utforming gjelder for alle bygg og anlegg rettet mot allmennheten etter krav i PBL. Universell utforming er derfor et lovpålagt krav for alle bygg som reguleres av PBL.

Universell utforming er et uttrykk for funksjonalitet og tilgjengelighet i vid forstand. Syse-utvalget definerer begrepet som: "...utforming eller tilrettelegging av hovedløsningen i de fysiske forholdene slik at virksomhetens alminnelige funksjon kan benyttes av flest mulig" (NOU 2005:8). Før begrepet ble introdusert på norsk har mer spesifikke betegnelser som tilgjengelig og brukbarhet blitt brukt i forskriftsverk i over tretti år (Christophersen, 2010). Christophersen (2010) trekker frem at de ulike begrepene uttrykker ulike grader av tilrettelegging. Tilgjengelighet og brukbarhet har tradisjonelt sett vært oppnåelig med spesial-

løsninger og eller spesielle tiltak. Universell utforming, på den andre siden, krever en bredere analyse av brukernes ferdigheter og mer likestilte løsninger (Christophersen, 2010).

Kravene om universell utforming har til dels endret hvordan boliger utformes. Spesielt er det kravene om trinnfrihet og enkel tilgang med rullestol til stue, kjøkken, bad og soverom som påvirker planløsning og arealer (Palm et al., 2012). Schmidt og Guttu (2012) har uttalt at boligene i mange tilfeller må bygges større for å tilpasses kravene. Spesielt for små boliger anslås det at universell utforming medfører en arealøkning. De anslåtte arealøkningene varierer fra 4 - 23 m² (Medby et al., 2006; Schmidt & Guttu, 2012). I tillegg mener Jensen (2013) at krav om universell utforming, som gjerne inntreffer ved hovedombygging av eksisterende bygninger, medfører økt ressursbruk.

2.1.3 Økonomi

Økonomi er en annen dimensjon av bærekraftsprinsippet. I kapittel 1.1 *Bakgrunn* kommer det frem at verdenssamfunnet står ovenfor store utfordringer for å nå 2-gradersmålet. IPCC (2014d) viser til at det finnes ulike løsninger som fører til måloppnåelse. Felles for løsningene er at de krever betydelige investeringer. Estimerer på hvor mye 2-gradersmålet vil koste varierer. IPCC (2014d) anslår at en tilpasning for å nå 2-gradersmålet vil gi en årlig reduksjon av bruttonasjonalprodukt (BNP) på 0,06 prosentpoeng. Dette er basert på en årlig BNP-økning på 1,6 - 3,0 %. IPCC (2014d) understreker at estimatet ikke tar hensyn til eventuelle økonomiske fordeler ved investeringene.

Arnstad et al. (2010) vurderer de økonomiske ringvirkningene av å halvere energiforbruket i Norges bygningsmasse innen år 2040. Det anslås at bare den økte omsetningen i bygningssektoren vil utgjøre ca. 80 000 nye årsverk (Arnstad et al., 2010).

I Meld. St. 28 (2012) påpekes det at økonomiske virkemidler medvirker til atferdsendringer gjennom å premiere ønsket atferd eller å "straffe" uønsket atferd. Dette støttes av Papadopoulos og Giama (2009) som blant annet trekker frem økonomisk bærekraft som et insentiv til effektivisering. I følge IPCC (2014b) og Evjenth et al. (2011) er trolig flere energioppgraderingstiltak lite privatøkonomisk lønnsomt. Ved å benytte økonomiske virkemidler menes det i Meld. St. 28 (2012) at tiltak som er samfunnsøkonomisk lønnsomt også kan bli privatøkonomisk lønnsomt. Dette kan være oppnåelig gjennom å benytte skatte- og avgiftssystemet, gi lån på gunstige tiltak eller gjennom direkte støtte til konkrete ønskede tiltak (Meld. St. 28, 2012). Evjenth et al. (2011) trekker også frem skattefradrag gjennom inntektsskattesystemet som virkemiddel i forbindelse med

oppgradering av eksisterende boliger. Dette støttes av Norges offentlige utredning (NOU) 2005:8 hvor det argumenteres for at i hvilke grad myndighetene skal påvirke oppgradering og vedlikehold av eksisterende bygninger langt på vei er et politisk spørsmål. IPCC (2014b) støtter dette og mener at markedet selv ikke vil gjennomføre den nødvendige transformasjonen uten ekstern stimuli.

2.1.4 Bygningsvern

Bevaring av eksisterende bygninger er ikke en egen dimensjon i bærekraftprinsippet, men i Stortingsmelding 28 trekkes bygningsvern opp som et viktig område for å oppnå bærekraftig utvikling (Meld. St. 28, 2012). Bygningsvern, med bevaring av kulturverdier som motiv, har mindre enn to hundre års historie i Norge. Før dette ble bygninger bevart så lenge boligeieren hadde interesse av det (SINTEF, 2010b). I dag finnes det langt flere grunner til å bevare boliger. I følge SINTEF (2010b) kan bevaringsverdiene samlet kalles kulturminneverdier. Innen kulturminnevernet har SINTEF (2005a) definert bygningsvern som et eget fagområde. Bygningsvern omfatter administrativ og praktisk vern av bygninger med kulturhistorisk eller praktisk verdi.

I forbindelse med bygningsvern er det i hovedsak tre ulike begreper som brukes. Det skilles mellom fredede, vernede og bevaringsverdige bygninger (SINTEF, 2010b). Omfanget av begrepene og hvilken lovgivning de er underlagt er presentert i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Tre begreper innen bygningsvern.

Begrep***	Omfang		Gjeldende lovgivning
	Bygning	Geografisk**	
Bevaringsverdig ^η	-	Lokalt	Ingen formell beskyttelse*
Vernet ^θ	Fasader og eksteriør	Regionalt og lokalt	PBL
Fredet ^ι	Fasader og interiør	Nasjonalt	Kulturminneloven

η) (SINTEF, 2010b)

θ) (Plan- og bygningsloven, 2008)

ι) (Kulturminneloven, 1978)

* Bevaringsverdig er en subjektiv karakteristikk og gir ingen formell beskyttelse. Den angir heller ikke hvilke vernetiltak som bør gjøres (SINTEF, 2010b).

** Geografisk viser til om boligen har lokal, regional og lokal eller nasjonal verneverdi.

*** Begrepet "bevaringsverdig" er definert på neste side.

Kulturminneloven

Kulturminneloven har som formål å verne kulturminner og kulturmiljøer både som en del av nasjonens kulturarv og som et ledd i en helhetlig miljø- og ressursforvaltning (Regjeringen, u.å.). Fredning er, som Tabell 2.1 viser, det sterkeste juridiske vernet en bygning kan få. Det er lovens § 15 (1) som åpner for fredning av bygninger. Loven sier at: "Departementet kan frede byggverk ... eller deler av dem av kulturhistorisk eller arkitektonisk verdi..." (Kulturminneloven, 1978). Loven gir også mulighet for å frede hele områder, der landskap og kulturminner danner et kulturmiljø (SINTEF, 2005a). Lovens § 15 a åpner for å gi dispensasjon fra vedtak om fredning og fredningsbestemmelser for tiltak som ikke medfører vesentlige inngrep i det fredete kulturminnet. For byggverk som er i ferd med å forfalle grunnet manglende vedlikehold kan eier få pålegg om å føre bygningen tilbake til tidligere stand. Dette fremgår av lovens § 17.

Forvaltning av bevaringsverdige bygninger

I Norge er det bred politisk vilje for å bevare fredede og vernede bygninger (St.meld nr. 16). Fredede og vernede bygninger omtales ofte som bevaringsverdige. Bevaringsverdige bygninger er av SINTEF (2010b) definert som: "en bygning der noen tillegger den så verdi at den bør bevares eller vernes ved fredning eller regulering".

I Stortingsmelding 16 fokuseres det blant annet på regjeringens ønske om at kulturarven skal få en større betydning som kulturell, sosial og økonomisk ressurs. I dette inngår også bygninger. For bygningsmassen argumenteres det for at det i et langsiktig samfunnsøkonomisk perspektiv kan være vesentlig mer lønnsomt å bevare deler av bygningsmassen fremfor å rive og bygge nytt (St.meld nr. 16).

Norge har gjennom forpliktelser i EUs energidirektiv og det nasjonale klimaforliket satt mål om å redusere energiforbruket i bygningsmassen. Arnstad et al. (2010) har undersøkt det tekniske potensiale for energireduksjon i Norges bygningsmasse. I rapporten argumenteres det for at en halvering av energiforbruket innen år 2040 er realistisk. For å nå målet understrekes det at det kreves et paradigmeskifte. "Det er ikke nok å skifte vinduer eller etterisolere loftet hvis energibruken skal halveres" (Arnstad et al., 2010). Et slik paradigmeskifte står i kontrast til den etablerte tanken bak bevaringsprinsippet (Evjenth et al., 2011).

Evjenth et al. (2011) har utarbeidet en rapport for Kommunal- og Regionaldepartementet (KRD) hvor den eksisterende bygningsmassen analyseres. I rapporten tas de bevaringsverdige bygningene opp som en utfordring i sammenheng med energioppgraderinger. For slike bygninger mener Evjenth et al. (2011) at oppfylling av dagens eller fremtidens energikrav ofte ikke er forenlig med hensyn til bygningsvern. Dispensasjonsmuligheten i PBLs § 31-2 blir derfor

ofte benyttet med begrunnelse om at imøtekommelse av energikravene medfører endringer i fasaden og dermed gå på bekostning av bevaringshensyn (Evjenth et al., 2011). Vekting mellom bevaringshensyn på en side og mål om energireduksjon på den andre siden, mener Evjenth et al. (2011) er en utfordring.

Johannesen og Stien (2011) undersøker oppgradering av en boligblokk oppført i 1879 med fredet eksteriør. Fredningen gjør at tiltak som etterisolering av ytterfasadene ikke er mulig, noe som gjør det utfordrende å nå nye energikrav. Etterisolering av ytterfasader omtales videre i kapittel 2.7.1 *Etterisolering av yttervegger*. Funnene til Johannesen og Stien (2011) indikerer at det, med tradisjonelle bygningsmaterialer, ikke er mulig å nå dagens energikrav for en boligblokk med fredet eksteriør. Johannesen og Stien (2011) mener derfor at en utbedring av teknisk tilstand og en energisatsing til en hvis grad bør kunne tillates på bekostning av bevaringsprinsippet.

2.1.5 Miljø

Miljø er den siste av de tre dimensjonene i bærekraftprinsippet. Miljøfokus fra myndighetene og samfunnet er stadig økende. Dette inkluderer også byggenæringen. Bevisstgjøringen har gjort at forbruket av driftsenergi og fossilt brensel i bransjen er minkende. Utviklingen har også synliggjort andre store "utslippsposter". Nå er det økende fokus på materialer og en helhetlig vurdering av byggets miljøpåvirkning som er på agendaen (Borvik, 2013). Dette underbygges av at byggenæringen i 2010 besluttet å innføre BREEAM som system for miljøklassifisering av bygg (NGBC, 2011). BREEAM er et anerkjent klassifiseringssystem og fokuserer på miljøpåvirkningene fra bygninger og materialer gjennom en vurdering av hele livsløpet (NGBC, 2013). Lavenergiutvalget (2009) understreker også hvor viktig det er å se på helheten av miljøpåvirkningene i et globalt perspektiv.

Bygningssertifisering

Parallelt med økt fokus på energireduksjon i bygningsmassen er det utviklet flere ulike bygningssertifiseringer med strengere krav enn dagens forskriftsnivå (Evjenth et al., 2011). Noen av de mest kjente er lavenergihus og passivhus. Dette er relevante konsepter for å nå myndighetenes mål om energireduksjon i boligmassen (Evjenth et al., 2011).

Begrepet passivhus kommer opprinnelig fra Tyskland. I Tyskland har det siden 80-tallet blitt bygget boliger med betydelig lavere energibehov enn myndighetenes krav (Enova, u.å.-b). Kriterier for passivhus og lavenergihus for boliger i Norge er definert i NS 3700:2013. Der beskrives passivhus som "miljøvennlige bygninger med meget høy kvalitet, godt inn klima og ekstremt lavt energibehov" (NS

3700:2013). Begrepet "passiv" har sin opprinnelse fra at det benyttes passive tiltak som bedre detaljløsninger, tykkere isolasjonslag og bedre isolerte vinduer. Dette til forskjell fra tiltak som installering av solfanger, solceller eller varmepumper. De er relatert til energiproduksjon og defineres "aktive" (Enova, u.å.-b). Et lavenergihus bygger på de samme prinsippene som passivhus, men er mindre energieffektivt. Tabell 2.2 viser typisk forbruk av driftsenergi for passivhus og lavenergibolig. Det er i tillegg presentert verdier for en typisk bolig bygget etter TEK10.

Tabell 2.2 Veiledende verdier for forbruk av driftsenergi og isolasjonstykkelser for passivhus og lavenergiboliger.

Type	Typisk energiforbruk*	Typisk isolasjonstykkelse		
		Vegg	Tak	Gulv
	<i>kWh/m²år</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
TEK10 ^y	120 - 145	0,25	0,30 - 0,35	0,20 - 0,30
Lavenergihus ^u	< 100	0,25 - 0,30	0,35 - 0,45	0,25 - 0,30
Passivhus	65 - 90 ^{v, w, x, z}	0,35 - 0,40 ^u	0,50 ^u	0,35 ^u

u) (Mørk et al., 2008)

v) (Arnstad et al., 2010)

w) (Meld. St. 28, 2012)

x) (Lavenergiutvalget, 2009)

y) (SINTEF, 2008)

z) (Klinski et al., 2012)

* Det eksisterer ikke en eksakt verdi for beregnet spesifikt energibruk for boliger. NS 3700 beregner krav til spesifikk energibruk ut i fra årsmiddeltemperatur og areal. Verdiene her er derfor bare veiledende.

Innemiljø og inneklima

Novakovic et al. (2007) mener at innemiljø og inneklima er to begreper som brukes om hverandre i dag. Forenklet sier Novakovic et al. (2007): "Innemiljø omfatter alt som omgir og påvirker oss, inkludert estetiske og psykososiale faktorer". Begrepet inneklima er derimot av Verdens Helseorganisasjon definert til kun å omfatte termisk, atmosfærisk, akustisk, aktinisk og mekanisk miljø. Inneklima er derfor mindre omfattende enn innemiljø (Novakovic et al., 2007).

Nasjonale og internasjonale føringer legger i dag opp til fokus på energibesparing. Det er etter initiativ fra myndighetene gjort flere utredninger med fokus på passivhus som fremtidige forskriftskrav (Arnstad et al., 2010; Evjenth et al., 2011; Kalhagen, 2011; Lassen et al., 2009). Passivhus er som nevnt bygninger med godt inneklima. Som forskriftskrav vil derfor passivhus kunne ha en positiv innvirkning på innemiljøet i fremtidige boliger.

Thomsen og Berge (2012) presenterer i rapporten "Inneklima i energieffektive bygninger" spørsmålet om det ensidige fokuset på energibesparing og endring i byggemåte kan ha en negativ effekt på inneklimaet og beboernes helse. Dagens

forskrifters krav til luftkvalitet har medført at de aller fleste nye boliger har balansert ventilasjon. I rapporten trekkes det blant annet frem hvorvidt luftskiftet i moderne lufttette hus er godt nok i forhold til å fjerne fukt, gasser, partikler og mikroorganismer. Også problemer med fukt i konstruksjonen og overoppheting av romluften i sommermånedene trekkes frem. Novakovic et al. (2007) tar opp samme problemstilling og påpeker at:

Ingeniører og økonomer som planlegger og utvikler bygninger, har en oppsiktsvekkende mangel på kunnskaper om de negative helse- og komforteffekter som eksisterer i dagens bygningsmasse (Novakovic et al., 2007).

Novakovic et al. (2007) og Thomsen og Berge (2012) sine bekymringer underbygger hvor viktig det er å fokusere på innemiljø ved gjennomføring av tiltak på eksisterende bygninger. Lavenergiutvalget (2009) påpeker også at det er helheten av tiltaket som skal være lønnsomt. Med helhetlig lønnsomt trekker de spesielt frem inneklime og økt verdi som viktige fokusområder.

Gjenbruk

En stor del av avfallet fra nybygg, rehabilitering og rivning har et gjenbrukspotensiale. Dette avfallet er derfor å anse som en verdifull ressurs. Gjenbruk er i følge Rognlien et al. (2002) en fellesbetegnelse for ombruk og materialgjenvinning. Målet med avfallshåndteringen i Norge er at den skal baseres på et samfunnsøkonomisk og miljømessig grunnlag. På bakgrunn av dette anbefaler Rognlien et al. (2002) følgende liste for behandling av produksjonsavfall:

1. ombruk
2. direkte materialgjenvinning
3. indirekte materialgjenvinning
4. energiutnyttelse
5. deponering

Evjenth et al. (2011) viser også til at gjenbruk er et effektivt virkemiddel for å minimere utslippene. Ombruk medfører at materialet får en lav bundet energi, fordi den bundne energien allerede er "avskrevet." Bundet energi er beskrevet utfyllende i kapittel 2.3.1 *Bundet energi*.

2.2 Boligmassen

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er det presentert fire forskningsspørsmål. Det første forskningsspørsmålet handler om hvordan den eksisterende boligmassen er bygget opp og energiforbruket i boligmassen. I kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* presenteres en metode for modellering av energiforbruket i boligmassen. Metoden som presenteres heter bottom-up og energiforbruket i boligmassen modelleres basert på fysiske og tekniske data om boligmassen. I de kommende kapitlene presenteres fysiske og tekniske data om boligmassen. Kapitlets første del gir en innføring i hvordan boligmassen deles inn etter boligtype og alder. Den andre delen presenterer informasjon om boligmassens fysiske og tekniske data.

Den norske bygningsmassen er spredd over hele landet og det finnes i dag over fire millioner bygninger i Norge (SSB, 2013b). Rundt 60 % av bygningene er boliger. Av Statistisk sentralbyrå (SSB) er en bolig definert som:

En boenhet som består av ett eller flere rom, er bygd eller ombyggt som helårs privatbolig for en eller flere personer, og har egen adkomst uten at man må gå gjennom en annen bolig. (SSB, 2013a)

2.2.1 Boligtyper

I Norge deles boligmassen inn etter boligens bygningstype. Bygningstypen gir en god indikasjon på både størrelse og hvilke hovedkomponenter boligen består av. Både størrelse og hovedkomponenter setter premisser for energibruk og boligens oppgraderingspotensial (Myhre, 1995).

Boligmassen deles gjerne inn i tre hovedgrupper: eneboliger, småhus og boligblokker (Mjønes et al., 2012; Myhre, 1995; Myhre, 2000; Pauliuk et al., 2013; Thyholt et al., 2009). Ljones et al. (1990) bruker de samme tre kategoriene i sin rapport, i tillegg inkluderes våningshus som en fjerde. Myhre (1995) argumenterer for at våningshus og eneboliger har like egenskaper og at de derfor kan kategoriseres sammen. Inndelingen er senere brukt av blant annet SSB (2011b). Definisjoner for de tre hovedtypene av boliger er vist i Tabell 2.3.

Tabell 2.3 Definisjoner av de tre hovedgruppene av boligbygninger (Standard Norge, 2013).

Hovedgruppe	Definisjon
Eneboliger	Frittliggende boliger, villa, inkludert våningshus på gårdsbruk.
Småhus unntatt enebolig	Frittliggende og sammenbygde boligbygninger med inntil tre etasjer i henhold til PBL.
Boligblokker	Boligbygning med mer enn fire boenheter.

2.2.2 Boligmassens historiske utvikling

Innenfor de tre boligkategoriene, presentert i Tabell 2.3, finnes det ulike utforminger av boligene. Boligene kan ha ulik geometri og ulike termiske egenskaper. Myhre (1995) mener at en finere inndeling med hensyn på byggeår gir boliger med tilnærmet like egenskaper innen samme kategori.

Tabell 2.4 viser en inndeling av boliger etter byggeår. Inndeling av boligmassen etter byggeår er brukt av flere forfattere og dette vises i Tabell 2.4. Myhre (1995) var tidlig ute med å dele inn boligmassen etter byggeår og Mjønes et al. (2012) har basert seg på tilsvarende inndeling. Pauliuk et al. (2013) har på sin side gjort enkelte endringer i forhold til Myhre (1995), mens SSB (2013c) bruker en egen inndeling.

Tabell 2.4 Ulike forfatters inndeling av bygningsmassen etter byggeår.

Mjønes ^b /Myhre ^a *	Tyholt ^c	Pauliuk ^d	SSB ^æ
> 1956	> 1945	> 1950	**1946 - 1960
1956 - 1970	1946 - 1970	1951 - 1970	1961 - 1970
1971 - 1980	1981 - 1990	1971 - 1980	1971 - 1980
1981 - 1990	1990 - 2005	1981 - 1995	1981 - 1990
1991 - 2000		1995 - 2010	1991 - 2000

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

d) (Pauliuk et al., 2013)

æ) (SSB, 2013c)

* Mjønes baserer seg på Myhres inndeling. Siden Myhres stopper i 1990, har Mjønes har lagt til to egne kategorier.

** SSB har flere kategorier før 1946. Det er ikke valgt å vise de her da de er ansett som mindre relevante.

Myhre (1995) trekker frem fire grunner til at det er gunstig å dele inn boligmassen etter byggeår. Den første grunnen er at bygningspraksisen kan endres ved introduksjon av nye bygningsmaterialer eller teknikker. Den andre grunnen er at utformingen av boliger har vært påvirket av restriksjoner gitt av Husbanken. Den tredje grunnen Myhre (1995) trekker frem er at endringer i bygningslovgivning gir en viss påvirkning på utformingen av boliger. Den fjerde og siste grunnen er at designet påvirkes av viktige økonomiske parametere som strømpriser og markedsinteresse.

Introduksjon og utvikling av mineralull

Produksjonen av mineralull i Norge startet i 1935 (GLAVA, 2014). I starten var produktet dyrt og produksjonen omfattende. En gradvis produktforbedring gjorde at bruken av mineralull økte. Produktforbedringene gjorde at det tidlig på 50-tallet ble ansett som mer lønnsomt å isolere med mineralull enn tradisjonelle

isolasjonsmaterialer som leire eller sagflis (Granum & Lundby, 1952). Dette støttes blant annet av Norges byggforskningsinstitutt (NBI) anv. 7 (1958) som anbefalte lettvegg av bindingsverk, med 10 cm mineralull, som billigste veggtype i 1958.

Etter andre verdenskrig hadde Norge et stort behov for å gjenreise ødelagte boliger. Kombinert med de store fødselskullene fra 1920-tallet gjorde dette at behovet for nye boliger ble anslått til å være over 100 000 (Granum & Larsen, 1989; Martens, 1993). Allikevel ble det, av utenriksøkonomiske hensyn, eksportert store mengder tømmer ut av landet. Dette førte til materialrasjonering av tømmer og byggeløyveordninger for boliger (Granum & Larsen, 1989).

Kombinasjonen av stort behov for nye boliger og lav tilgang på tømmer ga bindingsverkskonstruksjoner en fordel fremfor tradisjonelle byggemåter. En bindingsverksvegg isolert med mineralull inneholder betydelig mindre treverk og fikk da en stor prisfordel. I 1953 ble rasjoneringen av tømmer opphevet. Det ga tradisjonelle byggemåter, som lafting, et løft. Denne tendensen vises i Tabell 2.5. Tabellen viser også en nedgang i antall hus finansiert av Husbanken fra 1952 til 1954. En slik utvikling var ikke ønskelig fra myndighetenes side og det ble innført tiltak fra Husbanken mot slutten av 50-tallet.

Tabell 2.5 Totalt antall bygde bygninger og prosentvis hvor mange av bygningene som var finansiert av Husbanken med mer enn 100 mm i ytterveggene. Etter Myhre (1995).

Kategori	År						
	1952	1954	1956	1959	1960	1961	1964
Totalt antall boliger ferdigstilt	32 700	35 400	27 300	26 600	26 800	28 300	28 500
Trehus finansiert av Husbanken, bygget med mineralull i veggene	23 %	13 %	27 %	84 %	91%	96 %	99,6 %

Husbanken

Husbanken ble opprettet i 1946 med formål om å støttet oppunder den offentlige boligpolitikken. Formålet ble definert som: "alle skal bo i en sosialt forsvarlig bolig, med en sosialt forsvarlig leie" (Reiersen et al., 1996). Dette skulle gjøres gjennom å regulere ressurstilgangen og kvalitetsnivået til boligsektoren. Husbanken ble med det statens viktigste boligpolitiske redskap (Martens, 1993).

Da rasjoneringen av tømmer ble opphevet i 1953 innførte Husbanken mulighet for økt lån for boliger med bedre isolerte vegger enn tradisjonelle byggemåter. Tabell 2.5 viser en økning i antall hus med mineralull i veggene, finansiert av

Husbanken, fra 1956 til 1959. Granum og Larsen (1989) mener det i stor grad skyldes låneordningen som Husbanken innførte.

Siden oppstarten i 1946 har Husbanken finansiert godt over en million boliger (Ruden & Nystad, 2006). Hus bygget av den mer velstående delen av befolkningen er som regel ikke finansiert av Husbanken. Det er derfor rimelig å forvente at disse husene har en høyere standard med tanke på termiske egenskaper. Dette til tross for at noen hus er bygget med betong eller mur i ytterveggene (Myhre, 1995). På grunnlag av dette argumenterer Myhre (1995) med at det er sannsynlig at hus bygget i privat regi i etterkrigstiden ikke har dårligere termiske egenskaper enn de som ble finansiert av Husbanken.

Lover og forskrifter

"Lov om bygningsvesenet av 1924" var Norges første bygningslov. Den fikk sin første forskrift i 1928 og en oppdatert versjon i 1949. Loven gjaldt kun for byene og tettbygde strøk (SINTEF, 1998). Den første bygningsloven som gjaldt for hele landet var Bygningslover (1969). En oversikt over byggeforskrifter i Norge er presentert i Tabell 2.6.

Tabell 2.6 Oversikt over relevante byggeforskrifter i Norge (Weydahl, 2011).

År	Navn på forskrift
1928	Forskrifter om materialer og konstruksjoner m.m. (1928)
1949	Byggeforskrifter (1949)
1969	Byggeforskrifter (1969)
1985	Byggeforskrift 1985
1987	Byggeforskrift 1987
1997	Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK 97)
2007	Forskrift om endring i forskrift om krav til byggverk og produkter (TEK 07)
2010	Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK 10)

Den første byggeforskriften kom alt i 1928, men inneholdt ikke krav om varmeisolasjon. Det kom først i Byggeforskrift av 1949 (Weydahl, 2011). Byggeforskrifter (1949) og (1969) lå etter den generelle utviklingen i byggeskikker. Dette gjaldt særlig krav til varmemotstand i bygningsdeler (Granum & Larsen, 1989). Da Husbanken innførte premieringsordning, i form av økt lån for hus med god varmeisolerings, var kravet til U-verdi for yttervegger, skråtak og loftsbjelkelag satt til $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Granum & Larsen, 1989). Som Tabell 2.7 viser var dette høyere krav enn kravene i Byggeforskrifter (1969), som kom 12 år senere. Byggeforskrifter (1945) og (1969) ansees derfor å ha hatt liten innvirkning

på isolasjonsmengden i nye bygninger på den tiden (Myhre, 1995). U-verdi er beskrevet utfyllende i kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer*.

Tabell 2.7 U-verdikrav etter byggeforskrifter gjennom historien.

Bygningsdel	U-verdikrav (W/m^2K) gitt i historiske forskrifter*						
	Forskr. 1949 ^x	Forskr. 1969 ^x	Forskr. 1985 ^x	Forskr. 1987 ^x	Forskr. 1997 ^x	Forskr. 2007 ^λ	Forskr. 2010 ^μ
Vegg	0,93 - 1,16	0,58 - 1,28	0,25 - 0,45	0,30	0,22	0,18	0,18
Tak	0,93	0,46 - 0,58	0,23	0,20	0,15	0,13	0,13
Golv	-	0,46	0,23 - 0,30	0,20 - 0,30	0,15	0,15	0,15
Vinduer	-	-	2,10 - 2,70	2,40	1,60	1,20	1,20

x) (Weydahl, 2011)

λ) (TEK07, 2007)

μ) (TEK10, 2010)

* Forskrifter er i tabellen forkortet med forskr.

I 1980 kom det innstramminger i de gamle byggeforskriftene med hensyn på varmemotstanden til bygningsdeler. Endringene ble effektive fra 1983 (Byggeforskrift 1969, 1983). Denne trenden ble raskt tatt opp av byggebransjen og 150 mm isolerte bindingsverksvegger og 200 mm mineralull i taket ble etterhvert standard i hele landet (Myhre, 1995). I 1997 ble det innført en ny forskrift som innebar en ytterligere økning i kravene til bygningers varmemotstand. Dette er vist i Tabell 2.7.

Energipriser

I Norge har det historisk sett vært rikelig tilgang på billig strøm. Spesielt fra 1960- og 1970-årene (Hille et al., 2011). Fra første "oljekrise" i 1973 - 74, til og med den neste i 1979 - 81, steg realprisen på olje med omtrent 200 % og parafin med omtrent 130 %. På samme tid steg realprisen på strøm med 25 % (Barlett, 1993). De økte energiprisene gjorde det mer lønnsomt å øke isolasjonsmengden i nye boliger. Økt fokus på energipriser ga også ekstra motivasjon for byggmestere til å øke isolasjonsmengden i husene de bygde. På bakgrunn av dette mener Myhre (1995) at det er grunn til å tro at energipriser har påvirket isolasjonsmengdene i nybygde hus rundt år 1980. Dette støttes også av Hille et al. (2011) som mener at høyere energipriser kan øke tilbøyeligheten for å oppgradere boligens klimaskall.

2.2.3 Antall boliger

I Norge har Statens kartverk ansvaret for registrering av boliger. Statens Kartverk registrerer boliger i Matrikkelen, som er Norges offisielle eiendomsregister (Kartverket, 2012). Den ble etablert i dagens form som et resultat av Boligadresseprosjektet og innført i perioden 2006 - 2007 (Bjørnsgard & Eide,

2008; Prop. 1 L ; SSB, 2013a). Boligadresseprosjektet ble til som et samarbeidsprosjekt mellom Statens kartverk, SSB og Skattedirektoratet i perioden 2000 – 2001 (Bing, 2003; SSB, 2013a). Prosjektets formål var å oppdatere det eksisterende boligregisteret (GAB-registeret) med informasjon om antall boenheter i hver boligbygning. GAB-registeret inneholdt, inntil Boligadresseprosjektet, i stor grad kun informasjon om antall bygninger i Norge (Bjørnsgard & Eide, 2008; SSB, 2013a).

I følge Myhre (1995) var det i årene før Boligadresseprosjektet nødvendig å supplere GAB-registeret med spørreundersøkelser for å estimere antall boenheter i Norge. I følge Myhre (1995) medførte dette usikkerhet rundt boligantallet. Sartori et al. (2009) og Bjørnsgard og Eide (2008) er av samme oppfatning og påpeker at GAB-registeret i sin tid var utdatert.

Boligadresseprosjektet medførte en vesentlig forbedring av boligregisteret i Norge, men SSB (2013a) mener at Matrikkelen fortsatt ikke er komplett. Mye tyder på at det fortsatt finnes enkelte boligadresser med flere boenheter i Matrikkelen (SSB, 2013a). På den andre siden menes det i Prop. 1 L (2009) at Matrikkelen, slik den er i dag, er et velfungerende boligregister. Statistisk sentralbyrå publiserer jevnlig boligstatistikker som er basert på data fra Matrikkelen. Disse boligstatistikkene kalles Folke- og boligtellinger og den nyeste ble publisert i 2011 (Bjørnsgard & Eide, 2008; SSB, 2011b). I denne statistikken har SSB justert for de manglene som finnes i Matrikkelen (SSB, 2011b)

Med Boligadresseprosjektet ble det også gjennomført en omfattende kartlegging og registrering av boligers byggeår og bygningstype (SSB, 2013a). Tabell 2.8 viser en oversikt over antall boliger i Norge sortert etter byggeår og boligtype. Det kommer frem av tabellen at det totale antallet boliger i Norge per 19. november 2011 er 2 415 859 (SSB, 2013c). Dette tallet dekker både det SSB kaller *bebodde boliger* og *ubebodde boliger*. Bebodde boliger er boliger hvor minst en person er folkerregistrert på boligadressen (SSB, 2011b). Studentboliger og pendlerboliger går derimot under kategorien ubebodde boliger. Dette fordi personer sjeldent er folkerregistrert på disse boligene. Ubebodde boliger omfatter også boliger som er fraflyttet (SSB, 2011b).

2.2 Boligmassen

Tabell 2.8 Beboede og ubebodde boliger per november 2011. Basert på SSBs Folke- og bolig telling 2011 (SSB, 2013c).

Byggeår*	Antall*	Andel av boligmassen
Enebolig		
Før 1956	313 800	13 %
1956 - 1980	438 107	18 %
1980 - 1999	298 810	12 %
Etter 1999	117 487	5 %
Uoppgitt	105 357	4 %
Småhus		
Før 1956	123 669	5 %
1956 - 1980	154 775	6 %
1980 - 1999	119 492	5 %
Etter 1999	78 340	3 %
Uoppgitt	19 309	1 %
Boligblokk		
Før 1956	151 684	6 %
1956 - 1980	182 831	8 %
1980 - 1999	85 030	4 %
Etter 1999	111 281	5 %
Uoppgitt	4 650	0 %
Annen bygningstype		
Før 1956	19 270	1 %
1956 - 1980	18 437	1 %
1980 - 1999	31 950	1 %
Etter 1999	25 872	1 %
Uoppgitt	15 709	1 %
Totalt	2 415 859	100 %

* Kategoriseringen av boliger etter byggeår er basert på inndeling presentert i kapittel 4.2.1 *Oppbygning og forbruk av driftsenergi*. Inndelingen medfører enkelte justeringer av antall boliger i hver kategori.

I tillegg til bygningstypene enebolig, småhus og boligblokk er det i Tabell 2.8 gitt en kategori for *annen bygningstype*. I denne kategorien inngår bygning for bofellesskap, bo- og servicesenter og studentbyer (SSB, 2011b; SSB, 2013a).

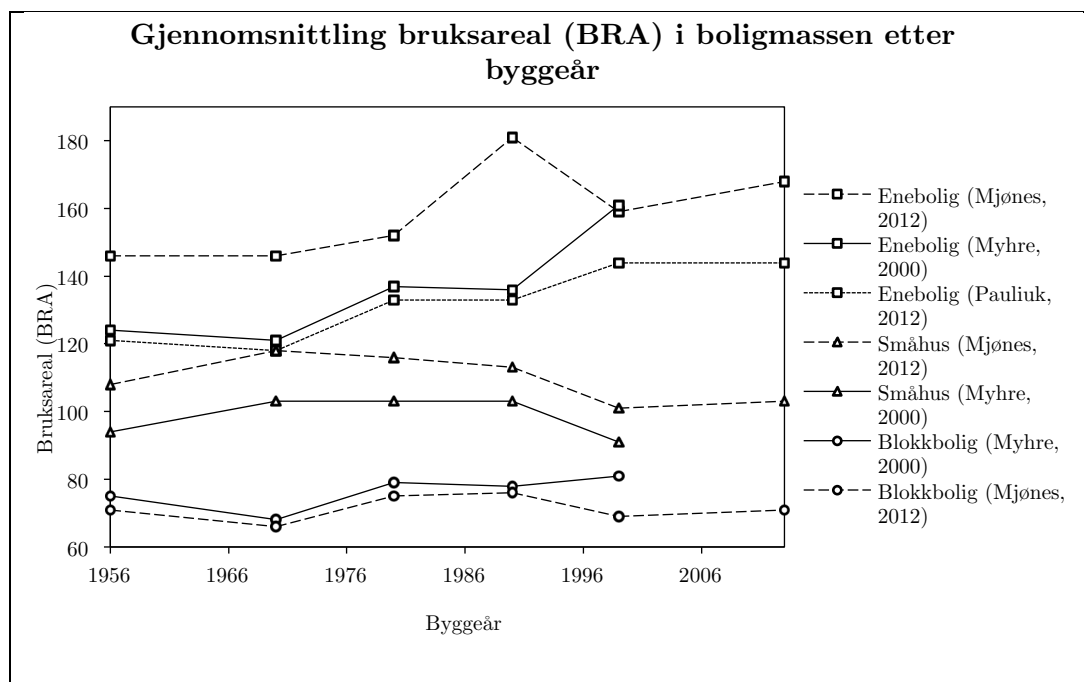
2.2.4 Boligmassens areal

Før Boligadresseprosjektet fantes det ikke et komplett register for boligareal i Norge (Bjørnsgard & Eide, 2008; Sartori et al., 2009). Det var på den tiden, i følge Myhre (1995), nødvendig med spørreundersøkelser for å fastsette boligmassens areal. Boligadresseprosjektet innførte individuelle adresser til alle boliger i Norge. Dette gjorde det mulig å tilordne informasjon om den aktuelle

boligen på hver adresse. Ved hjelp av Skatteetatens sentrale eiendomsregister (SERG), som inneholder informasjon for vurdering av boligens likningsverdi, ble det mulig å tilordne informasjon om boligens størrelse og areal i Matrikkelen (Prop. 1 L 2009). Basert på denne informasjonen mener SSB (2011a) at det gjennomsnittlige boligarealet i Norge er 120 m². Dette støttes blant annet av Bergsdal et al. (2007).

For å fastsette gjennomsnittlig boligareal benytter Myhre (2000) GAB-registeret supplert med SSBs "Boforholdsundersøkelse 1988". Myhre (2000) sorterer gjennomsnittlig boligareal etter boligtype og boligens byggeår. Undersøkelsen til Myhre (2000) er basert på intervjuer. Skancke og Haraldsen (1990) mener at "Boforholdsundersøkelse 1988" inneholder enkelte skjevheter grunnet en høy andel ikke-besvarere.

Figur 2.1 viser hva henholdsvis Myhre (2000), Pauliuk et al. (2013) og Mjønes et al. (2012) anslår som gjennomsnittlig bruksareal i Norges boligmassen, fordelt etter boligens byggeår.



Figur 2.1 Gjennomsnittlig bruksareal i boligmassen etter byggeår.

Figur 2.1 viser gjennomsnittlig bruksareal (BRA) etter byggeår fra Myhre (2000). Disse tallene er i stor grad basert på Myhre (1995). Pauliuk et al. (2013) baserer seg også på Myhre (1995) for boliger bygget før 1990. For boliger bygget etter 1990 har Pauliuk et al. (2013) basert seg på tall fra Thyholt et al. (2009).

Mjønes et al. (2012) benytter seg av statistikker fra SSB for å beregne gjennomsnittlig BRA for boliger. Statistikkene fra SSB er basert på Matrikkelen og SERG-registeret (SSB, 2011b).

2.2.5 Bygningsgeometri og utforming

Bygningskroppens utforming og geometri er sentral ved beregning av boligers energiforbruk i følge Myhre (1995). Bygninger med flere etasjer har relativt sett et lavere spesifikt energiforbruk enn bygninger med færre etasjer. Både oppvarmede og uoppvarmede loft og kjeller er med på å bestemme energiforbruket til en bolig. Myhre (1995) mener at slike parametere, som andel oppvarmet og uoppvarmet loft og kjeller, må bestemmes ved vurdering av boligers driftsenergi.

I følge Myhre (1995) har mange av boligene i Norge kjellere og loft som i stor grad kan regnes å være uoppvarmede. Sett bort i fra nyere boligblokker, som ofte har flatt tak, har boligene i Norge ofte et oppvarmet loft. Slike uoppvarmede soner som kjeller og loft regnes ikke som en del av boligens BRA, men bidrar til mindre varmetap gjennom bygningens skall (Mjønes et al., 2012; Novakovic et al., 2007). Tabell 1.1 i vedlegg 1 viser Mjønes et al. (2012) sin inndeling av oppvarmede og uoppvarmedes soner i boliger etter boligens byggeår.

Både Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) har definert boligbygningers grunnflate basert på kvalifisert gjetning. Tabell 1.2 i Vedlegg 1 viser hvordan de respektive forfatterne anslår grunnflatens geometri etter boligens byggeår.

Når det gjelder antall etasjer, etasjehøyde og antall boenheter i hver boligbygning er Myhre (1995), Mjønes et al. (2012) og Thyholt et al. (2009) relativt enige. Verdiene er presentert i Tabell 2.9.

Tabell 2.9 Geometriske egenskaper for boligene.

Kategori	Geometri		
	Etasjer	Etasjehøyde	Antall boenheter
	<i>antall</i>	<i>m</i>	<i>antall</i>
Enebolig ^{a, b, c}	1,5 - 2	2,4 - 2,8	1
Småhus ^{a, b, c}	2	2,4 - 2,8	2
Boligblokk ^{a, b, c}	4	2,4 - 2,8	8 - 24

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

Vinduenes plassering i forhold til himmelretning er nødvendig å definere ved beregning av boligers driftsenergi (Novakovic et al., 2007). Et sydlig vendt vindu bidrar til økt oppvarming i løpet av oppvarmings sesongen, men også til økt

kjølebehov om sommeren. For boliger er gjerne gevinsten av oppvarmingsbidraget det viktigste å ta hensyn til (Novakovic et al., 2007). Både Myhre (1995; 2000), og Mjønes et al. (2012) har beskrevet retningen på vinduer etter boligens byggeår. For eneboliger er opp mot 70 % av vinduene plassert mot sør og vest. For boligblokker er rundt 60 % av vinduene mot sør, mens resten er mot nord. I følge Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) er det stort sett ikke vinduer mot øst og vest i boligblokker. Tabell 1.3 i Vedlegg 1 viser boligmassens vindusfordeling etter byggeår.

2.2.6 Oppgraderte boliger

Mange av de eldre boligene er opprinnelig bygget uten bruk av isolasjonsmaterialer. Som nevnt i kapittel 2.2.2 *Boligmassens historiske utvikling* ble mineralull først introdusert på 50-tallet og i perioden frem til omtrent 1970 ble det brukt lave isolasjonstykkelser i boliger (Myhre, 1995). I nyere tid har flere av de eldre boligene blitt oppgradert med større isolasjonstykkelser og bedre vinduer. I følge Myhre (1995) er det i stor grad vegger, tak, gulv og vinduer som har blitt oppgradert på boliger. Pauliuk et al. (2013) mener i tillegg at flere av de nye boligene har fått installert varmepumpe og definerer dette som en oppgradering. Tabell 2.10 viser andelen av boligmassen som Myhre (1995), Thyholt et al. (2009), Mjønes et al. (2012) og Pauliuk et al. (2013) mener har gjennomført oppgraderinger.

Tabell 2.10 Andel oppgraderte boliger i hver enkelt boligkategori.

Byggeår	Oppgraderte boliger		
	Mjønes ^b Andel oppgradert	Thyholt ^c og Myhre ^a Andel oppgradert	Pauliuk ^d * Andel oppgradert
Enebolig			
Før 1956	91 %	90 % ^a	75 %
1956 - 1970	76 %	80 % ^c	30 %
1970 - 1980	39 %	30 % ^c	0 %
1980 - 1990	17 %	0 % ^c	0 %
1990 - 1999	5 %	0 % ^c	50 %
Etter 1999	0 %	-	50 %
Småhus			
Før 1956	86 %	90 % ^a	48 %
1956 - 1970	78 %	80 % ^c	30 %
1970 - 1980	61 %	30 % ^c	0 %
1980 - 1990	9 %	0 % ^c	0 %
1990 - 1999	3 %	0 % ^c	50 %
Etter 1999	0 %	-	50 %
Boligblokk			
Før 1956	84 %	80 % ^a	44 %
1956 - 1970	75 %	50 % ^c	25 %
1970 - 1980	71 %	0 % ^c	0 %
1980 - 1990	9 %	0 % ^c	0 %
1990 - 1999	3 %	0 % ^c	50 %
Etter 1999	0 %	-	50 %

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

d) (Pauliuk et al., 2013)

* Verdiene til Pauliuk et al. (2013) er justert for å passe til inndelingen brukt i tabellen.

Pauliuk et al. (2013) baserer sine estimater for oppgradering på tall fra Thyholt et al. (2009), som igjen baserer sine tall på Myhre (1995). Pauliuk et al. (2013) har gjort enkelte endringer på sin fremstilling i forhold til de to overnevnte forfatterne. Andelen oppgraderte boliger definerer Pauliuk et al. (2013) som boliger som har gjennomført større oppgraderinger. Boliger med etterisolert tak, gulv og nye vinduer regnes derfor ikke som oppgraderte av Pauliuk et al. (2013).

Myhre (1995) baserer hovedsakelig sine tall på tre kilder. Den første er en undersøkelse gjennomført av Statistisk sentralbyrå i 1990, den andre er tall hentet fra isolasjonsprodusenten Rockwool AS og den siste er tall hentet fra Trondheim og omegn boligbyggerlag (TOBB). Tabell 2.11 viser hvilke oppgraderingstiltak Myhre (1995) og Thyholt et al. (2009) mener har blitt gjennomført.

Mjønes et al. (2012) bruker på sin side tall fra Prognosesenteret sine landsdekkende undersøkelser om oppgraderingsarbeider i den norske boligmassen. Tallene er i tillegg kvalitetssikret mot reelle statistikker for kjøp av oppgraderingsmaterialer. Tabell 2.11 viser hvilke oppgraderingstiltak Mjønes et al. (2012) mener har blitt gjennomført.

Tabell 2.11 Andel oppgraderte tiltak i hver boligkategori.

Byggeår*	Bygningsdel oppgradert					
	Mjønes ^b			Thyholt ^c og Myhre ^a		
	Vinduer	Vegger	Tak/ gulv	Vinduer	Vegger	Tak/ gulv
Enebolig						
Før 1956	74 %	64 %	55 %	0 % ^c *	88 % ^a	94 % ^a
1956 - 1970	64 %	32 %	44 %	0 % ^c *	40 % ^a	100 % ^a
1970 - 1980	35 %	6 %	20 %	100 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1980 - 1990	12 %	3 %	14 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1990 - 1999	4 %	3 %	2 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
Etter 1999	0 %	0 %	0 %	-	-	-
Småhus						
Før 1956	71 %	60 %	45 %	0 % ^c *	88 % ^a	94 % ^a
1956 - 1970	68 %	30 %	38 %	0 % ^c *	40 % ^a	100 % ^a
1970 - 1980	56 %	12 %	20 %	100 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1980 - 1990	5 %	0 %	8 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1990 - 1999	3 %	0 %	0 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
Etter 1999	0 %	0 %	0 %	-	-	-
Boligblokk						
Før 1956	73 %	43 %	35 %	0 % ^c *	38 % ^a	100 % ^a
1956 - 1970	66 %	37 %	29 %	0 % ^c *	100 % ^a	100 % ^a
1970 - 1980	67 %	24 %	6 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1980 - 1990	7 %	5 %	6 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
1990 - 1999	3 %	3 %	0 %	0 % ^c	0 % ^c	0 % ^c
Etter 1999	0 %	0 %	0 %	-	-	-

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

* Thyholt et al. (2009) baserer sine verdier i stor grad på Myhre (1995). I sitt arbeid har Thyholt et al. (2009) muligens tolket Myhre (1995) feil, da Myhre (1995) definerer vindusoppgraderinger som en del av veggen.

2.2.7 U-verdi og kuldebroer

Boligers termiske egenskaper kan beskrives med en varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi). U-verdien forteller hvor mye energi som går gjennom klimaskallet per arealenhet. Det er nødvendig å bestemme denne koeffisienten ved beregning av driftsenergien til en bolig (Novakovic et al., 2007).

For å definere boligmassens U-verdi benytter Myhre (1995) seg av litteratur om eldre byggeskikker hentet fra NBI. Myhre (1995) konkluderer med at eneboliger og småhus ofte er bygget etter de samme byggetekniske prinsippene. U-verdien er derfor historisk sett ofte lik mellom disse byggene. Myhre (1995) mener at både eneboliger og småhus er bygget med bindingsverk av tre, mens boligblokker kan være bygget av både tegl, betong og tre. Myhre (1995) mener videre at eldre

boligblokker i større grad er bygget med tegl eller betong. Isolasjonsmaterialet i disse blokkene er porebetong eller trykkfast mineralull. Boligblokker av nyere type er, i følge Myhre (1995), bygget med bindingsverksvegger. Både Mjønes et al. (2012) og Thyholt et al. (2009) støtter Myhre (1995) sine vurderinger av boligmassens termiske egenskaper. Tabell 2.12 viser boligmassens varme-gjennomgangskoeffisient basert på Myhre (1995), Mjønes et al. (2012) og Thyholt et al. (2009).

Tabell 2.12 U-verdi for vegger, gulv, tak og vinduer etter byggeår og bygningstype.

Byggeår*	U-verdi (W/m ² K) (original/ oppgradert)			
	Vegger	Gulv	Tak	Vinduer
Enebolig				
Før 1956	0,90 ^a / 0,40 ^a	0,69 ^a / 0,34 ^a	0,60 ^a / 0,30 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1956 - 1970	0,40 ^a / 0,30 ^a	0,27 ^a / 0,17 ^a	0,36 ^a / 0,20 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1970 - 1980	0,38 ^a / 0,29 ^b	0,36 ^a / -	0,20 ^a / 0,16 ^b	2,80 ^a / 2,00 ^c
1980 - 1990	0,26 ^a / 0,22 ^b	0,15 ^a / -	0,18 ^a / 0,16 ^b	2,00 ^a / -
1990 - 1999	0,26 ^c / 0,21 ^b	0,20 ^c / -	0,18 ^c / 0,15 ^b	1,80 ^c / -
Etter 1999	0,21 ^b / -	0,15 ^b / -	0,14 ^b / -	1,60 ^b / -
Småhus				
Før 1956	0,90 ^a / 0,40 ^a	0,66 ^a / 0,33 ^a	0,60 ^a / 0,30 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1956 - 1970	0,40 ^a / 0,30 ^a	0,26 ^a / 0,17 ^a	0,36 ^a / 0,20 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1970 - 1980	0,38 ^a / 0,29 ^b	0,20 ^a / 0,18 ^b	0,20 ^a / 0,16 ^b	2,80 ^a / 2,00 ^c
1980 - 1990	0,26 ^a / 0,22 ^b	0,15 ^a / -	0,18 ^a / 0,16 ^b	2,00 ^a / -
1990 - 1999	0,26 ^c / 0,21 ^b	0,17 ^c / -	0,18 ^c / 0,15 ^b	1,80 ^c / -
Etter 1999	0,21 ^b / -	0,15 ^b / -	0,14 ^b / -	1,60 ^b / -
Boligblokk				
Før 1956	1,00 ^a / 0,40 ^a	0,47 ^a / 0,28 ^a	0,60 ^a / 0,30 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1956 - 1970	0,80 ^a / 0,35 ^a	0,38 ^a / 0,25 ^a	0,32 ^a / 0,18 ^a	2,80 ^a / 2,00 ^a
1970 - 1980	0,49 ^a / 0,18 ^b	0,24 ^a / 0,21 ^b	0,20 ^a / 0,14 ^b	2,60 ^b / 2,00 ^c
1980 - 1990	0,35 ^a / 0,29 ^b	0,20 ^b / 0,17 ^a	0,20 ^a / -	2,20 ^b / 2,00 ^a
1990 - 1999	0,29 ^b / 0,26 ^c	0,27 ^b / 0,20 ^c	0,27 ^b / 0,18 ^c	2,00 ^b / 1,80 ^c
Etter 1999	0,27 ^b / -	0,14 ^b / -	0,14 ^b / -	1,60 ^b / -

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

* Verdiene i tabellen er presentert etter Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) sin kategorisering av boliger etter byggeår.

Når det gjelder kuldebroer anbefaler Mjønes et al. (2012) at det blir benyttet standardiserte verdier. Standard Norge (2007) definerer normalisert kuldebroverdi for bygninger av tre til 0,05 W/(m²K), og 0,09 W/(m²K) og 0,12 W/(m²K) for bygninger av betong med henholdsvis ti og fem centimeter kuldebrobryter.

Novakovic et al. (2007) mener at kuldebroer er vanskelige å definere og avgrense. Kuldebroer har stor påvirkning på boligens U-verdi og kan ved uheldige tilfeller bidra til at U-verdien dobles. Det kan også føre til problemer med fukt grunnet kondens. Dette problemet er størst for betongkonstruksjoner.

2.2.8 Lekkasjetall og ventilasjon

I følge Myhre (1995) står ventilasjon og luftutskiftning gjennom bygningskonstruksjonen for omtrent en tredjedel av varmetapet i en enebolig. Luftutskiftning i en bolig kan grovt deles i to: infiltrasjonstap og ventilasjon. Infiltrasjonstap skyldes utettheter i konstruksjonen. Det fører til at luft drives gjennom konstruksjonen på grunn av trykkforskjell mellom inne- og uteluften (Novakovic et al., 2007). Infiltrasjonstapet kan måles og uttrykkes i et lekkasjetall (n_{50}). Lekkasjetall er den mest brukte betegnelsen for å angi en bygnings lufttetthet. Verdien uttrykker antall luftvekslinger (h^{-1}) ved en trykkforskjell på 50 Pa (SINTEF, 2012).

Ventilasjon er tilsiktet luftutskiftning og deles av Novakovic et al. (2007) inn i to hovedformer ut i fra drivkraften til luftutskiftningen. De to hovedformene er naturlig og mekanisk ventilasjon.

Naturlig ventilasjon drives av naturlig trykkforskjell mellom inne- og uteluften. Mekanisk ventilasjon drives av vifter. Mjønes et al. (2012) tilfører i tillegg balansert ventilasjon, som etter Novakovic et al. (2007) sin definisjon er en form for mekanisk ventilasjon. Mjønes et al. (2012) argumenterer videre for at naturlig ventilasjon er mest vanlig i eldre boliger, mens mekanisk ventilasjon i større grad har blitt benyttet i senere tid. Mjønes et al. (2012) argumenterer for at luftutskiftningen i boliger har økt i løpet av de siste 10-årene. Det er en konsekvens av strengere krav til inneklimate (Novakovic et al., 2007).

I Tabell 2.13 er det vist hva Mjønes et al. (2012), Thyholt et al. (2009) og Myhre (1995) mener er lekkasjetall, infiltrasjonstap og spesifikk luftmengde for ventilasjon i boligmassen etter byggeår. Det er i tillegg vist hva Standard Norge (2007) anbefaler for beregning av energibruk i boliger.

Tabell 2.13 Lekkasjetall, infiltrasjonstap og spesifikk luftmengde etter byggeår og boligtype.

Byggeår	Lekkasjetall (n_{50}), infiltrasjonstap og spesifikk luftmengde ventilasjon**						
	Mjønes ^b		Thyholt ^c *		Myhre ^a		NS 3031:2007 ^f
	Vent.	n_{50}	Vent.	n_{50}	Vent.	Inf.	n_{50}
	$m^3/(h*m^2)$	h^{-1}	h^{-1}	h^{-1}	h^{-1}	h^{-1}	h^{-1}
Enebolig							
Før 1956	0,6	5	0,4	4	0,6	0,1	-
1956 - 1970	0,5	5	0,4	4	0,5	0,1	-
1970 - 1980	0,4	4	0,4	4	0,4	0,1	3
1980 - 1990	0,4	4	0,4	4	0,4	0,1	3
1990 - 1999	0,4	3,5	0,4	3	0,4	0,1	3
Etter 1999	0,8	3	-	-	0,5	0,1	4
Småhus							
Før 1956	0,5	5	0,4	4	0,5	0,1	-
1956 - 1970	0,5	5	0,4	4	0,5	0,1	-
1970 - 1980	0,4	4	0,4	4	0,4	0,1	3
1980 - 1990	0,4	4	0,4	4	0,4	0,1	3
1990 - 1999	0,4	3	0,4	3	0,4	0,1	3
Etter 1999	0,8	3	-	-	0,5	0,1	4
Boligblokk							
Før 1956	0,5	5	0,4	5	0,5	0,1	-
1956 - 1970	0,2	5	0,4	5	0,2	0,1	-
1970 - 1980	0,3	3	0,4	4	0,3	0,1	1,5
1980 - 1990	0,4	1,5	0,4	4	0,4	0,1	1,5
1990 - 1999	0,4	1,5	0,4	3	0,5	0,1	1,5
Etter 1999	1,2	1,5	-	-	0,5	0,1	-

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

f) (Standard Norge, 2007)

* Thyholt et al. (2009) deler boliger innen samme byggeår inn i oppgraderingsnivåer. Verdiene i tabellen er vektet for å kunne sammenliknes.

** Ventilasjon er i tabellen forkortet med vent.

2.2.9 Innetemperatur

Novakovic et al. (2007) trekker frem innetemperatur som en av de mest sentrale faktorene for et godt innemiljø i boliger. Innemiljø er nærmere omtalt i kapittel 2.1.5 *Miljø*. Innetemperaturen er i tillegg den mest avgjørende faktoren for forbruket av driftsenergi i en bolig (Mjønes et al., 2012). Standard Norge (2007) anbefaler en gjennomsnittlig innetemperatur på 20,3 °C ved beregning av driftsenergi i en bolig. Mjønes et al. (2012) mener på sin side at det er stor differanse mellom innetemperaturen i nyere og eldre boliger. Eldre boliger er

gjørne dårlig isolert og innnetemperaturen er derfor ofte lavere. Mjønes et al. (2012) mener også at gjennomsnittlig innnetemperatur varierer ut i fra bygningstype. Både Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) mener at boligblokker ofte har høyere innnetemperatur enn andre boliger. Det begrunner de med at boligblokkene i mange tilfeller har sentralvarmeanlegg. Sentralvarmeanlegg uten individuell avregning av forbruk medfører få incentiver til å redusere driftsenergien relatert til oppvarming.

Både Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) skiller mellom oppvarmet sone og uoppvarmet sone i boligen. Eksempler på uoppvarmede soner er soverom og rom med lite hyppig bruk. Tabell 2.14 viser gjennomsnittstemperaturen i boligmassen etter byggeår basert på Mjønes et al. (2012) og Myhre (1995).

Tabell 2.14 Gjennomsnittstemperatur i boligmassen etter byggeår og bygningstype.

Byggeår	Gjennomsnittstemperatur i boligmassen									
	Myhre ^a				Mjønes ^b					
	Andel oppvarmet	T _{oppv}	T _{uoppv}	T _{snitt}	Andel oppvarmet	T _{oppv}	T _{uoppv}	T _{snitt}		
%	°C	°C	°C	%	°C	°C	°C			
Enebolig										
Før 1956	74 %	21	15	19,4	74 %	21	10	18,1		
1956 - 1970	82 %	21	15	19,9	82 %	21	10	19,0		
1970 - 1980	82 %	21	15	19,9	82 %	21	10	19,0		
1980 - 1990	86 %	21	15	20,2	86 %	21	10	19,5		
1990 - 1999	-	-	-	-	86 %	21	15	20,2		
Etter 1999	-	-	-	-	86 %	21	15	20,2		
Småhus										
Før 1956	85 %	21,5	15	20,5	85 %	21,5	10	19,8		
1956 - 1970	87 %	21,5	15	20,7	87 %	21,5	10	20,0		
1970 - 1980	87 %	21,5	15	20,7	87 %	21,5	10	20,0		
1980 - 1990	88 %	21,5	15	20,7	89 %	21,5	10	20,2		
1990 - 1999	-	-	-	-	89 %	21,5	15	20,8		
Etter 1999	-	-	-	-	89 %	21,5	15	20,8		
Boligblokk										
Før 1956	77 %	22	15	20,4	77 %	22	10	19,2		
1956 - 1970	80 %	22	15	20,6	80 %	22	10	19,6		
1970 - 1980	82 %	22	15	20,7	82 %	22	10	19,8		
1980 - 1990	85 %	22	15	21,0	85 %	22	10	20,2		
1990 - 1999	-	-	-	-	85 %	22	15	21,0		
Etter 1999	-	-	-	-	85 %	22	15	21,0		

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

2.2.10 Internlaster

Driftsenergi relatert til belysning, utstyr og varmtvann kalles gjerne internlaster. Historisk sett er internlastene i norske boliger store. Sammenliknet med Danmark forbrukes det omtrent tre ganger så mye energi relatert til belysning (Novakovic et al., 2007). Standard Norge (2007) oppgir netto energibehov til internlaster for beregning av energiforbruket i boliger. I følge Mjønes et al. (2012) er det et paradoks at internlastene oppgis per kvadratmeter, da energiforbruket er sterkt relatert til antall beboere fremfor boligens størrelse. I Tabell 2.15 er det vist hvilke verdier Standard Norge (2007), Pauliuk et al. (2013) og Myhre (1995) mener bør bli benyttet ved beregning av internlaster i en bolig.

Tabell 2.15 Ulike forfatteres verdier for internlaster etter byggeår og boligtype.

Internlaster	Netto energibehov for belysning, utstyr og varmtvann (kWh/m^2)		
	NS 3031:2007 ^f **	Pauliuk ^d *	Myhre ^a **
Belysning	11,4	17	17,4
Utstyr	17,5	23	15,7
Varmtvann	29,8	30	30 - 52

a) (Myhre, 1995)

b) (Pauliuk et al., 2013)

c) (Standard Norge, 2007)

* Etter samtale med Pauliuk kan det antas at verdiene ikke stemmer. Intensjonen til Pauliuk var å bruke tall fra NS 3031:2007.

** Verdiene i NS 3031:2007 er basert på en driftstid på 16 timer i døgnet. Myhre (1995) oppgir sine verdier i W . Disse verdiene er regnet om til Wh basert på NS 3031:2007.

En del av energien levert til belysning og utstyr overføres sekundært som varme til omgivelsene og bidrar dermed til oppvarming (Mjønes et al., 2012). I følge Standard Norge (2007) blir henholdsvis 100 % og 60 % av energien levert til belysning og utstyr overført som varmetilskudd til omgivelsene.

2.2.11 Oppvarmingssystem

I følge Myhre (1995) er boligens oppvarmingssystem sentralt ved beregning av driftsenergien. Novakovic et al. (2007) deler oppvarmingssystemer inn i tre hovedtyper: lokalt ildsted, direkte elektrisitet og sentrale varmesystemer. Et lokalt ildsted kan fyres med både fast, flytende og gassformig brensel. I følge Novakovic et al. (2007) brukes lokalt ildsted sjeldent som eneste oppvarmingskilde, men derimot ofte som en sekundærkilde. Direkte elektrisitet er i følge Novakovic et al. (2007) den beste løsningen. For oppvarming kan direkte elektrisitet enten benyttes til elektriske ovner eller til drift av varmpumper. Ved bruk av varmpumper økes effektiviteten drastisk i forhold til elektriske ovner. En ulempe Novakovic et al. (2007) trekker frem ved bruk av direkte elektrisitet til

oppvarming er at elektrisitet er en begrenset ressurs, som også har andre bruksområder utover oppvarming. Den siste hovedtypen oppvarmingssystemer er sentrale varmesystemer. I slike varmesystemer produseres varmen sentralt og transporteres til forbruksstedet med et varmebærende middel. Vann er det dominerende varmebærende middelet i bruk (Novakovic et al., 2007).

Tabell 2.16 viser hvilke oppvarmingssystemer Mjønes et al. (2012), Pauliuk et al. (2013), Thyholt et al. (2009) og Myhre (1995) mener er i bruk i boliger etter byggeår.

Tabell 2.16 Fordeling av oppvarmingssystemer etter byggeår og bygningstype.

Byggeår	Oppvarmingssystem (%) [*]			
	Mjønes ^b	Pauliuk ^d	Thyholt ^c	Myhre ^a
	El - O&F - V - VP	El - F - V - VP	El - O&F - V - VP	El - O - V
Enebolig				
Før 1956	48 - 06 - 22 - 23	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	50 - 17 - 33
1956 - 1970	48 - 05 - 18 - 30	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	47 - 18 - 35
1970 - 1980	50 - 07 - 17 - 26	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	47 - 18 - 35
1980 - 1990	46 - 01 - 19 - 34	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	61 - 13 - 26
1990 - 1999	57 - 00 - 15 - 28	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	90 - 00 - 10
Etter 1999	69 - 02 - 13 - 16	37 - 10 - 15 - 38	70 - 05 - 13 - 10	-
Småhus				
Før 1956	75 - 04 - 08 - 13	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	64 - 16 - 20
1956 - 1970	63 - 11 - 09 - 16	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	59 - 18 - 23
1970 - 1980	69 - 09 - 08 - 14	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	59 - 18 - 23
1980 - 1990	65 - 06 - 10 - 19	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	71 - 13 - 16
1990 - 1999	73 - 00 - 12 - 15	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	90 - 00 - 10
Etter 1999	71 - 08 - 13 - 09	64 - 12 - 15 - 09	70 - 05 - 13 - 10	-
Boligblokk				
Før 1956	78 - 09 - 08 - 05	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	56 - 35 - 09
1956 - 1970	80 - 09 - 05 - 06	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	69 - 24 - 07
1970 - 1980	85 - 06 - 04 - 05	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	69 - 24 - 07
1980 - 1990	81 - 11 - 01 - 05	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	78 - 17 - 05
1990 - 1999	93 - 00 - 02 - 06	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	90 - 05 - 05
Etter 1999	83 - 07 - 07 - 03	75 - 16 - 7,5 - 1,5	70 - 07 - 13 - 10	-

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

d) (Pauliuk et al., 2013)

* Fortkortelser: El: Elektrisitet. O: Olje og parafin. F: Fjernvarme. V: Ved. VP: Varmepumpe. Verdiene er gitt som en prosentvis andel av oppvarmingstype. Elektrisitet i tabellen brukt for oppvarming med panelovner.

Virkningsgraden på de forskjellige oppvarmingssystemene kan defineres på ulike måter. Novakovic et al. (2007) definerer fire forskjellige virkningsgrader: årsvirkningsgrad, systemvirkningsgrad, kjelvirkningsgrad og fyringsteknisk virkningsgrad. Fyringsteknisk virkningsgrad er den enkleste virkningsgraden og tar kun med tap relatert til følbar varme ved forbrenning. Kjelvirkningsgrad tar i tillegg med tap i form av stråling og konveksjon fra forbrenningsprosessen. Sammen med det overnevnte tar systemvirkningsgrad også hensyn til tap i overføringssystemer. Årsvirkningsgrad tar med det samme som systemvirkningsgrad, men ser i tillegg på tap relatert til start og stopp og stillstand i systemet integrert over ett helt år (Novakovic et al., 2007). I Tabell 2.17 er det gitt en presentasjon av hva Mjønes et al. (2012), Pauliuk et al. (2013), Myhre (1995), Thyholt et al. (2009), Standard Norge (2007), Hille et al. (2011) og Magnussen et al. (2011) mener er systemvirkningsgraden på de forskjellige energibærerne/oppvarmingssystemer.

Tabell 2.17 Ulike forfatteres mening om systemvirkningsgraden for forskjellige energibærere.

Energibærer	Systemvirkningsgrader						
	Mjønes ^b	Pauliuk ^d	Myhre ^a	Thyholt ^c	NS 3031:2007 ^f		Hille og Magnussen ^g
					Før 1990	Etter 1990	
Elektrisitet*	98 %	98 %	100 %	100 %	98 %	98 %	100 %
Olje og parfin	72 %	76 %	75 %	80 %	72 %	77 %	75 %
Fjernvarme	72 %	85 %	-	88 %	86 %	88 %	85 %
Ved og pellets	73 %	56 %	65 %	40 - 60 %	64 %	64 %	75 %
Varmepumpe	122 %	220 %	-	250 %	198 %	216 %	230 %

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

c) (Thyholt et al., 2009)

d) (Pauliuk et al., 2013)

f) (Standard Norge, 2007)

g) (Hille et al., 2011)

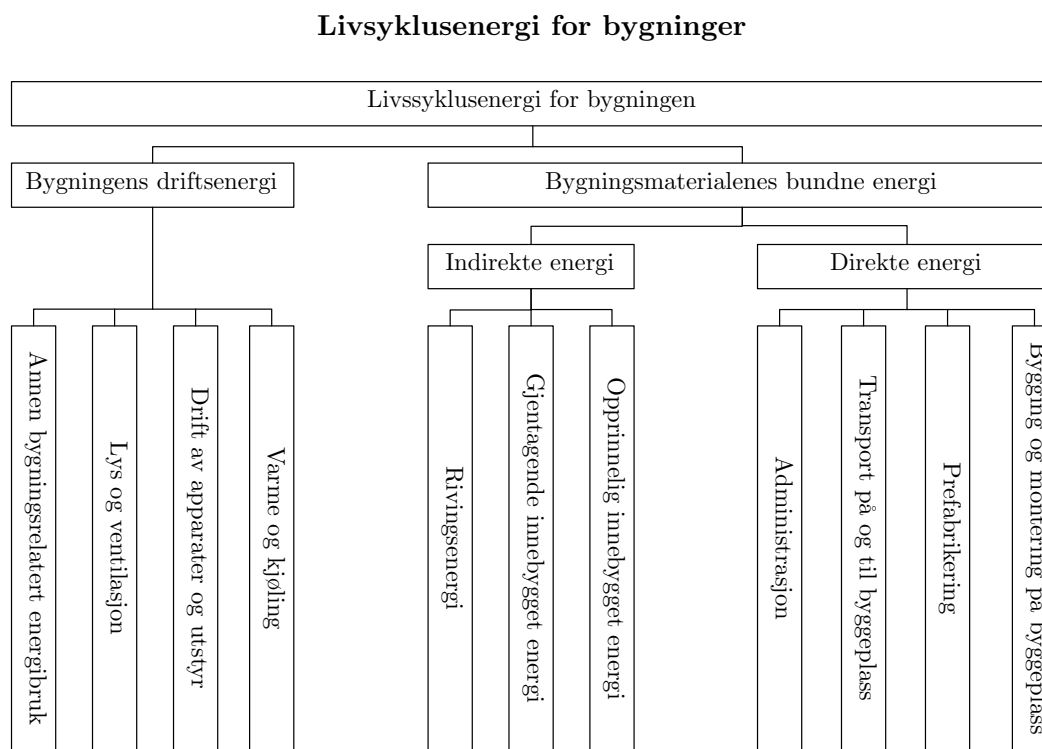
* Elektrisitet i tabellen brukt for oppvarming med panelovner.

Tabell 2.17 viser systemvirkningsgrader for varmpumper av typen luft-til-luft. Mjønes et al. (2012) mener 95 % av alle varmpumper i norske boliger er av denne typen. Videre mener Mjønes et al. (2012) at varmpumper har en teoretisk virkningsgrad på 220 %, men at den reelle virkningsgraden er lavere. Opptil 50 % av de som har installert varmpumpe opplever ingen eller negativ effekt av denne. Mjønes et al. (2012) nevner flere grunner til dette, men trekker spesielt frem økt innetemperatur som den viktigste. Økt innetemperatur er, som kapittel 2.2.9 *Innetemperatur* viser, avgjørende for forbruket av driftsenergi i boligen. På bakgrunn av dette reduserer Mjønes et al. (2012) systemvirkningsgraden for varmpumpe til 122 %.

Tabell 2.16 og Tabell 2.17 er i hovedsak basert på at varme avgis fra panelovner, radiatorer, vedovner eller varmepumper. I følge Novakovic et al. (2007) overføres varme fra slike punktkilder i stor grad som konveksjon. Konveksjon er varme-transport grunnet strømming. Strømningen er som oftest i luft (Edwardsen & Ramstad, 2010). I radiatorer og konvektorovner overføres 80 - 90 % av varmen som konveksjon, mens elektriske panelovner overfører omkring 70 % av varmen som konveksjon (Novakovic et al., 2007).

2.3 Energiforbruk i bygg

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål to presentert. Dette forskningsspørsmålet handler om en vurdering av livssyklusenergien til en bolig. Boliger bruker energi gjennom hele levetiden. Dette inkluderer bygging, drift, vedlikehold, oppgradering og rivning (Ibn-Mohammed et al., 2013). Boligers energibruk gjennom levetiden er vanlig å dele i to: bundet energi og driftsenergi (Dixit et al., 2010; Ramesh et al., 2010). Ramesh et al. (2010) mener at driftsenergi er avhengig av beboere og besøkende, mens bundet energi er uavhengig av dette. Driftsenergi er også i følge Langston og Langston (2008) ansett som enkelt å måle, mens bundet energi er både komplekst og mer tidkrevende å skaffe gode verdier for. Figur 2.2 viser hvordan Dixit et al. (2010) deler opp livssyklusenergien for et bygg.



Figur 2.2 Fordelingen av energibruket for et bygg. Basert på Dixit et al. (2010).

2.3.1 Bundet energi

Det finnes ulike definisjoner på bundet energi. Ofte er det ulike systemgrenser som skiller definisjonene fra hverandre. Ibn-Mohammed et al. (2013) trekker frem tre systemgrenser som er vanlige å bruke: vugge til grav, vugge til port og vugge til byggeplass. De samme systemgrensene er også definert av SINTEF (2010a):

- Vugge til grav er den systemgrensen som favner videst. Systemgrensen går ideelt fra utvinning av råmateriale og ut produktets levetid (Ibn-Mohammed et al., 2013). Slutten av bruksfasen, som rivning, sortering, transport, resirkulering, gjenbruk og deponering av avfall på fyllinger, er også inkludert (Dixit et al., 2013).
- Vugge til port er den systemgrensen som favner nest videst. Denne systemgrensen inkluderer all energi til produksjon, inkludert transport av råmaterialer, til produktet forlater fabrikkporten.
- Vugge til byggeplass strekker seg til produktet har nådd bruksstedet.

I kapittel 2.9 *Miljøverktøy* er systemgrensene omtalt i sammenheng med bruk av miljøverktøy.

Som vist i Figur 2.2 mener Dixit et al. (2010) at den bundne energien kan deles inn i to: direkte og indirekte energi. Det er en inndeling som også brukes av Ding (2004) og Treloar et al. (2001). Direkte energi kan forklares som all levert energi til bygging, prefabrikkering, administrasjon og transport på og utenfor byggeplassen. Indirekte energi er i hovedsak energien som brukes til fremstilling av bygningsmaterialene og ved renovering, oppgradering og rivning (Dixit et al., 2010).

Dixit et al. (2010) deler videre den indirekte energien inn i tre underkategorier:

- Opprinnelig bundet energi er energien som brukes til å produsere de originale bygningsmaterialene og bygningskomponentene. Det vil ofte inkludere utvinning av råmaterialer, produksjon av materialer og energi til bygging på byggeplassen (Ding, 2004).
- Gjentakende bundet energi er energien som brukes i ulike prosesser knyttet til vedlikehold og oppussing gjennom byggets levetid (Dixit et al., 2010). Det inkluderer blant annet utskiftning av materialer og komponenter som har kortere levetid enn bygningen.
- Rivningsenergi er den nødvendige energien som trengs for å rive bygningen og håndtere bygningsmaterialene (Dixit et al., 2010).

2.3.2 Driftsenergi

Driftsenergi er det energiforbruket som kan knyttes til bruk av bygningen gjennom dens levetid. Det innebærer å opprettholde tilfredsstillende inneklima, vannforbruk og strøm til tekniske utstyr (Dixit et al., 2010). Tradisjonelt har fokuset vært rettet mot å redusere energibruken relatert til drift av bygg (Civitas, 2007; Dixit et al., 2010; Monahan & Powell, 2011). Ibn-Mohammed et al. (2013) trekker blant annet frem at bundet energi og utslipp har vært valgfritt

å ta hensyn til i livssyklusanalyser av bygninger. Dette fordi den bundne energien og utslipp var ansett som marginale i forhold til energibruk og utslipp fra driften.

Som det kommer frem i kapittel 2.2.2 *Boligmassens historiske utvikling* har det i lang tid vært et fokus mot å redusere energibruken fra drift av bygninger. Både Arnstad et al. (2010) og Lavenergiutvalget (2009) vurderer i stor grad kun driftsenergien til bygninger. Redusert forbruk av driftsenergi gjør at det relative bidraget fra bundet energi øker (Dixit et al., 2012). Dette har bidratt til et økende fokus på reduksjon av både bundet energi og driftsenergi relatert til bygninger (Adalberth, 1997; Borvik, 2013; Ding, 2004; Dixit et al., 2012; Ibn-Mohammed et al., 2013).

2.4 Metoder for modellering av driftsenergi

I kapittel 2.2 *Boligmassen* er en metode for modellering av driftsenergi i boligmassen introdusert. Denne metoden kalles bottom-up og er en av to metoder for å modellere energiforbruket i boligmassen (Swan & Ugursal, 2009). I følge Swan og Ugursal (2009) er modellering av driftsenergi komplekst og riktig valg av metode er nødvendig.

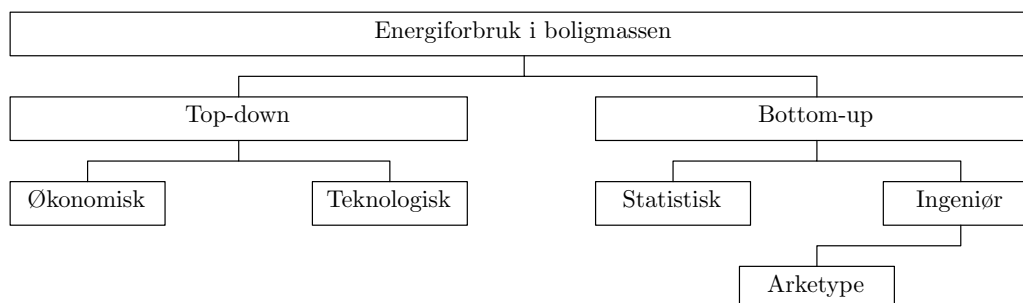
Den andre metoden Swan og Ugursal (2009) trekker frem er top-down. Denne metoden ser på boligmassen fra et overordnet nivå. I metoden vurderes driftsenergien ut i fra historiske verdier og makroøkonomiske endringer. I følge Swan og Ugursal (2009) kan variablene blant annet være BNP, inflasjon og arbeidsledighet. Metoden er egnet fordi den baserer seg på allerede tilgjengelig data. Den er også enkel i bruk. Swan og Ugursal (2009) mener at boligmassen sjeldent gjennomgår drastiske og store endringer. Det gjør at historiske data, justert for makroøkonomiske endringer, gir en god antakelse av energiforbruket til boligmassen. Swan og Ugursal (2009) trekker frem to ulemper med top-down-metoden. Den første er at den ikke tar høyde for større teknologiske endringer. Den andre ulempen er at metoden ikke kan brukes til å identifisere spesifikke satsningsområder for boligmassen som helhet. Grunnen til det er at den mangler detaljnivået for å identifiserer dårlig energiutnyttelse innad i boligene.

Bottom-up-metoden ser på energiforbruket til et representativt antall individuelle boliger og ekstrapolerer forbruket opp på et nivå som representerer hele boligmassen. En mindre mengde historiske data er nødvendig ved bruk av bottom-up-metoden, kontra top-down-metoden. En av fordelene med metoden er at det er enkelt å identifisere satsningsområder i boligmassen, da metoden kartlegger energiforbruket i individuelle boliger (Swan & Ugursal, 2009). Dette kan være av særlig nytte for beslutningstakere og myndigheter som ønsker å forbedre boligmassen (Kavgic et al., 2010). Ulempene med metoden er at den krever en stor mengde data og at simuleringene av energiforbruket til boligene er relativt komplisert (Swan & Ugursal, 2009). Bottom-up-metoden har også problemer med å skille mellom ulike brukeroppførsel innen hver enkelt bolig (Kavgic et al., 2010). Swan og Ugursal (2009) trekker frem at energiforbruk til varmtvann, utstyr og belysning varierer mye fra bruker til bruker og i tillegg har stor påvirkning på det totale energiforbruket til boligen.

En annen svakhet med bottom-up-metoden er at den i større grad enn top-down-metoden baserer seg på spørreundersøkelser om energiforbruk. Det kan medføre at enkelte energikilder ikke føres opp (Swan & Ugursal, 2009). SSB understreker at dette er en potensiell feilkilde i sine undersøkelser. De mener særlig at forbruk av ved, olje og parafin er vanskelig å beregne, da innkjøpstidspunkt og forbrukstidspunkt gjerne ikke sammenfaller (SSB, 2011a). I Figur 2.3 er det vist en

skjematisk oversikt over hvordan Swan og Ugursal (2009) mener at energiforbruket i boligmassen kan modelleres.

Metoder for modellering av energiforbruk i boligmassen



Figur 2.3 Skjematisk oversikt over hvordan boligmassen kan modelleres. Basert på Swan og Ugursal (2009).

Figur 2.3 viser at bottom-up-metoden kan deles opp i to forskjellige metoder: en statistisk metode og en ingeniørmetode. Den statistiske metoden er en hybrid mellom top-down og bottom-up, og benytter seg av både individuelle boliger og makroøkonomiske variabler. Ingeniørmetoden benytter seg i større grad av bygningskarakteristikker og fysiske bygningsdata.

Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) har begge modellert energiforbruket i boligmassen. Myhre (1995) beskriver boligmassen i Norge ved å dele den inn i 12 kategorier. Mjønes et al. (2012) gjør det samme og deler boligmassen inn i 18 kategorier. Både Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) etablerer en standardbolig innen hver kategori. Disse standardboligene ekstrapoleres for å representere hele boligmassen i Norge. I følge Swan og Ugursal (2009) minner en slik metodebruk om en form for ingeniørmetode, som Swan og Ugursal (2009) kaller arketype-metoden.

I arketype-metoden bygges boliger opp med høy grad av detaljer basert på spesifikasjoner og bygningskarakteristikker. Arketype-metoden er derfor den metoden hvor det enklest lar seg gjøre å bytte ut enkelte komponenter og vurdere effekten av disse byttene (Swan & Ugursal, 2009). På denne måten er det mulig å teste ut nye teknologiske løsninger eller myndighetskrav på hele boligmassen (Kavgic et al., 2010). Det som imidlertid er vanskelig med arketype-metoden er differensiering mellom brukeroppførsel. Ved bruk av statistisk metode eller top-down-metoden er det enklere å justere for forskjellig energibruk hos brukere av boliger. I arketype-metoden må det antas et snittforbruk innen hver boligtype (Swan & Ugursal, 2009). En slik differensiering i brukeroppførsel er noe av grunnen til at MacGregor et al. (1993) og Swan og Ugursal (2009) anbefaler at resultatene fra arketype-metoden sammenliknes med resultater fra andre metoder.

2.5 Forbruk av driftsenergi i boligmassen

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmålene presentert. Det første forskningsspørsmålet handler om energiforbruket til drift av den eksisterende boligmassen. I følge Pauliuk et al. (2013) står boliger for omtrent 22 - 25 % av det totale energiforbruket i Norge. I de senere årene har gjennomsnittsförbruket per bolig sunket (SSB, 2011a), men det totale energiforbruket fra boligmassen har holdt seg relativt konstant (Pauliuk et al., 2013). Som det nevnes i kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* er boligens driftsenergi sammensatt og innad i boligmassen kan det være variasjoner i forbruk fra bolig til bolig (Swan & Ugursal, 2009). Forbruket av driftsenergi påvirkes av flere faktorer og variasjoner i energiforbruket boliger i mellom kan blant annet komme av boligens utforming, kvalitet, antall beboere, beboernes levemåte, inneklime, uteklime og temperatur (Mjønes et al., 2012; Myhre, 1995; Novakovic et al., 2007). Grovt sett kan energiforbruket til en bolig fordeles i følgende undergrupper:

- Oppvarming og kjøling: Energi nødvendig for å dekke varmetap og hindre overtemperatur i bygningskroppen. Varmetap over bygningskroppen kommer av både stråling, konveksjon og luftlekkasje. Energien blir benyttet for å holde temperaturen i bygningen på et komfortabelt nivå (Swan & Ugursal, 2009).
- Varmtvann: Energi nødvendig for å varme vann til ønsket temperatur (Swan & Ugursal, 2009). NS 3031:2007 setter standardverdi for gjennomsnittlig energibehov for varmtvann til 29,8 kWh/m² (Standard Norge, 2007). Standardverdien er utarbeidet for kontrollberegning mot offentlige krav og representerer ikke nødvendigvis reelle forhold (Standard Norge, 2007).
- Belysning og utstyr: Energi nødvendig for tilstrekkelig belysning og drift av utstyr (Swan & Ugursal, 2009). NS 3031:2007 setter standardverdi for gjennomsnittlig energibehov for belysning til 11,4 kWh/m² og utstyr til 17,5 kWh/m² (Standard Norge, 2007). Standardverdiene er utarbeidet for kontrollberegning mot offentlige krav og representerer ikke nødvendigvis reelle forhold (Standard Norge, 2007).
- Annen bygningsrelatert energiforbruk: Energi nødvendig for å drive nødvendige bygningsfunksjoner, som for eksempel ventilasjonsvifter (Dixit et al., 2010; Mjønes et al., 2012).

I kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* er det presentert en metode for å beregne driftsenergien i boliger. Metoden baserer seg på fysiske og tekniske data om boligmassen. Både Mjønes et al. (2012) og Pauliuk et al. (2013) har modellert driftsenergien i boligmassen basert på de fysiske og tekniske dataene

presentert i kapittel 2.2 *Boligmassen*. I Tabell 2.18 og Tabell 2.19 er modelleringen til Mjønes et al. (2012) og Pauliuk et al. (2013) presentert som spesifikk energibruk per areal og bolig. Mjønes et al. (2012) sine beregninger er i stor grad basert på en egenprodusert modell, mens Pauliuk et al. (2013) benytter seg av tall fra Myhre (1995) og Thyholt et al. (2009). I Tabell 2.18 og Tabell 2.19 er det i tillegg presentert tall fra SSB. Disse tallene er i følge Mjønes et al. (2012) basert på upubliserte data fra Statistisk sentralbyrå.

Tabell 2.18 Levert energi til boligmassen etter byggeår og bygningstype.

Byggeår*	Levert energi til boligmassen per areal og per bolig**					
	Mjønes ^b		Statistisk sentralbyrå ^b		Pauliuk ^d	
	Lev. en/ areal	Lev. en/ bolig	Lev. en/ areal	Lev. en/ bolig	Lev. en/ areal	Lev. en/ bolig
	<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>
Enebolig						
Før 1956	267	39 025	180	26 288	220	26 402
1956 - 1980	166	24 720	179	26 664	190	23 876
1980 - 1999	135	23 585	157	27 391	155	21 195
Etter 1999	128	21 181	141	23 299	143	20 592
Uoppgitt	181	28 381	170	26 552	184	23 752
Småhus						
Før 1956	253	27 276	188	20 343	214	20 449
1956 - 1980	169	19 485	184	21 165	187	18 799
1980 - 1999	141	15 334	167	18 256	143	15 946
Etter 1999	137	14 127	158	16 314	130	16 120
Uoppgitt	178	19 581	177	19 394	174	18 376
Boligblokk						
Før 1956	229	16 285	178	12 666	197	14 295
1956 - 1980	177	12 546	151	10 686	168	12 335
1980 - 1999	111	8 119	127	9 291	128	10 210
Etter 1999	126	8 968	168	11 899	119	9 639
Uoppgitt	171	12 175	158	11 293	160	12 095

b) (Myhre, 1995)

d) (Pauliuk et al., 2013)

* Kategoriseringen av boliger etter byggeår er basert på inndeling presentert i 4.2.1 *Oppbygning og forbruk av driftsenergi*. Inndelingen medfører enkelte justeringer av spesifikt energiforbruk og boligareal.

** Levert energi er i tabellen forkortet med lev. en.

2.5 Forbruk av driftsenergi i boligmassen

Tabell 2.19 Total mengde levert energi til boligmassen etter byggeår og bygningstype.

Byggeår*	Levert energi til boligmassen totalt**					
	Mjønes ^b		Statistisk sentralbyrå ^b		Pauliuk ^d	
	Levert energi	Andel	Levert energi	Andel	Levert energi	Andel
	<i>GWh</i>	%	<i>GWh</i>	%	<i>GWh</i>	%
Enebolig						
Før 1956	12 246	23 %	8 249	16 %	8 285	18 %
1956 - 1980	10 830	20 %	11 682	23 %	10 460	23 %
1980 - 1999	7 047	13 %	8 185	16 %	6 333	14 %
Etter 1999	2 488	5 %	2 737	5 %	2 419	5 %
Uoppgitt	2 990	6 %	2 797	6 %	2 502	5 %
Totalt	35 602	67 %	33 650	67 %	30 000	65 %
Småhus						
Før 1956	3 373	6 %	2 516	5 %	2 529	5 %
1956 - 1980	3 016	6 %	3 276	7 %	2 910	6 %
1980 - 1999	1 832	3 %	2 181	4 %	1 905	4 %
Etter 1999	1 107	2 %	1 278	3 %	1 263	3 %
Uoppgitt	378	1 %	374	1 %	355	1 %
Totalt	9 706	18 %	9 625	19 %	8 962	19 %
Boligblokk						
Før 1956	2 470	5 %	1 921	4 %	2 168	5 %
1956 - 1980	2 294	4 %	1 954	4 %	2 255	5 %
1980 - 1999	690	1 %	790	2 %	868	2 %
Etter 1999	998	2 %	1 324	3 %	1 073	2 %
Uoppgitt	57	0 %	53	0 %	56	0 %
Totalt	6 509	12 %	6 042	12 %	6 421	14 %
Annen bygningstype						
Totalt	1 057	2 %	1 066	2 %	1 100	2 %
Totalt i boligmassen	52 873	100 %	50 383	100 %	46 483	100 %

b) (Mjønes et al., 2012)

d) (Pauliuk et al., 2013)

* Kategoriseringen av boliger etter byggeår er basert på inndeling presentert i kapittel 4.2.1 *Oppbygning og forbruk av driftsenergi*. Inndelingen medfører enkelte justeringer av spesifikt energiforbruk og boligareal.

** Totalt energiforbruk er justert etter det antall boliger som er presentert i kapittel 2.2.3 *Antall boliger*, og samsvarer derfor ikke med tall som finnes i Mjønes et al. (2012) og Pauliuk et al. (2013).

2.5.1 Indikator for bruk av driftsenergi

I Tabell 2.18 er energiforbruket i boligene blant annet presentert som levert energi per areal (kWh/m^2). Thyholt og Dokka (2003) mener en slik fremstilling er lite gunstig, da den ikke stimulerer til arealeffektiv boligbygging. Slette (2012) og Simonsen (2013) ser på henholdsvis arealeffektivitet og delt bruk. Delt bruk er av Simonsen (2013) definert som: "bruk av et område, bygning eller anlegg til samme eller ulik bruk enten samtidig eller til ulik tid". De konkluderer begge med at *energi per areal* er en mangelfull indikator, da den ikke tar hensyn til bruken av bygningen.

Statistisk sentralbyrå fører oversikt over antall beboere i en husholdning (SSB, 2011c). Antall personer i en husholdning regnes etter hvor mange personer som er folkeregistrert på boligadressen (SSB, 2011b). I 2011 bodde det henholdsvis 2,5, 2,2 og 1,6 personer i eneboliger, småhus og boligblokker.

2.6 Energibesparende tiltak

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål nummer to presentert. Dette forskningsspørsmålet handler om å definere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå av eksisterende boliger. For å finne et slikt nivå er det nødvendig å vurdere aktuelle energibesparende tiltak.

Energiøkonomisering (enøk) av norske boliger startet for alvor i 1977, da myndighetene la frem en handlingsplan for statlig enøk-politikk. Myndighetene fryktet en underdekning av oljeproduksjonen i verden i årene 1985 - 1995. I tillegg økte energiforbruket raskere enn kraftutbyggingen. Enøk-politikken skulle derfor utnytte landets energiressurser på en mest mulig effektiv måte og fremme samfunnsøkonomisk lønnsom energibesparing (Novakovic et al., 2007).

I dag oppfattes enøk-begrepet gjerne som den delen av energieffektiviseringen som er lønnsom (NOU 1998:11). I NOU 1998:11 defineres begrepet på følgende måte:

Alle de samfunnsøkonomiske forbedringer i energisystemet og bruken av energi som fører til høyere energiproduktivitet, mer fleksibilitet og som gir et bedre miljø. Enøkpolitikken omfatter de tiltak, virkemidler og programmer som myndighetene iverksetter med sikte på å utløse samfunnsøkonomisk lønnsomme forbedringer. (NOU 1998:11)

Begrepene enøk og energibesparing brukes gjerne om hverandre i den allmenne språkbruken i Norge (NOU 1998:11). I NOU 1998:11 defineres energibesparing som et redusert energiforbruk som følge av en reduksjon i ytelse. En slik reduksjon kan være senket romtemperatur. SINTEF (2004a), på sin side, definerer energibesparing som økonomisk fordelaktige og komforthevede tiltak som senker energiforbruket. De samfunnsøkonomiske fordelene ved tiltaket er reduserte miljøbelastninger. Både begrepet enøk-tiltak og energibesparing blir av Bøhn et al. (2006) brukt om hverandre.

2.6.1 Tiltak

SINTEF (2004a) argumenterer for at aktuelle energibesparende tiltak og tilhørende sparepotensial er svært avhengig av boligens alder og standard, samt brukervaner. Enkelte boliger har komplisert arkitektur og kan derfor være kostbare og vanskelige å oppgradere. Alternative sparetiltak må vurderes på slike boliger. SINTEF (2004a) trekker også frem at enkelte energibesparende tiltak medfører ulemper og trekker frem tre eksempler. Den første ulempen er at forbedret tetthet i boligen kan medføre at ventilasjonsmengden må økes. Den andre er at etterisolering og tetting kan gi fuktskader. Dette er spesielt et problem når isolasjonen legges på innsiden av veggen. Den siste ulempen som

trekkes frem er at den totale effekten av enkelttiltak kan være mindre enn effekten av hvert enkelttiltak summert opp (SINTEF, 2004a). Dette er videre beskrevet i kapittel 2.7 *Materialbruk ved energibesparende tiltak*. Bøhn et al. (2006) trekker i tillegg frem at energibesparende tiltak på fredede og bevaringsverdige bygninger må vurderes spesielt. Forhold relatert til fredede og bevaringsverdige bygninger er presentert i kapittel 2.1.4 *Bygningsvern*.

SINTEF (2004a) deler energibesparende tiltak på boliger i fem deler: bovaner, byggetekniske tiltak, tiltak på ventilasjon, tiltak på varmeanlegg og varmtvann og tiltak på belysning og utstyr.

Bovaner

Bovanene som SINTEF (2004a) trekker frem er innetemperatur, varmtvannsforbruk og elektrisk utstyr. Bøhn et al. (2006) supplerer med konkrete tiltak til hvordan bovanene kan endres. Bøhn et al. (2006) nevner blant annet:

- luft kort og effektivt,
- redusere temperaturen på varmtvannsberederen til 65 °C,
- slå av lys i rom som ikke brukes,
- lukke dører mellom kalde og varme rom
- senke innetemperaturen, særlig om natten,
- slå av lys i rom som ikke brukes,
- ikke sette møbler foran varmeovner,
- fyre med tørr ved og sørge for god trekk,
- bruk kaldtvann til vaske- og oppvaskmaskinen,
- bruke varmtvann fornuftig,
- reparere dryppende kraner
- bruke "av"- og ikke "stand-by"-knappen på elektriske apparater,
- investere i hvitevarer med høy energieffektivitet.

Bygningstekniske tiltak

De bygningstekniske tiltakene SINTEF (2004a) trekker frem er tetting av luftlekkasjer og etterisolering. Luftlekkasjer kan særlig være et problem i eldre trehus. Enkelte tiltak som tettelister rundt dører og vinduer og fuger bak lister har vist seg å være enkle tiltak med lave kostnader. Etterisolering vil i mange tilfeller føre til bedre tetthet (SINTEF, 2004a). Bøhn et al. (2006) og SINTEF (2004a) anbefaler følgende tiltak for å minimere luftlekkasjer:

- tetningslister,
- tetting av overganger tak/ vegg, gulv/ vegg og vindus- og dørkarm/ vegg,
- tetting rundt utsparing til pipe,
- tetting ved loftsluker,
- tetting ved gjennomføringer.

I kapittel 2.2.2 *Boligmassens historiske utvikling* kommer det frem at boliger bygget før år 1956 gjerne er bygget med lite eller ingen isolasjon. Dette er i samsvar med SINTEF (2004a). SINTEF (2004a) argumenterer for at boliger bygget frem til 1970 kan ha god effekt av etterisolering. Bøhn et al. (2006) og SINTEF (2004a) anbefaler følgende etterisoleringstiltak:

- etterisolering av tak/ loft,
- isolering mot kald kjeller,
- randsonenisolering,
- etterisolering av yttervegg,
- isolering av innervegg mot uoppvarmet rom,
- isolering av loftsluke,
- utskifting av vinduer,
- utskifting av dører,

SINTEF (2004a) og Bøhn et al. (2006) anbefaler at etterisolering utføres i sammenheng med annen vedlikehold av boligen. Dette reduserer den totale kostnaden av hvert tiltak. For å minimere kuldebroer ved etterisolering av yttervegg anbefales det å flytte vinduene ut i vegglivet. Det frarådes samtidig å benytte seg av innblåsing av isolasjon bak luftet kledning, da dette kan føre til dårlig lufting. Innvendig etterisolering er heller ikke å anbefale da dette i mange tilfeller kan føre til ugunstige fuktforhold i konstruksjonen, kuldebroer, og at det reduserer BRA (Bøhn et al., 2006; SINTEF, 2004a).

Isolering av bjelkelag mot kald kjeller medfører lite energibesparing og Bøhn et al. (2006) mener det derfor ikke bør prioriteres. Utrulling av isolasjon mot loft/ tak er derimot et tiltak som i mange tilfeller lønner seg. Det gjelder særlig i boliger eldre enn år 1980 (Bøhn et al., 2006). I kapittel 2.7 *Materialbruk ved energibesparende tiltak* gis det en utfyllende innføring i etterisolering av tak og gulv.

Ventilasjon

SINTEF (2004a) anbefaler flere tiltak på ventilasjonsanlegget. Tiltakene innebærer enten bedre tilførsel av friskluft, bedre gjenvinning av avkastluft og i noen tilfeller en kombinasjon av disse to. I mange tilfeller er det nødvendig å øke ventilasjonsmengden etter at tetningstiltak er gjennomført på boligen. Økt ventilasjon kan oppnås ved å øke den naturlige ventilasjonen, ved å installere flere friskluftventiler. Ventilasjonen kan også oppgraderes med mekaniske vifter på bad og kjøkken. Alternativt kan det installeres et balansert ventilasjonssystem.

I et balansert ventilasjonssystem sørger mekaniske vifter for både avtrekksluft og tilluft. Med et balansert ventilasjonssystem kan deler av varmen fra avkastluften gjenvinnes. Gjenvinning av avkastluften forutsetter at det installeres en varme-

gjenvinner i det balanserte ventilasjonssystemet (SINTEF, 1994; SINTEF, 2013). Ofte er et balansert ventilasjonssystem i seg selv lite energibesparende, da ventilasjonsmengden i mange tilfeller øker (SINTEF, 2013). SINTEF (2013) viser til at det er viktig med god styring på et balansert ventilasjonssystem. De mener at fullventilering av alle rom verken er økonomisk eller bærekraftig, og anbefaler derfor å installere behovsstyring av anlegget. Behovsstyring kan redusere energi-bruken til ventilasjon med opptil 60 % til fordel for anlegg med fast luftmengde. Bøhn et al. (2006) anbefaler balansert ventilasjonsanlegg med varmegjenvinning som et energibesparende tiltak.

Varmeanlegg

For tiltak på varmeanlegget anbefaler SINTEF (2004a) at energifleksibiliteten til boligen økes. Med energifleksibilitet menes muligheten til å benytte seg av flere energibærere. Bruk av vannbåren varme er et eksempel på slik energifleksibilitet. Med et vannbårent system kan energi fra for eksempel solvarme utnyttes. I tillegg til økt energifleksibilitet anbefaler SINTEF (2004a) og Bøhn et al. (2006) spesifikke energibesparende tiltak på varmeanlegget. Tiltakene som anbefales er:

- temperatur- og tidsstyring av elektrisk varme,
- temperaturstyrte radiatorventiler,
- automatisk temperaturregulering mot utetemperatur,
- isolere varmerør, ventiler og pumper,
- installere varmepumpe,
- montere peisinnsats i åpen peis,
- installere rentbrennende vedovn,
- installere pelletskamin,
- installere parafinkamin,
- installere gasspeis,
- skifte ut brenner på oljekjel,
- skifte fra oljekjel til biokjel,
- installere solvarmeanlegg,
- installere sparedusj,
- isolere varmtvannsrør,
- bytte varmtvannsbereder.

I følge SINTEF (2004a) ønsker myndighetene å begrense bruken av elektrisitet og olje som kilder til oppvarming. Myndighetene ønsker å begrense elektrisitetsbruken på bakgrunn av begrenset kapasitet i strømmettet, mens olje bør begrenses på bakgrunn av høye CO₂ utslipp ved bruk. For nye boliger er det i dag kun lov til å benytte elektrisitet eller fossilt brensel for 60 % av oppvarmingsbehovet. Det er heller ikke lov å installere oljekjel for boligens grunnlast (TEK10, 2010). Grunnlasten utgjør vanligvis 70 - 90 % av boligens

årlige varmebehov (DIBK, 2013). For eksisterende boliger er det derimot fortsatt lov med bruk av eksisterende oljekjel. Utskiftninger og utbedringer på eksisterende oljekjel er også tillatt (DIBK, 2013). Regjeringen har uttalt at de ønsker å fase ut oljekjel også i eksisterende bygg (KRD, 2009).

Bøhn et al. (2006) anbefaler både solvarme og varmepumpe som energibesparende tiltak på boliger. SINTEF (2004a) mener på sin side at enkelte forhold som solforhold må vurderes ved valg av slike oppvarmingskilder. Solvarme kan bli brukt til både romoppvarming og til oppvarming av varmtvann. Effekten er svært avhengig av solforholdene. Utbyttet vil derfor være størst i perioder hvor oppvarmingsbehovet er lavt. SINTEF (2004a) påpeker også at varmepumper er svært avhengig av et mildt klima for å fungere optimalt, og at oppvarmings-effekten dermed er lavere når oppvarmingsbehovet er størst. Varmepumpe kan i tillegg gi ubehag i form av støy (SINTEF, 2004a). Novakovic et al. (2007) mener at varmepumpe i mange tilfeller kan dekke 40 - 70 % av effektbehovet og 90 - 95 % av årlig oppvarmingsbehov.

Temperaturregulering er av de energibesparende tiltakene som SINTEF (2004a) mener gir størst effekt, særlig i eldre og dårlig isolerte boliger. En tommelfingerregel er at energibehovet til oppvarming øker med omtrent 5 % for hver grad temperaturøkning. SINTEF (2004a) anbefaler derfor at alle rom har mulighet for individuell temperaturstyring, slik at en form for differensiering av inne-temperaturen etter forskjellige soner i boligen er mulig. Novakovic et al. (2007) anbefaler at temperaturregulering gjennomføres ved hjelp av termostatstyrt oppvarming og et definert nivå for hvor lavt temperaturen kan senkes. Novakovic et al. (2007) anbefaler en nedsenkning av temperaturen på 5 °C om natten.

Varmtvann

For varmtvannssystemet anbefaler SINTEF (2004a) at det tilrettelegges for systemer som kan kombineres med sentralvarmesystemet. Varmtvann og sentralvarmesystemet vil da kunne benytte samme energikilde. I slike systemer kan det være nødvendig å ettervarme varmtvannet i berederen, da sentral-varmesystemer i mange tilfeller opererer på lavere temperaturer enn det som er anbefalt for en varmtvannsbereder. Videre anbefales det av SINTEF (2004a) at varmtvannsberederen flyttes til et oppvarmet rom, slik at sekundærvarmen fra berederen kan bidra til romoppvarming.

Belysning og utstyr

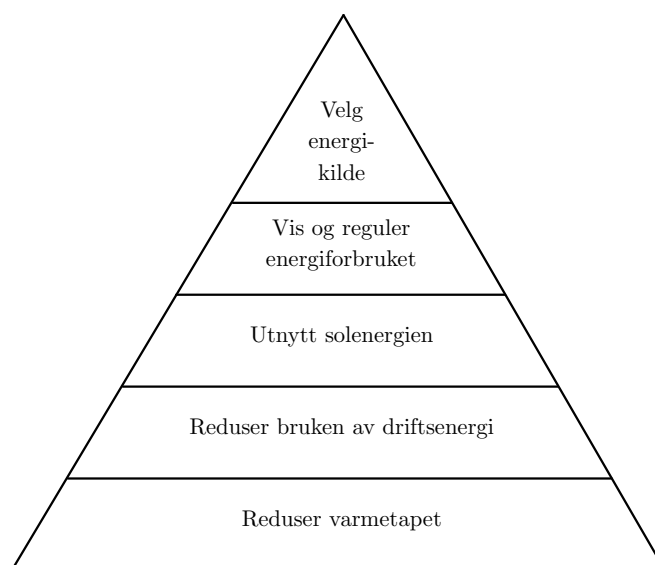
Tiltak på belysning og utstyr er det siste som anbefales av SINTEF (2004a). Bøhn et al. (2006) og SINTEF (2004a) anbefaler følgende tiltak for å redusere energiforbruket i forbindelse med belysning og utstyr:

- skifte til lavenergipærer,
- montere fotocelle på ute- og innebelysning,
- montere tidsbryter på forskjellige elektriske apparater.

SINTEF (2004a) påpeker at overskuddsvarme fra belysning og utstyr bidrar til romoppvarming. Installering av lavenergipærer medfører derfor at oppvarmingsbehovet kan øke.

2.6.2 Prioritering av tiltak

Bøhn et al. (2006) viser til at Husbanken fokuserer på ”passiv energidesign” for å oppnå lavenergiboliger med kostnadseffektive, energieffektive, brukervennlige og robuste løsninger. ”Passiv energidesign” er en stegvis tilnærming til å redusere energiforbruket i en bolig og prinsippet blir i mange tilfeller referert til som Kyoto-pyramiden (Dokka & Hermstad, 2006). Figur 2.4 viser Kyoto-pyramiden.



Figur 2.4 Kyoto-pyramiden. Basert på (Dokka & Hermstad, 2006).

Tiltak av høyeste prioritet er i bunnen av pyramiden, mens tiltak av lavere prioritet er høyere opp i pyramiden. Dokka et al. (2008) bruker Kyoto-pyramiden til å bestemme tiltak på eksisterende bygg. Bøhn et al. (2006) gjør det samme og rangerer energibesparende tiltak på følgende måte:

1. redusere boligens varmetap gjennom utforming av bygningen og bygningsdeler,
2. effektivisere elektrisitetsforbruket til belysning og apparater,
3. utnytte passiv solvarme,
4. styre elektrisitetsforbruket,
5. valg av oppvarmingskilde og energikilde.

Enova (2014a; 2014b) anbefaler hvilke energibesparende tiltak boligeiere bør gjennomføre og rangerer tiltakene på følgende måte for eneboliger:

1. etterisolere,
2. bytte til lavenergivinduer,
3. installere varmestyringssystem,
4. bytte varmekilde,
5. bytte til strømsparende utstyr.

For rekkehus rangeres tiltakene på følgende måte (Enova, 2014b):

1. installere varmestyringssystem,
2. etterisolere kaldloft,
3. bytte til lavenergivinduer,
4. bytte varmekilde,
5. bytte til strømsparende utstyr.

2.7 Materialbruk ved energibesparende tiltak

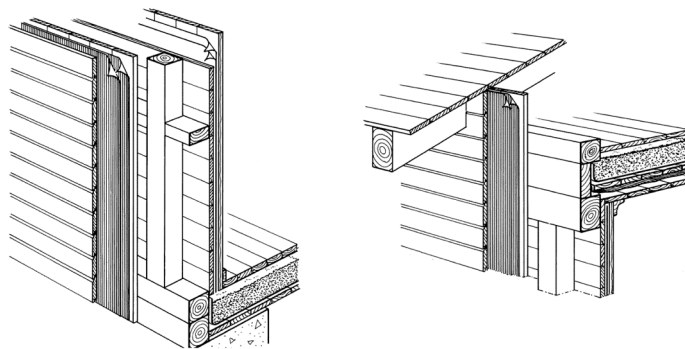
Dette kapitlet ser på sentrale prinsipper og materialbruk ved etterisolering. Det er nødvendig å vurdere sentrale prinsipper og materialbruk for å kunne svare på forskningsspørsmål to. Det forskningsspørsmålet omhandler muligheten for å definere et optimalt oppgraderingsnivå for eksisterende boliger.

2.7.1 Etterisolering av yttervegger

I kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* anbefaler Bøhn et al. (2006) og SINTEF (2004a) etterisolering av yttervegger som et energibesparende tiltak. Etterisolering av yttervegger som et energibesparende tiltak er aktuelt for både vegger av tre, mur og betong (SINTEF, 2003; 2004c). Vegger av tre, mur og betong er bygget opp på forskjellige måter som påvirker hvordan etterisoleringen skal utføres. I dette kapitlet er prinsipper for etterisolering av yttervegger bli presentert.

Bindingsverksvegg

Figur 2.5 viser en skisse av en bindingsverksvegg av tre. Veggen i figuren er uten isolasjon i hulrommet. Slike vegger var vanlig frem til rundt midten av 1950-tallet (Granum & Lundby, 1952). I noen tilfeller var det vanlig å fylle hulrommet med leire og sagflis, men fra år 1950 ble det mer og mer vanlig å benytte seg av mineralull (Granum & Lundby, 1952). Hulrommet ble i utgangspunktet fylt opp med 10 cm mineralull (NBI anv. 7, 1958). I senere år har hulrommet blitt fylt med vesentlig mer isolasjon, men oppbygningen av veggen er tilnærmet lik (SINTEF, 2014). Utviklingen av mineralull som isolasjonsmateriale er beskrevet i 2.2.2 *Boligmassens historiske utvikling*.



Figur 2.5 Skisse av en bindingsverksvegg uten isolasjon. Hentet fra SINTEF (2004c).

Yttervegger av bindingsverk består av stående stendere av tre, med standard senteravstand på 60 cm (SINTEF, 2014). Med topp- og bunnsvill utgjør stenderverket ca. 12 % av veggens areal (Edvardsen & Ramstad, 2010). På utsiden av stenderverket er det ofte en vindsperre i form av et rullprodukt eller

plater (SINTEF, 2004c; SINTEF, 2007a). Utenfor vindsperren ligger kledningen. Kledningen kan være utlektet luftet kledning eller montert rett på vindsperren. Det siste er mer vanlig for boliger bygget frem til midten av 1950-tallet (SINTEF, 2004c). Utlektet luftet kledning er en mye brukt totrinns tetting. Totrinns tetting går ut på at regntetting og vindtetting adskilles med et luftet hulrom (Thue, u.å.).

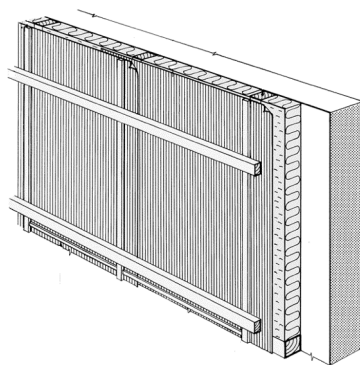
I kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* anbefaler Bøhn et al. (2006) utvendig etterisolering. Både Bøhn et al. (2006) og SINTEF (2004a) er enige i at isolasjonsprodukter som legges uten innblåsing i mange tilfeller er den beste løsningen.

I de tilfellene hvor etterisolering blir utført uten innblåsing må eksisterende kledning fjernes. Hvis det eksisterende bindingsverket ikke er isolert må vindsperren fjernes og hele hulrommet fylles med isolasjon (SINTEF, 2004c). I mange tilfeller er hulrommet i veggen fylt med eksisterende isolasjon. Isolasjonsmattene kan da legges direkte på eksisterende vindsperre. Det vil i slike tilfeller være nødvendig å fore ut veggen med lekter.

Ved etterisolering blir utsiden av veggen kaldere. Ny kledning bør derfor fores ut etter prinsippet om totrinns tetting. Det vil bidra til å redusere problemer med fukt (SINTEF, 2004c).

Mur- og betongvegg

Figur 2.6 viser en skisse av en mur- og betongvegg med utvendig isolasjon. Som presentert i kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer* er eldre boligblokker ofte bygget av mur, tegl eller betong. Disse boligene kan enten være uisolerte, isolert med trykkfast mineralull eller porebetong (Myhre, 1995). Nyere boligblokker er ofte bygget med yttervegger av bindingsverk i tre (Myhre, 1995).



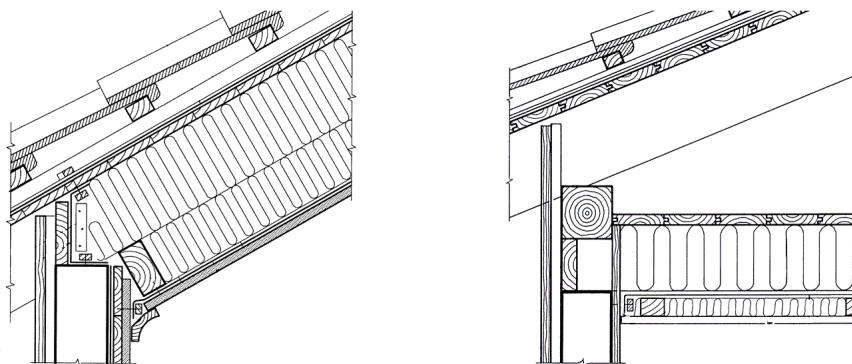
Figur 2.6 Prinsippskisse av mur- eller betongvegg med utforet isolasjon. Basert på SINTEF (2003).

Som for bindingsverksvegger anbefaler Bøhn et al. (2006) utvendig etterisolering. Innvendig etterisolering er spesielt lite gunstig på betongvegger. Bindingsverket med isolasjon havner da mellom betong og dampsperre som er to damptette lag. Det gir dårlig mulighet for uttørking (Geving & Thue, 2002).

Ved utvendig etterisolering kan mineralullen legges direkte på eksisterende vegg. Veggens lektes da ut (SINTEF, 2003). Treandelen i en slik konstruksjon er omtrent 8 % (SINTEF, 2005b). Ny vindsperre og luftet kledning legges utenpå isolasjonen (SINTEF, 2003). Alternativt kan isolasjonen legges direkte på eksisterende vegg uten utlekting. Det må da brukes trykkfaste mineralullsplater eller andre spesialmaterialer som legges i hele veggens høyde og bredde. Kledning kan monteres utenpå i form av murt forblending eller puss rett på isolasjonen. Ved murt forblending er det nødvendig å sørge for en drenasjespalte mellom murveggen og isolasjonsmaterialet (SINTEF, 2003). Puss legges direkte på isolasjonsplatene med en tykkelse på 20 mm (Langvik & Røysland, 2005).

2.7.2 Etterisolering av tak eller loft

Figur 2.7 viser en skisse hvor det til venstre vises etterisolering av sperretak mot friluft og til høyre loftsbjelkelag mot kaldloft. I følge Mjønes et al. (2012) er eneboliger, småhus og eldre boligblokker bygget med taksperrer av tre. Nyere boligblokker er bygget med flate tak av betongdekker (Mjønes et al., 2012).



Figur 2.7 Prinsippskisse av etterisolering av tak og loft. Basert på SINTEF (2005b).

Sperretak og loftsbjelkelag består i nyere boliger av bjelker med senteravstand 60 cm. Dette gir en treandel på om lag 8 % (SINTEF, 2005b). I eldre boliger er det gjerne uisolert kaldloft. Loftsbjelkelaget mot kaldloftet er da det isolerende sjiktet. Loftsbjelkelaget er sjeldent uisolert, men er i eldre boliger ofte isolert med stubbloftsleire (SINTEF, 2005b). I nyere boliger er stubbloftet fylt med mineralull (Mjønes et al., 2012). Et stubbloft er av Standard Norge (2009) definert som "bord eller plater mellom gulvbjelkene for å bære isolasjonsmaterialer".

I senere tid har det vært vanlig å bygge boliger med oppvarmet loft. Sperretaket blir da det isolerende sjiktet. Mineralull er det vanligste isolasjonsmaterialet for en slik løsning (Mjønes et al., 2012; SINTEF, 2005b). I boligblokker er taket som regel isolert med trykkfast mineralull over betongdekket (Mjønes et al., 2012; SINTEF, 2007b). Det anbefales da å etterisolere på oversiden og legge nytt takbelegg (SINTEF, 2007b).

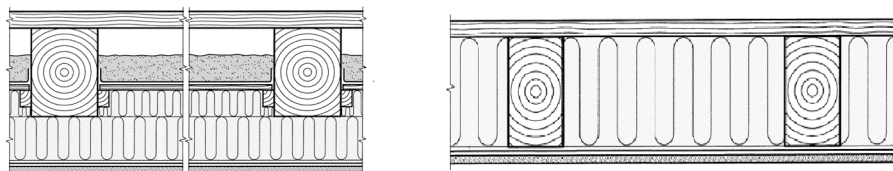
Til venstre i Figur 2.7 er det vist et sperretak. Sperretak etterisoleres ved å legge isolasjonen i takplanet mellom sperrene. For isolasjonstykkelser over sperrenes dimensjoner må sperrene fores ut. Det vanligste er å fore ut på undersiden. Dette krever som oftest ny himling. Ved etterisolering av sperretak er det nødvendig å etablere lufting av taket på utsiden av isolasjonen. Det anbefales også her å benytte prinsippet om tottrinns tetting (SINTEF, 2005b).

Til høyre i Figur 2.7 er det vist et loftsbjelkelag mot kaldloft. Etterisoleringen kan enten legges oppå eksisterende isolasjon eller ved å fjerne eksisterende stubbloft og legge isolasjonen mellom bjelkelaget. Om etterisoleringen gjøres fra oversiden

bør eksisterende gulvbord fjernes. Mineralullsplater legges direkte på eksisterende isolasjon. Det er også aktuelt å benytte utblåsing av løssullisolasjon for etterisolering av kaldloft. Om loftet blir benyttet til lagring kan det være nødvendig å fore opp bjelkene for å legge gulvbord over isolasjonsmaterialet. (SINTEF, 2005b). Legges isolasjonen mellom bjelkelaget er det nødvendig å legge nytt gulv eller ny himling (SINTEF, 2005b).

2.7.3 Etterisolering mot kald kjeller og kryprom

Figur 2.8 viser en skisse hvor det er gjennomført etterisolering av trebjelkelag mot kald kjeller eller kryprom. I følge Mjønes et al. (2012) er eldre boliger ofte bygget med et trebjelkelag mot en kald kjeller, isolert med stubbloftsleire. I eneboliger og småhus fra omtrent 1980 er bjelkelaget ofte fylt med mineralull. Nyere boliger er ofte bygget uten kald kjeller eller kryprom og i disse boligene er det ofte en betongplate direkte på grunnen, isolert med ekspandert polystyren (Mjønes et al., 2012; SINTEF, 2004b).



Figur 2.8 To prinsipper for etterisolering av gulv mot kald kjeller. Basert på SINTEF (2004b).

Til venstre i Figur 2.8 er det vist etterisolering av et trebjelkelag med stubbloftsfill. Etterisoleringen er gjort på undersiden av stubbloftet. Dette er av fukthensyn foretrukket fremfor å etterisolere på oversiden. Isolasjonsmatter legges direkte mot stubbloftet. Avhengig av dimensjonene på stubbloftet og ønsket isolasjonsmengde er det i noen tilfeller nødvendig å fore ned bjelkelaget. Ny himling og vindsperre legges under mineralullen (SINTEF, 2004b).

Til høyre i Figur 2.8 er det vist etterisolering av et trebjelkelag hvor stubbloftsfyllet er fjernet. Dette egner seg i de tilfellene hvor det, ofte på grunn av plassmangel, ikke er ønskelig å fore opp eller ned bjelkelaget. Ny himling eller gulvbord må påberegnes (SINTEF, 2004b).

Etterisolering av betongdekker på grunnen kan utføres på tre måter. Den første er trykkfast isolasjon direkte på dekket med en påstøp på toppen. Den andre er trykkfast isolasjon med plategulv lagt direkte på isolasjonen. Den tredje metoden er oppføring med tilfarergulv, med isolasjon mellom tilfarerne. Tilfarergulv er oppført gulv på et fast dekke (SINTEF, 2009)

2.7.4 Fremtidens bygningsmaterialer

Levetid er en sentral faktor ved vurdering av energibesparende tiltak. Mens bygningsmassen kan ha en levetid fra 50 år og oppover, kan komponenter i bygningen ha kortere levetid (Novakovic et al., 2007). Novakovic et al. (2007) anslår at ulike komponenter i forbindelse med en oppgradering kan ha en økonomiske levetid på 10 - 40 år. Samtidig er det viktig å være klar over at økonomisk levetid ikke nødvendigvis samsvarer med teknisk levetid (Novakovic et al., 2007)

Den lange levetiden til bygningsmaterialer fører til at dagens teknologi blir bygget inn i bygninger for en lang tidsperiode. IPCC (2014b) argumenterer for at selv i de mest ambisiøse oppgraderingsplanene vil gammel teknologi være bygget inn i bygninger for flere tiår. En konsekvens av dette er en økning i fremtidige akkumulerte utslipp. I følge IPCC (2014b) kan en hurtig implementering av state-of-the-art bygningsmaterialer bidra til å minke effekten av innebygde utslipp.

Isolasjonsmaterialer

For å nå fremtidige målsetninger om redusert energibruk i bygningsmassen spiller ulike bygningsdelers varmemotstand en sentral rolle (Jelle, 2011). En stor økning i bygningers generelle varmemotstand er nødvendig for å nå ambisiøse målsetninger. Med tradisjonelle bygningsmaterialer fører det til økt veggtykkelse og store mengder isolasjon. Dette er lite hensiktsmessig. Jelle (2011) trekker frem volum- og arealproblemer med hensyn på både økonomi, transport, bygningsrestriksjoner og materialbruk som grunner til det. Fremtidens bygningsmaterialer kan være med på å løse de overnevnte problemene (Jelle, 2011).

Et av de mest lovende isolasjonsmaterialene, men som fortsatt er under utvikling, er i følge Jelle (2011) nanoisolasjonsmaterialer (NIM). Blant teknologiene som allerede er på markedet i dag er det vakumisolerte paneler (VIP) som har høyest energibesparende potensialet. VIP har i dag en varmekonduktivitet fra 0,004 W/mK, ved optimale forhold, til 0,008 W/mK, etter 25 års levetid (Kalnæs & Jelle, 2014). Til sammenlikning har vanlig mineralull en varmekonduktivitet på 0,035 W/mK (Plessner, 2013). Redusert varmemotstand over tid er en av de store ulempene med VIP. VIP består av en porøs kjerne som er omsluttet av en luft og damptett folie. Panelene er derfor sårbare for perforering. En perforert plate vil føre til en økning i varmegjennomgangstallet til 0,020 W/mK (Kalnæs & Jelle, 2014). VIP gir også utfordringer ved montering da de ikke kan tilpasses på byggeplassen.

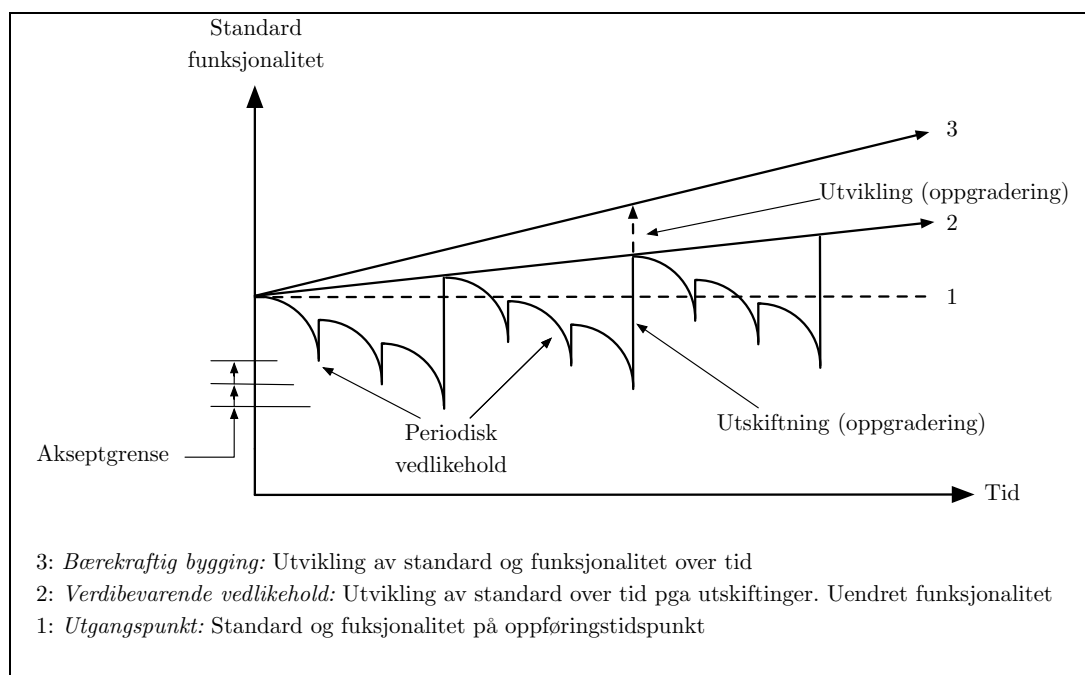
NIM er i hovedsak et homogent materiale med nanoporestruktur. Varmekonduktiviteten er under 0,004 W/mK ved optimale forhold. En av de store fordelene ved NIM er at isolasjonsevnen ikke blir påvirket ved inntrenging av gass

eller vanddamp i porestrukturen. Det gjør at materialet tåler perforering og kan tilpasses på byggeplass uten at det forringes. Jelle (2011) trekker frem NIM som en av fremtidens mest lovende isolasjonsmaterialer.

2.7.5 Oppgraderingssykluser

Bygningsmaterialer har en begrenset levetid. Denne levetiden er ofte kortere enn byggets levetid. For å opprettholde en bygnings kvalitetsnivå er det nødvendig å gjennomføre vedlikehold. Vedlikehold kan både være periodisk og planlagt eller løpende og ikke planlagt (Novakovic et al., 2007). Figur 2.9 viser periodisk vedlikehold. I figuren er det også vist akseptgrenser for når vedlikeholdstiltaket må gjennomføres.

Ved periodisk vedlikehold øker ikke kvalitetsnivået over det opprinnelige nivået for bygget. Det opprinnelige nivået er vist med tallet "1" i figuren. For å øke kvalitetsnivået over det opprinnelige nivået er det nødvendig med en oppgradering (Novakovic et al., 2007). En oppgradering kan skje opp til et verdibevarende nivå eller opp til et nivå som øker byggets verdi. Disse to nivåene er vist som henholdsvis "2" og "3" i Figur 2.9.



Figur 2.9 Oppgraderings- og vedlikeholdssykluser for boliger. Basert på Evjenth et al. (2011).

FNs klimapanel understreker behovet av en umiddelbar utskiftning og oppgradering av boligmassen for å redusere det akkumulerte klimagassutslippet fra boligmassen (IPCC, 2014b). I følge Evjenth et al. (2011) er oppgraderinger som etterisolering sjeldent lønnsomt om etterisoleringen ikke gjøres sammen med annet vedlikehold. FNs klimapanel mener på sin side at energioppgraderinger ikke

kan vente på annet vedlikehold (IPCC, 2014b). For å oppnå det største energibesparende potensialet og størst reduksjon i akkumulerte klimagassutslipp er det nødvendig å oppgradere til nivå "3" i Figur 2.9. IPCC (2014b) kaller det ambisiøse oppgraderinger.

2.8 Miljøvurdering av bygg

Som det forklares i kapittel 1.1 *Bakgrunn* foregår det i mange land en utvikling mot å legge mer vekt på miljøvennlige produkter og prosesser (Fossdal, 2000). Dette er også en naturlig følge av samfunnets økte fokus på bærekraft. Livsløpsanalyse av bygninger og produkter har kommet som et resultat av behovet for miljøvurderingsmetoder (Fossdal, 2000). På engelsk brukes begrepet Life Cycle Assessment (LCA) for livsløpsanalyse. LCA er kort oppsummert en helhetlig miljøvurdering av et produkt, bygning eller tjeneste.

2.8.1 Livsløpsanalyse som metode

Standard Norge (2006) definerer livsløpsanalyse som: "Sammenstilling og evaluering av inngangsfaktorer, utgangsfaktorer og de potensielle miljøpåvirkningene til et produktsystem gjennom dets livsløp." Fossdal (2000) mener på sin side at livsløpsanalyse er en metode for å bedømme miljøaspekter og potensielle miljøpåvirkninger gjennom et produkts livsløp. Med livsløp mener Fossdal (2000) fra utvinning av råvarer, via produksjon og bruk, frem til avhending.

En livsløpsanalyse gir informasjon om hvor i livsløpet et gitt produkt gir størst miljøbelastning og hva miljøbelastningen kommer av. Slik informasjon hjelper beslutningstakere å gjennomføre tiltak for å redusere miljøbelastningene (Marton, 2009). For en bygning vil en klimagassanalyse i et livsløpsperspektiv inkludere utslipp fra (Selvig, 2011):

- materialer (produksjon og transport),
- bygging (konstruksjonsfasen) inkl. eventuel rivning ved oppgradering,
- energibruk i driftsfasen,
- transport av brukere (beboere, besøkende, ansatte,) til og fra bygget i driftsfasen.

Metoden for å gjennomføre en livsløpsanalyse er beskrevet i "NS-EN ISO 14040:2006, Miljøstyring - Livsløpsvurdering - Prinsipper og rammeverk" (Standard Norge, 2006). Metoden består av følgende fire faser (Standard Norge, 2006):

- fastsettelse av hensikt og omfang for studiet,
- livsløpsregnskap,
- livsløpseffektvurdering,
- livsløpstolkning.

Livsløpsanalyse er en iterativ teknikk hvor de enkelte fasene i analysen benytter informasjon fra de andre fasene. Denne fremgangsmåten bidrar til fullstendighet og konsistens i livsløpsanalysen (Selvig, 2011).

I følge Standard Norge (2006) er livsløpsanalyse en av flere miljøstyringsteknikker. Det er derimot ikke nødvendigvis den mest hensiktsmessige å bruke i alle situasjoner hvor en ønsker å vurdere bygninger. Standard Norge (2006) trekker blant annet frem at analysen ikke tar hensyn til de økonomiske og de sosiale aspektene ved et produkt eller bygning.

2.8.2 Livsløpsanalyse av bygninger

Livsløpsanalyse fungerer som et verktøy for å vurdere og sammenligne ulike produkters miljøpåkjenning. For en bygning kan analysen gi beslutningstagere bedre grunnlag for å ta avgjørelser med riktige og ønskelige miljøpåvirkninger. I miljøsammenheng skiller bygninger seg fra andre produkter ved at de har lang levetid (Rønning et al., 2011). En livsløpsanalyse av bygninger og bygningsmaterialer er derfor en omfattende og kompleks prosess, hvor det er nødvendig å gjøre en rekke antagelser om hendelser langt frem i tid (Fossdal, 2000).

Klimagassutslipp fra bygninger knyttes i stor grad til energibruk i driftsperioden. Blant annet gjennom stadig strengere energikrav i forskrifter har energibruken til bygninger i driftsperioden gått ned. Det innebærer at energien som går med til å produsere, transportere og sette opp bygget relativt sett får en større betydning i en livsløpsanalyse (Rønning et al., 2011).

2.8.3 Livsløpsvurdering av materialer og komponenter

Strengere energikrav til bygninger gir i de fleste tilfeller økt materialbruk på grunn av eksempelvis økte isolasjonstykkelser. Økt materialbruk bidrar til økte utslipp av klimagasser gjennom produksjon og transport av materialene (Selvig, 2011). Dette gjelder ikke bare nye boliger, men også til viss grad for oppgradering av eksisterende boliger.

Selvig (2011) mener at eksisterende materialer i oppgraderingsprosjekter allerede er "avskrevet" og at det kun er tilførte materialer som bidrar med økt utslipp. Ofte påvirker derfor andelen av eksisterende materialer og komponenter, som gjenbrukes, i stor grad bygningens totale miljøpåvirkning.

Bundet karbon

Hittil i oppgaven er det fokusert på bundet energi ved vurdering av materialers miljøpåvirkning. Bundet karbon er også et mye brukt begrep og beregnes ofte etter de samme retningslinjene som bundet energi. Benevnelsen som brukes for

bundet karbon er i de fleste tilfellene CO₂-ekvivalenter og forkortes gjerne som CO₂-ekv. (BuildingGreen, 2011).

Bundet karbon representerer karbonfotavtrykket til et materiale og dette fotavtrykket er ansett som en viktig faktor i en bygnings- og bygningsmaterial-kontekst (Hammond, G. P. & Jones, C. I., 2008). Bundet karbon uttrykker hvor mye klimagasser som slippes ut gjennom et materials livsløp. Mye av klimagassutslippet kommer direkte fra energibruk fra produksjon, utvinning og transport, men ikke nødvendigvis alt (BuildingGreen, 2011).

Systemgrensene for bundet karbon er i stor grad de samme som for bundet energi. Vugge til port og vugge til byggeplass er de to mest brukte systemgrensene. Vugge til grav, som er den mest komplette, brukes også (Circular Ecology, 2014). De ulike systemgrensene er definert i kapittel *2.3.2 Driftsenergi*.

2.9 Miljøverktøy

I kapittel 2.3 *Energiforbruk i bygg* er det forklart at livssyklusenergien i en bolig kan deles i driftsenergi og bundet energi. For å bestemme den bundne energien i bygningmaterialer finnes det ulike verktøy. Disse verktøyene skal hjelpe brukeren med å gjøre miljøvurderinger av byggeprosessen og produkter. Verktøyene varierer i type, omfang og tiltenkt bruk og i dette kapitlet er ulike verktøy presentert. Det er valgt å skille verktøyene i de tre kategoriene: analyseverktøy, miljødeklarasjoner og materialdatabaser.

2.9.1 Analyseverktøy

I dette kapitlet presenteres to analyseverktøy for en fullstendig livsløpsanalyse av bygninger.

SimaPro

SimaPro er et utbredt program for å gjennomføre livsløpsanalyser. Programmet egner seg til å analysere og overvåke miljøytelsen til produkter og tjenester (PRé, u.å.). Programmet er anerkjent for sin bredde i analysemetoder. Det gir muligheter for å vurdere miljøpåkjenninger basert på ulike vinklinger (EPLCA, 2014).

SimaPro er utviklet av det nederlandske selskapet PRé. Programmet er modulbasert og analysene bygges opp trinnvis ved hjelp av moduler med tilhørende egenskaper og mengder (SINTEF, 2010a). En undersøkelse gjort av Holthe et al. (2011) viser at SimaPro er det mest brukte miljøverktøyet i Norge.

Klimagassregnskap.no

Klimagassregnskap.no (KGR) er et web-basert verktøy utviklet av Statsbygg som beregner helhetlige klimagassutslipp for bygninger. Utviklingen av KGR ble startet i 2006. Web-portalen er gratis og åpen for alle. For prosjekter i regi av Statsbygg kreves det i dag klimagassberegninger ved hjelp av KGR (Statsbygg, 2012). Verktøyet er i tillegg det eneste godkjente verktøyet for klimagassberegninger i BREEAM-NOR (Statsbygg, u.å.).

Programmet består av seks ulike moduler og informasjonen er hentet fra nasjonale og internasjonale studier. I programmet er klimagassutslipp oppgitt som kgCO₂-ekv. per mengde bygningsmaterialer (Civitas, 2007). Hovedkildene til materialverdiene er ICE-databasen og European Reference Life-Cycle Database (Statsbygg, 2012). Tallene representerer i hovedsak snittverdier for Europa, men reflekterer i stor grad utslippene i Norge (Civitas, 2007). Systemgrensene som brukes er vugge til port, som innebærer at alle utslipp frem til fabrikklokalets port er medregnet.

Materialdatabasen i KGR inneholder bare basismaterialer. Basismaterialer regnes i denne sammenhengen som det bygningsmaterialer består av. Treverk er et eksempel på et basismateriale, mens et vindu består av flere basismaterialer. Siden KGR bare inneholder basismaterialer finnes det ingen egen modul for å beregne utslipp fra tekniske anlegg (Statsbygg, 2012). Statsbygg (2012) hevder at bidraget fra tekniske anlegg er mindre enn 1 - 2 % av det totale utslippet. På den andre siden er det en økende mengde av tekniske installasjoner i dagens bygninger. Det er derfor naturlig at denne andelen vil øke med tiden (Statsbygg, 2012).

2.9.2 Miljødeklarasjoner

Den andre kategorien for miljøverktøy er miljødeklarasjoner. I følge SINTEF (2010a) er hensikten med en miljødeklarasjon å dokumentere et produkts miljøprofil. En slik dokumentasjon er ment for å stimulere byggevareprodusenter, byggenæringen og forbrukere til å velge miljøeffektive materialer og løsninger. International Organization for Standardization (ISO) er ansvarlig for retningslinjene som ligger til grunn for miljødeklarasjoner og miljømerker. Retningslinjene som er utviklet for norske miljødeklarasjoner er basert på følgende standarder (EPD-Norge, 2004; EPD-Norge, 2014):

- ISO 21930 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products
- NS-EN ISO 14020 Miljømerker og deklarasjoner - Generelle prinsipper
- NS-EN ISO 14024 Miljømerker og deklarasjoner - Prinsipper og prosedyrer
- NS-EN ISO 14025 Miljømerker og deklarasjoner - Miljødeklarasjoner type III - Prinsipper og prosedyrer
- NS-EN ISO 14040 Livsløpsvurderinger - Prinsipper og rammeverk
- NS-EN ISO 14044 Livsløpsvurdering - Krav og retningslinjer

I tillegg til disse standardene brukes "NS-EN 15804 Bærekraftige byggverk - Miljødeklarasjoner - Grunnleggende produktkategoriregler for byggevarer" i forbindelse med sertifisering av byggevarer (EPD-Norge, 2014).

EPD

EPD er en forkortelse for Environmental Performance Declaration. Forkortelsen brukes også for den norske betegnelsen "miljødeklarasjon" (Vold et al., 2005). Miljødeklarasjoner gir en kortfattet oppsummering av miljøprofilen til en komponent, et ferdig produkt eller en tjeneste på en standardisert og objektiv måte (EPD-Norge, u.å.-b). Både verdier for bundet energi og karbon er inkludert i en EPD. Gjennom livsløpet til materialer og komponenter slippes det ut både klimagasser og det forbrukes energi. Utslippskoeffisienter for omregning fra energi

til klimagasser og fra klimagasser til energi brukes for å betegne produktenes bundne karbon og bundne energi.

I følge EPD-Norge (2011) er det ikke konsensus for hvilke utslippskoeffisienter som skal bli benyttet i norske EPDer. For å få til en konsistent vektning har EPD-Norge bestemt at en nordisk energimiks skal bli benyttet ved vurdering av utslippskoeffisienter. Denne fastsettelsen av utslippskoeffisienter stammer fra en rapport utarbeidet av Teknisk komite i EPD-Norge. Rapporten slår fast at nordisk energimiks gir de mest reelle verdiene for klimagassutslipp fra produksjon av energi for materialer brukt i Norge (EPD-Norge, 2011). Utslippskoeffisienter er videre omtalt i kapittel *2.10 Klimagassutslipp*.

EPDer er utformet på grunnlag av livsløpsanalyser produsert etter ISO 14040 - 14044-standarden. En slik standardisering skal sikre at informasjon om produkter innen samme produktkategori lar seg sammenlikne (EPD-Norge, u.å.-b). Etter ISO-standarden skal produkter innen samme kategori deklarereres etter de samme reglene. Det kalles produktkategoriregler (PCR) (EPD-Norge, 2004).

I Norge er det Næringslivets stiftelse for miljødeklarasjoner som er ansvarlige for utforming, drift og oppfølging av EPD-systemet (EPD-Norge, 2014). I stiftelsen sitter det representanter fra myndighetene, forskningsmiljøer og offentlige og private virksomheter (SINTEF, 2010a).

Det har de siste årene vært en økning i antall norske EPDer (Nilsen, 2013). Tidligere har EPD-Norge vært avhengig av informasjon hentet fra europeiske databaser. Overgangen til norske EPDer har ført til at usikkerheten rundt de europeiske verdiene har fått en mindre betydning. Dette er med på å sikre konsistente data (Nilsen, 2013).

2.9.3 Materialdatabaser

Den tredje kategorien av miljøverktøy er materialdatabaser. Materialdatabaser inneholder store mengder data om produkters miljøprofil. Den store mengden data kan gjøre det vanskelig for brukeren å vurdere hva som er ”gode” og hva som er ”dårlige” data. Materialdatabaser kan enten brukes alene for å hente ut miljøinformasjon om enkelte materialer eller sammen med analyseverktøy som SimaPro (De Smet & Stalmans, 1996).

ICE Databasen

Inventory of Carbon and Energy (ICE) er en database utviklet ved Universitetet i Bath i England. Databasen inneholder informasjon om bygningsmaterialers bundne karbon og energi. Databasen har i dag over 200 ulike materialer, som er delt inn i overkant av 30 hovedgrupper (Circular Ecology, 2011).

Informasjonen om materialene er samlet inn fra sekundære kilder. Kildene som er brukt er blant annet vitenskapelige artikler, LCA-analyser, bøker og konferanse-papirer (Hammond, G. & Jones, C., 2008). Vugge til port er den vanligste systemgrensen i informasjonsgrunnlaget og databasen baserer seg derfor i stor grad på denne systemgrensen (Hammond, G. & Jones, C., 2008).

Databasen ble opprinnelig finansiert av organisasjonene Carbon Trust og Engineering and Physical Sciences Researcher Council (Hammond, G. & Jones, C., 2008). I de senere årene har utviklerne av databasen mistet finansiell støtte og databasen utvikles derfor ikke med ny informasjon (Capper et al., 2012).

En annen innvending mot databasen er at den inneholder lite bygningsmaterialer (Capper et al., 2012). I likhet med KGR inneholder ICE-databasen kun basis-materialer. Kritikere av databasen mener at en slik oppbygning gjør databasen vanskelig å bruke. Denne påstanden støttes av Civitas (2007). Civitas (2007) mener et klimariktig valg først tas når det er mulig å sammenligne utslipp direkte per bygningselement.

Norsk Prisbok

Norsk Prisbok er et oppslagsverk for den norske byggebransjen, utviklet av Norconsult Informasjonssystemer AS og AS Bygganalyse (2013). Prisboken består av en produktdatabase med informasjon om produktpriser og verdier for produkters bundne karbon (Prisbok, u.å.). Oppslagsverket ble lansert i november 2010 og har per dags dato over 4000 registrerte brukere. Blant brukerne finnes entreprenører, rådgivere, arkitekter og byggherrer (Prisbok, u.å.).

2013-versjonen av boka inneholder en omfattende oppdatering av materialers bundne karbon, samt en økning fra 70 til 138 materialer (Jensen et al., 2013). Etter en omfattende analyse av tilgjengelige materialdata, og sammenligning med KGR, har Norsk Prisbok valgt å bytte til EPDer som hovedkilde for miljøinformasjon (Jensen et al., 2013). I tillegg til godkjente EPDer er norske og nordiske enkeltprodusenter, KGR og europeiske materialdatabaser benyttet som informasjonskilder. I de tilfellene Prisboken har brukt informasjon fra andre enn EPD-Norge har fortsatt nordisk energimiks blitt benyttet. En slik fremgangsmåte gjør metoden sammenlignbar med klimagassregnskap.no og EPDer (Nilsen, 2013).

Tallene for klimagassutslipp i Prisboken er inkludert medgått energi under produksjon av materialene (Nilsen, 2014). Det tilsvarer systemgrensen vugge til port.

2.9.4 Materialelegenskaper

I Tabell 2.20 er bundet karbon og bundet energi vist for henholdsvis tekniske installasjoner og materialer. Disse materialelegenskapene er basert på informasjon fra både miljødeklarasjoner og miljødatabaser. Utfyllende informasjon om installasjonene og materialene finnes i vedlegg 2.

I tabellen blir funksjonell enhet (FE) brukt til å beskrive en materialmengde. Funksjonell enhet er en kvantifisert beskrivelse av et produktsystem og benyttes som referansenhet i livsløpstudier (EPD-Norge, 2004).

Tabell 2.20 Bundet energi og karbon for bygningsmaterialer.

Material	Bundet energi og bundet karbon					Systemgrense*
	Funksjonell enhet (FE)	Bundet energi		Bundet karbon***		
		<i>kWh/FE</i>	<i>kWh/kg</i>	<i>kg CO₂-ekv/FE</i>	<i>kg CO₂-ekv/kg</i>	<i>grense</i>
Dampsperre ^{i, j}	A = 1 m ² t = 0,15 mm	3,5	24,8	0,36	2,6	port
Fugemasse ^k	V = 300 mL	10,9	45,3	2,29	9,5	byggeplass
Gipsplate ^u	A = 1 m ²	12,7	1,4	2,66	0,3	grav
Isolasjon ^l	A = 1 m ² t = 0,035 m	5,4	9,4	0,76	1,3	grav
Kledning ^m	A = 1 m ²	46,1	-	5,60	-	grav
Takbelegg ^o	A = 1 m ²	30,0	-	3,90	-	grav
Panel ^m	A = 1 m ²	8,9	-	8,90	-	grav
Puss ⁿ	M = 1 kg mørtel	0,4	0,4	0,13	0,1	port
Stenderverk ^{o, p}	V = 1 m ³	681,9	1,5	37,30	0,1	grav
Varepumpe ^{s, t}	Komplett 4 kW pumpe	91,8	-	30,90	-	port**
Ventilasjon ^{s, t}	A = 1 m ² V = 1 m ³ /h	0,6	-	0,02	-	port**
Vindsperre ^{q, j}	A = 1 m ²	1,4	23,1	0,15	2,5	port
Vinduer ^r	A = 1,23 x 1,48 m U = 1,2 W/m ² K	342,9	-	122,42	2,2	grav

i) (GLAVA AS, 2013)

j) (Jones, 2011)

k) (Vold, 2006)

l) (Plessner, 2013)

m) (Grini, 2010b)

n) (Vold, 2009)

o) (Sørnes, 2012)

p) (*Treteknisk håndbok*, 2009)

q) (Isola, 2008)

r) (Sørnes, 2013a)

u) (Holme & Gjerlow, 2011)

v) (Grini, 2010a)

o) (Sørnes, 2013b)

s) (Jensen et al., 2013)

t) (Nilsen, 2014)

* Alle systemgrensene er fra vugge til port, byggeplass eller grav.

** Norsk prisbok opererer med en noe modifisert vugge til port systemgrense.

*** CO₂-ekv. er forklart i kapittel 2.10 Klimagassutslipp.

2.10 Klimagassutslipp

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er det presentert to forskningsspørsmål om henholdsvis reduksjonspotensialet av klimagasser og fremtidige mål om klimagassreduksjon. I dette kapittelet er det gitt en innføring i klimagasser og en metode for omregning av energi til klimagassutslipp.

Den naturlige drivhuseffekten er avgjørende for liv på jorda. Atmosfæren sørger for at energitustrålingen fra jorda begrenses ved å reflektere langbølget stråling. På grunn av drivhuseffekten er gjennomsnittstemperaturen på jordoverflaten omtrent 30 grader høyere enn den ville vært uten. Virkningen av drivhuseffekten avhenger av mengden drivhusgasser i atmosfæren. De vanligste drivhusgassene er CO₂ og metan, og kalles gjerne for klimagasser. En økning av konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren fører til at mindre refleksjonsstråling slippes ut av atmosfæren og temperaturen på jordoverflaten øker (Meld. St. 21, 2012). Det er derfor nødvendig å begrense utslippene av klimagasser i atmosfæren for å redusere den globale oppvarmingen.

Utslipp av klimagasser skjer hovedsakelig fra produksjon av energi ved forbrenning av fossilt brensel. I den norske boligmassen benyttes fossilt brensel oftest til produksjon av varme (Novakovic et al., 2007). Mengden klimagasser som slippes ut ved produksjon av energi avhenger mye av energibæreren og energikilden. Vannkraft er en energikilde som slipper ut lite klimagasser (Meld. St. 21, 2012). Klimagassutslipp fra vannkraft er i stor grad relatert til etablering og bygging av kraftverket (Arnøy, 2013). Olje er på den andre siden en energibærer som slipper ut mye klimagasser (Meld. St. 21, 2012). For å definere klimagassutslippet til en energibærer er det vanlig å benytte en utslippskoeffisient (Wolfgang & Mo, 2007). Utslippskoeffisienten indikerer klimagassutslippet i forhold til energiforbruken, uttrykt som kgCO₂-ekv/kWh. CO₂-ekv. er et uttrykk for klimagassenes oppvarmingsevne basert på oppvarmingsevnen til CO₂-gass (Enova, u.å.-a).

Hoveddelen av elektrisiteten til norske boliger kommer fra vannkraft. Utslipp av klimagasser fra vannkraftsprodusert elektrisitet er lav. Utbygging av gasskraftverk på Mongstad og Kårstø har i senere tid økt utslippskoeffisienten for norskprodusert elektrisitet (Meld. St. 28, 2012). Tabell 2.21 viser utslippskoeffisienten til elektrisitet produsert med vannkraft og for elektrisitet produsert i Norge.

I kapittel 2.9.2 *Miljødeklarasjoner* er det argumentert for at det ikke er konsensus for om norsk, nordisk eller europeisk energimiks skal benyttes ved omregning av energi til klimagassutslipp. EPD-Norge gir på sin side anbefaling om at utslippskoeffisienten for nordisk energimiks benyttes ved slik omregning (EPD-Norge,

2011). Norge er i dag en del av et nordisk kraftmarked, hvor det både eksporteres og importeres kraft fra de andre nordiske landene (Meld. St. 21, 2012; NordPool, 2013). Utslippskoeffisientene for nordisk og europeisk energimiks er vist i Tabell 2.21

Tabell 2.21 Utslippskoeffisienter for ulike energibærere.

Koeffisient	Utslipp av CO ₂ -ekvivalenter etter energibærer/ energikilde						
				Elektrisitet ^{ε,ζ}			
	Oljekjel ^{α,β}	Fjernvarme ^{β,γ}	Ved ^{δ*}	Vannkraft	Norsk	Nordisk	Europeisk
<i>g/kWh</i> **	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>	<i>g/kWh</i>
Utslippskoeff.	280 - 290	100 - 150	0	3	40	181	432
α) (U.S. Environmental Protection Agency, 2008)	β) (Raaholdt, 2011)				γ) (Hamnaberg & Selfors, 2010)		
δ) (Novakovic et al., 2007)		ε) (Arnøy, 2013)				ζ) (EPD-Norge, u.å.-a)	

* Transport av ved medfører klimagassutslipp. På grunn av manglende informasjon er det utelatt.

** *gCO₂-ekv/kWh* er forkortet som *g/kWh*

I en stor andel av norske boliger benyttes andre energibærere enn elektrisitet for oppvarming. Energibærere for oppvarming av den norske boligmassen er i stor grad fyringsolje, fjernvarme og ved (Mjønes et al., 2012; Myhre, 1995). Tabell 2.21 viser utslippskoeffisientene for olje, fjernvarme og ved. Tabellen viser at olje har et høyt utslipp av klimagasser. Det er noe av grunnen til at myndighetene ønsker å fase ut oljekjeler for oppvarming, som omtalt i kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* (Meld. St. 21, 2012; TEK10, 2010). Vedfyring, på sin side, er i tabellen oppgitt uten utslipp. Dette begrunnes med at CO₂-mengden som slippes ut ved treforbrenning er den samme CO₂-mengden som blir bundet opp i trær gjennom vekstfasen. Enkelte argumenterer derimot for at forbrenning av ved slipper ut noe metan og lystgass, som bidrar til drivhuseffekten (Haakonsen & Kvingedal, 2001). Novakovic et al. (2007) argumenterer allikevel for at vedfyring er uten klimagassutslipp.

I kapittel 1.1 *Bakgrunn* er det argumentert for at bygninger står for 36 % av klimagassutslippene i EU. Bygninger er også utpekt som et av de viktigste satsningsområdene for å redusere klimagassutslippene. I følge IPCC (2014d) må utslipp av klimagasser halveres innen år 2040 for å nå 2-gradersmålet. I 2013 var utslippet av klimagasser fra den norske boligmassen på 5,4 millioner tonn CO₂-ekv. (SSB, 2014b).

2.11 Endringer i boligmassen

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål fire presentert. Dette forskningsspørsmålet handler om Norges fremtidige boligmasse. Boligmassen er kontinuerlig i endring og boliger oppgraderes, utvides, rives og bygges nye. For å kunne analysere den fremtidige boligmassen i Norge er det nødvendig å ha en modell for hvordan boligmassen utvikler seg. Kohler og Hassler (2002) trekker frem at det foreligger lite strukturert forskning rundt endringer i bygningsmasser generelt. Med endringer menes rivning, nybygging og oppgradering. Kohler og Hassler (2002) presenterer flere metoder for å fremskrive endringer i boligmassen. To av de mest aktuelle metodene er lineær og dynamisk analyse.

2.11.1 Lineær trendanalyse

Kohler og Hassler (2002) trekker frem lineære trendanalyser som en *ex ante* metode for å simulere bygningsmassens utvikling. *Ex ante* vil si at systemets fremtidige oppførsel simuleres med bakgrunn i tidligere utvikling. Metoden er blant annet brukt av Lavenergiutvalget (2009), Evjenth et al. (2011), Arnstad et al. (2010) og Thyholt et al. (2009).

Ved lineære trendanalyser av boligmassen anses endringer å være en lineær funksjon av nybyggrate, oppgraderingsrate og rivningsrate. Nybyggrate uttrykker antall nye bygg i året. Oppgraderingsrate betegner alle bygg som oppgraderes i året, mens rivningsrate uttrykker hvor mange bygg som rives i året. Alle nye bygg må ha godkjent byggesøknad i en kommune. Tilgjengelige tall for nybyggrate antas derfor å være gode. Oppgraderingstiltak, på den andre siden, er ikke søknadspliktige. Det finnes heller ingen oversikt over bygg som rives. Verdier for oppgraderingsrater og rivningsrater er derfor beheftet med usikkerhet (Kohler & Hassler, 2002; Lavenergiutvalget, 2009). Lavenergiutvalget (2009) anslår at oppgraderingsraten i Norge er på omtrent 1,5 % for boligmassen.

Lineære trendanalyser av boligmassen representerer en tilnærming av en fremtidig utvikling. En innvending mot metoden er at den neglisjerer den dynamiske oppførselen til systemet. Bergsdal et al. (2007) trekker frem at metoden kan fungere godt i et kortere tidsperspektiv. Dette støttes også av Mjønes et al. (2012). Skal langsiktige trender analyseres mener Bergsdal et al. (2007) at dynamiske effekter kan gi signifikante endringer i resultatet. Dette trekkes også frem av Kohler og Hassler (2002) og Müller (2006).

Thyholt et al. (2009) benytter seg av en lineær trendanalyse for fremskriving av boligmassen. Thyholt et al. (2009) argumenterer for at boligmassen følger befolkningsveksten og benytter statistikker fra SSB for å fremskrive boligmassen.

SSB antar en lineær befolkningsvekst frem mot 2050. Thyholt et al. (2009) mener derfor at et lineært estimat av boligmassen er et godt estimat.

2.11.2 Dynamisk modell

Endringer i boligmassen kan også modelleres ved å bruke dynamiske modeller (Kohler & Hassler, 2002). Den dynamiske modellen som presenteres i denne oppgaven er utviklet av Müller (2006). Både Bergsdal et al. (2007) og Pauliuk et al. (2013) har siden brukt metoden til å modellere den norske boligmassen. En dynamiske modells styrke, i forhold til andre metoder, er at den tar hensyn til de dynamiske svingningene i boligmassen (Kohler & Hassler, 2002).

Metoden presentert av Müller (2006) baserer seg på at det er livsstilsparemetere som driver endringer i boligmassen. Livsstilsparemetere representeres ved blant annet antall personer per boenhet (B_b) og areal per boenhet (A_b) (Müller, 2006). Denne relasjonen anerkjennes også av Kohler og Hassler (2002). En modell for utviklingen til boligmassen kan bygges opp ved hjelp av tall for befolkningsutvikling. Sammenhengen mellom befolkningsutvikling, antall personer per boenhet, areal per boenhet og boligmassens totale areal er vist i Likning 1.

$$A_{tot} = B \times \frac{A_b}{B_b} \quad \text{Likning 1}$$

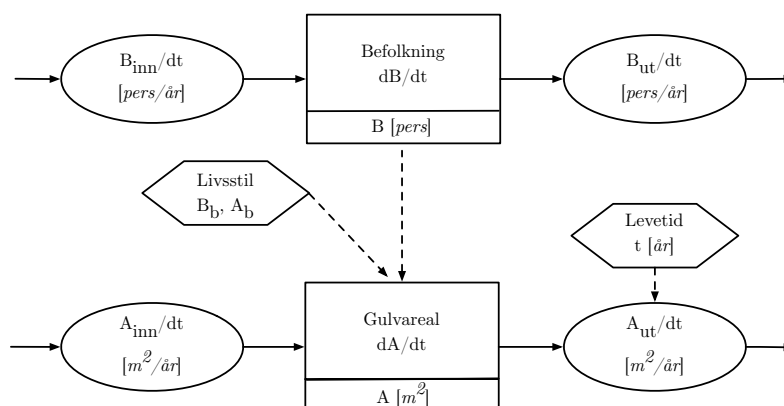
I Likning 1 uttrykker:

A_{tot}	totalt boligareal [m^2]
B	befolkningsmengde [<i>personer</i>]
A_b	areal per boenhet [m^2 / <i>boenhet</i>]
B_b	personer per boenhet [<i>personer/boenhet</i>]

Müller (2006) understreker at modellen har svakheter ved analyse av kortids-effekter, men at den følger langsiktige endringer bra.

Bergsdal et al. (2007) benytter metoden og modellen utviklet av Müller (2006) for å modellere fremtidige avfallsmengder fra den norske bygningsmassen. Modellen baserer seg på at det totale gulvarealet til boliger i Norge er drevet av befolkningsutviklingen og utviklingen av antall personer per areal. Ut fra dette lager Bergsdal et al. (2007) en arealfremskriving av boligmassen. Figur 2.10 viser en skjematisk fremstilling av modellen Bergsdal et al. (2007) benytter seg av.

Skjematisk fremstilling av endringer i boligmassen



Figur 2.10 Skjematisk fremstilling av metoden Bergsdal et al. (2007) bruker for å modellere boligmassens utvikling. I modellen er prosesser representert med rektangler, strømmer med sirkler, og drivere og bestemende faktorer med sekskanter. Fremstilling er tilpasset og viser ikke prosessene for avfallsmengder.

Tabell 2.22 presenterer verdier for arealfremskrivningen av boligmassen gjort av Bergsdal et al. (2007). Lav, middels og høy henviser til ulike scenarier for utvikling av befolkning, areal og person per bolig.

Tabell 2.22 Areal- og befolkningsfremskrivning av boligmassen. Basert på Bergsdal et al. (2007).

År	Boligmassens og befolkningens estimerte utvikling*				
	B	B_b	A_b	A_{inn}	A_{ut}
	[mill personer]		[m^2]	[mill m^2]	[mill m^2]
Lav					
2011**	4,74	2,14	122,7	-	-
2020	4,82	2,15	123,2	-	-
2040	5,11	2,16	120,0	-	-
Middels					
2011**	4,74	2,14	122,7	-	-
2020	4,96	2,11	123,2	25,0	3,1
2040	5,48	2,07	123,8	51,6	12,4
Høy					
2011**	4,74	2,14	122,7	-	-
2020	5,12	2,00	127,0	-	-
2040	6,03	1,84	131,4	-	-

* Verdiene er basert på figur: 2, 3, 4, 6 og 7 i Bergsdal et al. (2007).

** Folketallet i 2011 var i følge SSB (u.å.) 4,92 millioner. Per 2014 er folketallet i følge SSB (2014a) 5,11 millioner.

2.12 Optimalisering

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er det i forskningsspørsmål nummer to presentert en teori om at det er mulig å definere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå. Optimalisering handler om å løse et problem for å finne frem til en minimums- eller maksimumsløsning. En slik løsning kalles ofte problemets optimale løsning. Problemet som skal løses defineres av en eller flere *funksjoner*, basert på ett sett *variabler*. Problemets optimale løsning finnes ved å løse funksjonene for alle mulige verdier av variablene, for så å gjennomføre en vekting mellom funksjonene (Bandyopadhyay & Saha, 2012).

Optimalisering kan grovt sett deles inn i to metoder avhengig av hvor mange funksjoner som skal optimaliseres. Slike funksjoner kalles gjerne *objectives*. Optimalisering kan da deles inn i single- og multi-objective-optimalisering. Den optimale løsningen av en single-objective-optimalisering finnes ved å løse én funksjon, mens løsningen av en multi-objective-optimalisering finnes av å løse flere funksjoner (Lepš, 2004). Optimaliseringen er ikke å regne som multi-objective hvis optimalisering av en funksjon automatisk medfører optimalisering av de andre funksjonene (Bandyopadhyay & Saha, 2012). I slike tilfeller er det en single-objective-optimalisering. En vanlig metode for å løse et multi-objective-optimaliseringsproblem er å dele problemet opp i single-objective-problemer. Hvert single-objective-problem løses isolert. Løsningen av hvert single-objective-problem summeres til slutt opp som en løsning på multi-objective-problemet (Lepš, 2004). Løsningen på et multi-objective-problem er derfor ofte ikke én løsning, men en samling av flere løsninger som hver er en nær optimal løsning (Lepš, 2004; Wright et al., 2002).

I mange optimaliseringstilfeller er antall variabler, og dermed datamengden, stor. Bandyopadhyay og Saha (2012) anbefaler i slike tilfeller å styre optimaliseringsprosessen. Optimaliseringsprosessen kan styres ved blant annet å begrense definisjonsområdet for variablene (Bandyopadhyay & Saha, 2012). Styring av optimaliseringsprosessen utføres med tilleggsinformasjon om det som optimaliseres (Hamdy et al., 2013; Wang et al., 2005; Wright et al., 2002).

Måten optimaliseringsprosessen gjennomføres på kalles optimaliseringsalgoritmen (Bandyopadhyay & Saha, 2012; Lepš, 2004). Ved optimalisering av ingeniørproblemer mener Lepš (2004) at det sjeldent finnes én enkelt optimaliseringsalgoritme som er best. Det er ofte mange optimaliseringsalgoritmer tilgjengelig for å løse ingeniørproblemer hvor flere kan gi tilnærmet samme resultat. Bandyopadhyay og Saha (2012) og Wang et al. (2005) mener begge at løsninger nær den optimale løsningen i mange optimaliseringstilfeller er godt nok. Wright et al. (2002) trekker frem optimalisering av bygningsdesign som et slikt tilfelle.

Kapittel 3

*They always say time changes
things, but you actually have to
change them yourself.*

- Andy Warhol, amerikansk kunstner

I kapittel 1 gis det en presentasjon av formålet med oppgaven. På bakgrunn av formålet ble det utformet en problemstilling og et sett med forskningsspørsmål, som danner et rammeverk for oppgaven. Med utgangspunkt i forskningsspørsmålene og kapittel 2 er det utført ulike beregninger for å definere en miljøoptimal oppgradering av den eksisterende boligmassen. Metodevalg og fremgangsmåte for beregningene er vist i dette kapitlet. Kapitlet innledes med generell informasjon om metodebruk, før det senere i kapitlet presenteres informasjon om den spesifikke fremgangsmåten.

3.1 Metodebruk

Bevissthet rundt valg av metodebruk er en viktig og sentral del av akademiske oppgaver (Olsson, 2011). Olsson (2011) understreker viktigheten av en metodebeskrivelse som et redskap for kvalitetssikring av forskningsarbeidet. En metodebeskrivelse gir leserne et grunnlag for vurdering av konklusjonen og mulighet for videreføring av arbeidet (Olsson, 2011).

Dalland (1993) definerer forskningsmetoder som ”systematiske fremgangsmåter for å belyse en problemstilling”. I følge Olsson (2011) og Samset (2008) kan problemstillingen belyses ved hjelp av kvalitative og kvantitative forskningsmetoder.

Kvalitative metoder kjennetegnes ved at de baseres på muntlig eller tekstlig informasjon og brukes ofte til å beskrive helheten i en kompleks situasjon (Olsson,

2011; Samset, 2008). På den andre siden er de kvantitative metodene ofte tallbaserte og gir høyere presisjon (Samset, 2008). Kvantitative metoder er som regel basert på få opplysninger om mange objekter (Olsson, 2011).

Olsson (2011) understeker at det ikke er uvanlig å benytte både kvalitative og kvantitative metoder i samme forskningsarbeid. Metodene utfyller hverandre og kvalitative metoder kan bidra til å forstå meningen i tallresultater fra kvantitative metoder. På samme måte kan kvantitative metoder underbygge resultatene fra kvalitative metoder (Olsson, 2011).

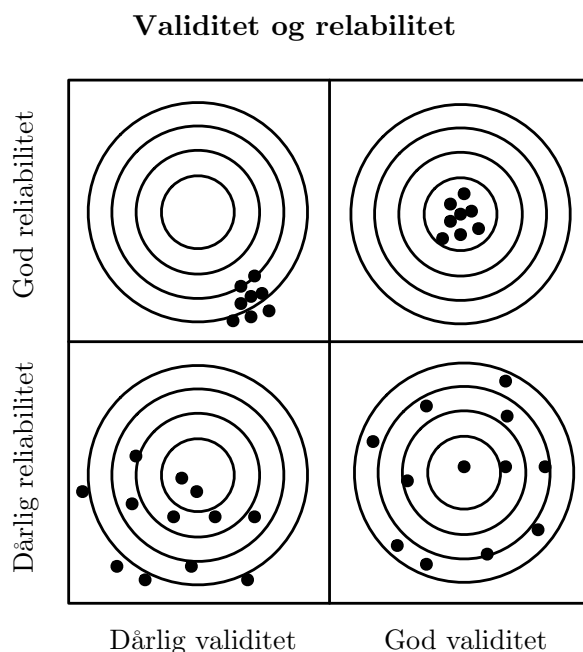
Olsson (2011) og Olsson og Sørensen (2003) lister opp en rekke forskningsmetoder som er aktuelle for akademiske oppgaver. Tabell 3.1 utdyper de mest sentrale metodene.

Tabell 3.1 Aktuelle forskningsmetoder for akademiske oppgaver (Olsson & Sørensen, 2003; Olsson, 2011).

Forskningsmetode	Beskrivelse
Dokumentgjennomgang/ litteraturstudie	Gjennomgang av eksisterende litteratur i form av bøker, artikler, tidsskrifter, rapporter, etc.
Intervjuer	Intervju med personer som har direkte kunnskap eller som på en annen måte er tilknyttet problemstillingen. Intervjuene kan gjøres individuelt eller i gruppe
Deltagende observasjoner	Observasjoner av forskningssystemer eller prosjekter over lengre tid
Direkte observasjon/ måling	Direkte måling av data enten ved hjelp av instrumenter eller direkte observasjon
Spørreundersøkelse	Undersøke meninger, kunnskapsnivå, etc. av en større mengde mennesker. Kan enten gjøres med tilfeldig utvalg, eller selektert utvalg
Casestudium	Dyptgående studie av prosjekter eller eksempler
Modellering	En modell har til oppgave å fungere som et bindeledd mellom teori og virkelighet

Både Samset (2008) og Olsson (2011) understreker viktigheten av å være bevisste på hva som skal måles og hvordan forskningsmetodene påvirker resultatet. Samset (2008) kaller dette informasjonens kvalitet. Det skilles mellom om forskningsmetodene gir resultater med reliabilitet eller validitet. Reliabilitet er forbundet med etterprøvbarehet og om det samme resultatet oppnås ved gjentatte målinger (Olsson, 2011). Validitet angir i hvilken grad de innsamlede dataene representerer det en ønsker å måle. Validitet er derfor relatert til studiets gyldighet og uttrykker hvor godt resultatene representerer kjernen i problemstillingen (Olsson, 2011).

Samsøet (2008) bruker skyteskiver til å forklare hvordan resultatene kan vurderes. Slike skyteskiver er vist i Figur 3.1. Skivene til venstre illustrerer dårlig validitet, mens skivene til høyre illustrerer god validitet. De øverste skivene illustrerer god reliabilitet, mens de nederste skivene illustrerer dårlig reliabilitet.



Figur 3.1 Reliabilitet og validitet. Basert på Simonsen (2013).

3.1.1 Litteratursøk

I denne oppgaven ble et omfattende litteratursøk gjennomført. Et litteratursøk tar sikte på å samle relevant informasjon om problemstillingen. I arbeidet med å strukturere litteratursøket er det hensiktsmessig å bruke en forhåndsdefinert søkestrategi (Olsson, 2011).

Søkestrategien ble bygget opp på følgende måte:

1. Definere problemstilling
2. Valg av søkeord
3. Testsøk, med påfølgende avgrensinger
4. Grovfiltrere søk gjennom tittel og sammendrag
5. Kildekritikk

Søkeprosessen ble gjennomført som en iterativ prosess, hvor stegene i prosessen ble gjentatt flere ganger. De valgte søkeordene ble også endret etter hvert som arbeidet med oppgaven gikk fremover.

I arbeidet med å hente inn informasjon ble det tatt i bruk ulike søkbare databaser. Valg av databaser og søkemotorer er en viktig del av litteratursøket og er avgjørende for å få tilgang til aktuell informasjon (VIKO, u.å.). VIKO (u.å.) trekker frem enkelte gode informasjonsdatabaser. Følgende databaser ble benyttet i oppgaven:

- BIBSYS Ask
- Google Scholar
- Ressurssider på internett: regjeringen.no, lovdata.no, ssb.no, bks.byggforsk.no, epd-norge.no, etc.

Litteraturen som ble hentet inn er fra både norske og internasjonale fagmiljøer. Problemstillingen er direkte knyttet opp mot norske forhold og forskrifter. Det var derfor naturlig å primært undersøke norsk litteratur. Det er flere anerkjente norske fagmiljøer som jobber med temaer i nær tilknytning til problemstillingen. Tilgjengelig norsk litteratur var derfor god. Internasjonale fagmiljøer ble i stor grad benyttet for å supplere norsk litteratur.

VIKO (u.å.) understreker viktigheten av å gjennomføre en kritisk vurdering av litteraturen som brukes. I det legger VIKO (u.å.) at litteraturen bør vurderes opp mot kriteriene *troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet*. Litteraturen i denne oppgaven ble vurdert etter de kriteriene.

3.1.2 Modellering av driftsenergi

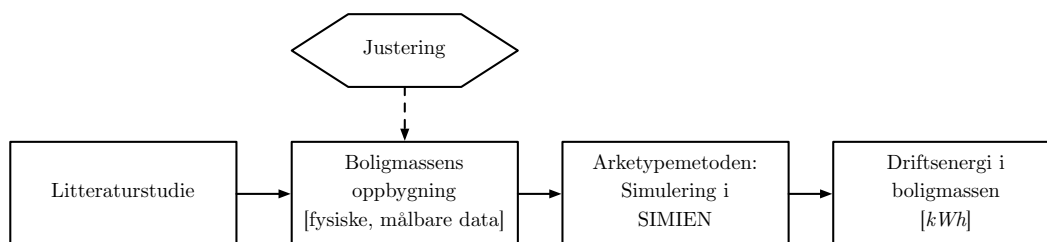
I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål én presentert. Forskningsspørsmålet handler om den eksisterende boligmassens forbruk av driftsenergi. Dette kapittelet presenterer fremgangsmåten for modellering av boligmassens driftsenergi. Olsson og Sörensen (2003) trekker frem modellering som en aktuell forskningsmetode i akademiske oppgaver. Kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* viser hvordan både Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) benytter seg av modellering for å beskrive driftsenergien til boligmassen. Modellen de benytter identifiseres i kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* som en arketype-metode.

I arketype-metoden modelleres boligmassen basert på generaliserte fysiske data om boligmassens utforming. Myhre (1995) baserer sine manuelle modelleringer på NS 3031:1987, mens Mjønes et al. (2012) benytter seg av datasimuleringsverktøy (Solem, 2014). En tilsvarende rapport av den Mjønes et al. (2012) har utarbeidet benytter seg av datasimuleringsprogrammet SIMIEN (Bøhn et al., 2011). SIMIEN er et simuleringsprogram som blant annet beregner bygningers energibehov og dimensjonerer varme-, kjøle- og ventilasjonsanlegg (ProgramByggerne, 2014b)

For beregning av boligmassens driftsenergi etter arketype-metoden anbefaler Kavgic et al. (2010) å benytte et simuleringsprogram hvor bygningen bygges opp med målbare og fysiske data. Eksempler på målbare og fysiske data som Kavgic et al. (2010) trekker frem er U-verdi og temperatur. SIMIEN, som blir brukt av både Myhre (2012), Sartori et al. (2011), Dahlstrøm et al. (2012) og Thyholt et al. (2012), er et simuleringsprogram som benytter slike målbare og fysiske data (ProgramByggerne, 2014a).

I denne oppgaven ble driftsenergien i boligmassen modellert ved hjelp av arketype-metoden som presenteres i kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi*. Figur 3.2 gir en skjematisk oversikt over fremgangsmåten for modelleringen av energiforbruket. Med utgangspunkt i kapittel 2.2 *Boligmassen* ble boligmassen delt inn i 19 arketypeboliger. Arketypeboligene er fordelt jevnt over bygningstypene: enebolig, småhus og boligblokker.

Skjematisk fremstilling av metodebruk for beregning av driftsenergi



Figur 3.2 Skjematisk fremstilling av metoden for dele opp boligmassen.

Utforming og teknisk tilstand av arketypeboligene ble basert på kapittel 2.2 *Boligmassen*. Boligenes BRA og U-verdi ble justert i forhold til verdiene som presenteres i kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer*. Nedenfor vises det hvordan boligens størrelse og U-verdi ble justert.

Justering av bruksareal

I kapittel 2.2.4 *Boligmassens areal* argumenteres det for at gjennomsnittlig bruksareal Norges boligmasse er 120 m². Figur 2.1 i kapittel 2.2.4 *Boligmassens areal* viser antydninger til en korrelasjon blant de tre presenterte informasjonskildene. Med utgangspunkt i Mjønes et al. (2012) ble boligmassens arealfordeling korrigert. Det ble gjort for å oppnå et totalt gjennomsnittlig bruksareal på 120 m².

For å justere arealfordelingen ble *hva-hvis*-formatering i regneprogramvaren MS Excel benyttet (Microsoft, 2014). Totalt gjennomsnittlig areal for boligmassen ble definert som en formel avhengig av spesifikt areal og mengden boliger innen hver boligkategori. Formelen ble løst ved å definere en målverdi for det totale

gjennomsnittlige arealet, for så å benytte *hva-hvis* formateringen. Resultatet av justeringene er vist i kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

Justering av U-verdi

I kapittel 4.2.1 *Oppbygning og forbruk av driftsenergi* argumenteres det for å velge en inndeling av boligmassen der det skilles mellom oppgraderte og originale boliger. I denne oppgaven ble det valgt en inndeling basert på oppgraderingsandeler gitt av Mjønes et al. (2012). For å modellere både oppgraderte og originale boliger var det nødvendig å definere en U-verdi for begge kategoriene. Kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* viser at Mjønes et al. (2012) skiller på hvor mange av de oppgraderte boligene som har gjennomført ulike oppgraderingstiltak. Basert på dette ble U-verdien for oppgraderte boliger vektet etter hvor mange som har gjennomført oppgraderingen. Hvis 50 % av boligene som har gjennomført oppgraderinger har oppgradert vinduer, vektet eksempelvis U-verdien av oppgraderte vinduer til snittet av oppgraderte og uoppgraderte. Resultatet av vektingene presenteres i kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

En ulempe ved å vekte U-verdiene for oppgraderte boliger er at den vektete U-verdien ikke representerer en reell U-verdi i boligmassen. Fremgangsmåten er allikevel i tråd med metodebeskrivelsen for arketype-metoden. Som det beskrives i kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* baserer arketypemetoden seg på å generalisere boligmassen, for så å ekstrapolere for den generelle massen.

Modellering med SIMIEN

Figur 3.2 viser at driftsenergien i hver arketypebolig ble simulert i energisimuleringsprogrammet SIMIEN. Som kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* viser kan SIMIEN beregne energiforbruket til en bygning (ProgramByggerne, 2014b). Programmet baserer seg på fysiske inndata om bygningens utforming, størrelse, geometri og tekniske tilstand (ProgramByggerne, 2014a). De fysiske inndataene for hver arketypebolig presenteres i Tabell 3.2, Tabell 3.3 og Tabell 3.4.

Energiforbruket til en bolig er avhengig av utetemperaturen og klimaet der boligen er plassert (Mjønes et al., 2012; Novakovic et al., 2007). Energisimuleringene i SIMIEN baserer seg på klimadata fra et selvbestemt sted i Norge (ProgramByggerne, 2014a). Om ikke dette stedet representerer et gjennomsnitt av klimaet i Norge blir også det totale energiforbruket feil. Myhre (1995) tar opp denne problemstillingen og vektet utetemperaturen for hele landet. I denne oppgaven ble energiforbruket beregnet etter Oslo-klima, som etter NS 3031:2007 er det standardiserte klimaet for Norge (Standard Norge, 2007)

SIMIEN har tre ulike simuleringsformer: simulering av dimensjonerende sommerforhold, simulering av dimensjonerende vinterforhold og simulering av et helt år

(ProgramByggerne, 2014a). I denne oppgaven ble de to sistnevnte benyttet. Simulering av vinterforhold ble gjort for å undersøke nødvendig installert varmeeffekt (W/m^2) for å holde innertemperaturen over en definert temperatur. Temperaturer for de ulike boligkategoriene presenteres Tabell 3.2, Tabell 3.3 og Tabell 3.4. Simulering av et helt år ble benyttet for å finne netto og brutto energiforbruk (kWh/m^2) til boligene. I følge Novakovic et al. (2007) er det mindre behov for kjøling i et boligbygg, kontra et kontorbygg. Det er derfor ikke installert kjøleanlegg i boligene. På bakgrunn av dette ble sommerforhold ikke simulert.

For simulering av ventilasjon ble det skilt mellom naturlig-, avtrekks- og balansert ventilasjon. Etter kapittel 2.2.8 *Lekkasjetall og ventilasjon* ble det simulert med avtrekksventilasjon i de tre eldste boligkategoriene, mens det ble brukt balansert ventilasjon i den yngste boligkategorien. Avtrekksventilasjon ble simulert med en driftstid på tre timer, mens balansert ventilasjon ble simulert med en driftstid på 24 timer. Ventilasjonsanleggene ble simulert uten varmebatteri.

I Tabell 3.2, Tabell 3.3 og Tabell 3.4 er det gitt en presentasjon av de inndataene som har blitt brukt for beregninger i SIMIEN.

Tabell 3.2 Sentrale parametere for enebolig.

Bygningsparameter	Byggeår for enebolig			
	Før 1956	1956 - 1980	1980 - 1999	Etter 1999
Antall boenheter per hus ^{a*}	1	1	1	1
Areal per boenhet (BRA) ^η [m^2]	140	142	163	161
Antall etasjer ^{a*}	2	2	1,5	1,5
Romhøyde ^{a*} [m]	2,6	2,5	2,4	2,4
Grense mot tak/ gulv ^{b**}	kl.l-t/ kl.k-t	kl.l-t/ kl.k-t	va.l-t/ mar-b	va.l-t/ mar-b
Grunnflate ^{a**} [m]	7,5 x 9,3	7,5 x 9,5	7,5 x 14,5	7,5 x 14,3
Andel oppgraderte boliger				
Original ^{b*}	9 %	42 %	87 %	100 %
Oppgradert ^{b*}	91 %	58 %	13 %	0 %
U-verdi (original/ oppgradert)				
Vegger ^θ [W/m^2K]	0,90/ 0,58	0,39/ 0,37	0,26/ 0,26	0,21/ -
Gulv ^θ [W/m^2K]	0,69/ 0,50	0,32/ 0,29	0,17/ 0,17	0,15/ -
Tak ^θ [W/m^2K]	0,60/ 0,44	0,28/ 0,24	0,18/ 0,18	0,14/ -
Vinduer ^θ [W/m^2K]	2,80/ 2,21	2,80/ 2,40	1,93/ 1,93	1,6/ -
Luftskifter				
Lekkasje ^{b*} [h^{-1}]	5	4	3,5	3
Ventilasjon ^{b*} [m^3/m^2h]	0,6	0,5	0,4	0,8
Varmegjenvinning ^{b*}	0 %	0 %	0 %	50 %
Temperatur				
Oppvarmet del ^{a*} [$^{\circ}C$]	21	21	21	21
Uoppvarmet del ^{a*} [$^{\circ}C$]	15	15	15	15
Gjennomsnittlig temperatur [$^{\circ}C$]	19,5	19,9	20,2	20,2
Vinduer				
Andel vinduer per BRA ^{a*}	20 %	15 %	15 %	15 %
Orientering vinduer ^{a*} (s-v-ø-n)	35-35-20-10	35-35-20-10	35-35-20-10	35-35-20-10
Oppvarmingskilder				
Elektrisitet ^{b*}	49 %	49 %	50 %	69 %
Oljekjel/ fjernvarme ^{b*}	6 %	6 %	0 %	2 %
Ved ^{b*}	22 %	17 %	18 %	13 %
Varmepumpe ^{b*}	23 %	28 %	32 %	16 %
Virkningsgrad				
Systemvirkningsgrad ^{b*}	0,96	0,98	1,02	0,98

a*) Basert på Myhre (1995) og supplert med Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

a**) Basert på Myhre (1995).

b*) Basert på Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

b**) Basert på Mjønes et al. (2012). kl.l-t står for kaldt loft og etasjeskiller bygget i tre. kl.k-t står for kald kjeller og etasjeskiller bygget i tre. va.l-t står for varmt loft og etasjeskiller bygget i tre. mar-b står for markplate bygget i betong.

η) Arealet er justert etter kapittel 2.2.4 *Boligmassens areal* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

θ) Basert på kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

3.1 Metodebruk

Tabell 3.3 Sentrale parametere for småhus.

Bygningsparameter	Byggeår for småhus			
	Før 1956	1956 - 1980	1980 - 1999	Etter 1999
Antall boenheter per hus ^{a*}	2	4	4	4
Areal per boenhet (BRA) η [m^2]	103	112	103	98
Antall etasjer ^{a*}	2	2	2	2
Romhøyde ^{a*} [m]	2,6	2,4	2,4	2,4
Grense mot tak/ gulv ^{b**}	kl.l-t/ kl.k-t	kl.l-t/ kl.k-t	va.l-t/ mar-b	va.l-t/ mar-b
Grunnflate ^{a**} [m]	7,5 x 13,7	10,0 x 22,4	10,0 x 20,6	10,0 x 19,6
Andel oppgraderte boliger				
Original ^{b*}	14 %	31 %	94 %	100 %
Oppgradert ^{b*}	86 %	69 %	6 %	0 %
U-verdi (original/ oppgradert)				
Vegger ^Ø [W/m^2K]	0,90/ 0,60	0,39/ 0,37	0,26/ 0,26	0,21/ -
Gulv ^Ø [W/m^2K]	0,66/ 0,51	0,23/ 0,21	0,15/ 0,15	0,15/ -
Tak ^Ø [W/m^2K]	0,60/ 0,47	0,28/ 0,25	0,18/ 0,18	0,14/ -
Vinduer ^Ø [W/m^2K]	2,80/ 2,23	2,80/ 2,30	1,95/ 1,95	1,60/ -
Luftskifter				
Lekkasje ^{b*} [h^{-1}]	5	4	4	3
Ventilasjon ^{b*} [m^3/m^2h]	0,5	0,5	0,4	0,8
Varmegjenvinning ^{b*}	0 %	0 %	0 %	50 %
Temperatur				
Oppvarmet del ^{a*} [$^{\circ}C$]	21,5	21,5	21,5	21,5
Uoppvarmet del ^{a*} [$^{\circ}C$]	15	15	15	15
Gjennomsnittlig temperatur [$^{\circ}C$]	20,5	20,7	20,7	20,7
Vinduer				
Andel vinduer per BRA ^{a*}	20 %	15 %	15 %	15 %
Orientering vinduer ^{a*} (s-v-Ø-n)	35-35-20-10	60-0-0-40	60-0-0-40	60-0-0-40
Oppvarmingskilder				
Elektrisitet ^{b*}	75 %	66 %	68 %	70 %
Oljekjel/ fjernvarme ^{b*}	4 %	10 %	4 %	8 %
Ved ^{b*}	8 %	9 %	10 %	13 %
Varmepumpe ^{b*}	13 %	15 %	18 %	9 %
Virkningsgrad				
Systemvirkningsgrad ^{b*}	0,98	0,97	0,98	0,95

a*) Basert på Myhre (1995) og supplert med Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

a**) Basert på Myhre (1995).

b*) Basert på Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

b**) Basert på Mjønes et al. (2012). kl.l-t står for kaldt loft og etasjeskiller bygget i tre. kl.k-t står for kald kjeller og etasjeskiller bygget i tre. va.l-t står for varmt loft og etasjeskiller bygget i tre. mar-b står for markplate bygget i betong.

η) Arealet er justert etter kapittel 2.2.4 *Boligmassens areal* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

Ø) Basert på kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*

Tabell 3.4 Sentrale parametere for boligblokk.

Bygningsparameter	Byggeår for boligblokk			
	Før 1956	1956 - 1980	1980 - 1999	Etter 1999
Antall boenheter per hus ^{a*}	8	24	24	24
Areal per boenhet (BRA) ^η [m ²]	68	65	70	68
Antall etasjer ^{a*}	4	4	4	4
Romhøyde ^{a*} [m]	2,8	2,7	2,5	2,4
Grense mot tak/ gulv ^{b**}	kl.l-t/ kl.k-t	fl.t-b/ kl.k-b	fl.t-b/ kl.k-b	fl.t-b/ kl.k-b
Grunnflate ^{a**} [m]	10,0 x 13,6	10,0 x 39,0	10,0 x 42,0	10,0 x 40,8
Andel oppgraderte boliger				
Original ^{b*}	16 %	26 %	94 %	100 %
Oppgradert ^{b*}	84 %	74 %	6 %	0 %
U-verdi (original/ oppgradert)				
Vegger ^θ [W/m ² K]	1,00/ 0,74	0,70/ 0,56	0,32/ 0,32	0,27/ -
Gulv ^θ [W/m ² K]	0,47/ 0,40	0,33/ 0,31	0,24/ 0,23	0,14/ -
Tak ^θ [W/m ² K]	0,60/ 0,50	0,28/ 0,25	0,24/ 0,23	0,14/ -
Vinduer ^θ [W/m ² K]	2,80/ 2,22	2,73/ 2,25	2,10/ 2,09	1,60/ -
Luftskifter				
Lekkasje ^{b*} [h ⁻¹]	5	5	1,5	1,5
Ventilasjon ^{b*} [m ³ /m ² h]	0,5	0,2	0,4	1,2
Varmegjenvinning ^{b*}	0 %	0 %	0 %	50 %
Temperatur				
Oppvarmet del ^{a*} [°C]	22	22	22	22
Uoppvarmet del ^{a*} [°C]	15	15	15	15
Gjennomsnittlig temperatur [°C]	20,4	20,6	21,0	21,0
Vinduer				
Andel vinduer per BRA ^{a*}	20 %	15 %	15 %	15 %
Orientering vinduer ^{a*} (s-v-ø-n)	60-0-0-40	60-0-0-40	60-0-0-40	60-0-0-40
Oppvarmingskilder				
Elektrisitet ^{b*}	78 %	82 %	87 %	83 %
Oljekjel/ fjernvarme ^{b*}	9 %	8 %	5 %	7 %
Ved ^{b*}	8 %	5 %	1 %	7 %
Varmepumpe ^{b*}	5 %	5 %	7 %	3 %
Virkningsgrad				
Systemvirkningsgrad ^{b*}	0,95	0,96	0,98	0,95

a*) Basert på Myhre (1995) og supplert med Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

a**) Basert på Myhre (1995).

b*) Basert på Mjønes et al. (2012). Justert for å passe i kategorisering etter byggeår.

b**) Basert på Mjønes et al. (2012). kl.l-t står for kaldt loft og etasjeskiller bygget i tre. kl.k-t står for kald kjeller og etasjeskiller bygget i tre. fl.t-b står for flatt tak bygget i betong. kl.k-b står for kladd kjeller og etasjeskiller bygget i betong.

η) Arealet er justert etter kapittel 2.2.4 *Boligmassens areal* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

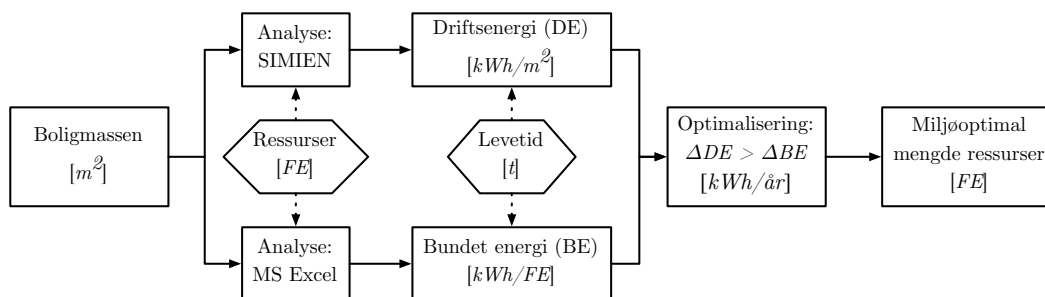
θ) Basert på kapittel 2.2.7 *U-verdi og kuldebroer* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*

3.1.3 Optimalisering

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål to presentert. Det handler om muligheten for å definere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå av den eksisterende boligmassen. Både Wright et al. (2002) og Wang et al. (2005) mener at det ved optimalisering av bygningsdesign er fordelaktig å benytte multi-objective-optimalisering. Optimalisering av bygningsdesign handler ofte om å vurdere konkurrerende mål opp mot hverandre og å finne det mest optimale kompromisset. Wright et al. (2002) og Wang et al. (2005) trekker blant annet frem muligheten til å vekte konkurrerende mål opp mot hverandre og til å styre optimaliseringsprosessen som fordeler ved bruk av multi-objective-optimalisering i bygningsdesign.

Wang et al. (2005) benytter seg av en form for multi-objektive-optimalisering ved å vurdere livssyklus kostnader mot livssyklus miljøpåvirkning. På samme måte som Wang et al. (2005) søker etter å minimere kostnader og miljøpåvirkninger ble det i denne oppgaven brukt multi-objective-optimalisering for å minimere summen av driftsenergi og bundet energi. Driftsenergi og bundet energi er de to funksjonene som ble optimalisert. Som Figur 3.3 viser er begge funksjonene avhengig av variablene ressurser og levetid. Ressurser betegner materialmengden som tilføres boligen. I Tabell 2.20 i kapittel 2.9.4 *Materialegenskaper* brukes funksjonell enhet (FE) for å betegne ressurser. FE er ofte oppgitt per m^2 eller m^3 .

Skjematisk fremstilling av optimaliseringsprosessen



Figur 3.3 Skjematisk fremstilling av optimaliseringsprosessen.

Bundet energi og karbon

I Tabell 2.20 i kapittel 2.9.4 *Materialelegenskaper* presenteres verdier for ulike materialers energi- og karboninnhold. Verdiene dannet grunnlaget for optimaliseringsfunksjonen *bundet energi*. Tabell 2.20 ble i stor grad basert på informasjon fra EPD-Norge. I tillegg var det nødvendig å supplere med verdier fra ICE-databasen og Norsk Prisbok. EPD-Norge benytter seg av systemgrensen vugge til grav. Vugge til grav er den mest dekkende systemgrensen og dekker hele livsløpet til et materiale. Vugge til port er på den andre siden mindre dekkende og tar bare med livsløpsenergi frem til produksjonslokalets port. ICE-databasen og Norsk Prisbok benytter denne systemgrensen. Materialer hentet fra ICE-databasen og Norsk Prisbok inneholder derfor en lavere bundet energi enn tilsvarende materialer fra EPD-Norge ville gjort. Ulike systemgrenser er ikke ideelt for optimaliseringsprosessen, men Wright et al. (2002) understreker i kapittel 2.12 *Optimalisering* at en nær optimal løsning i mange tilfeller er god nok ved optimalisering av bygningsdesign.

I denne oppgaven ble bundet energi brukt som optimaliseringsfunksjon. En alternativ fremgangsmåte var å bruke bundet karbon og klimagassutslipp som optimaliseringsfunksjoner. For bygningsmaterialer er bundet karbon i mange tilfeller tilgjengelig ved hjelp av miljøverktøyene som presenteres i kapittel 2.9 *Miljøverktøy*. For driftsenergi er det på den andre siden nødvendig å benytte en omregning av energi til klimagassutslipp. En slik omregning ville gjort optimaliseringsprosessen avhengig av en omregningsfaktor. Omregningsfaktoren blir i kapittel 2.10 *Klimagassutslipp* kalt utslippskoeffisient. For å synliggjøre utslippskoeffisientens påvirkning på optimaliseringsprosessen er det vist et følsomhetsdiagram i Figur 4.21 i kapittel 4.1.6 *Klimamål - klimagasser*.

Styring av optimaliseringen og stegvis prosess

Som det nevnes i kapittel 2.12 *Optimalisering* anbefales det å styre optimaliseringsprosessen for å begrense datamengden. Figur 4.5 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen* viser differensiert energiforbruk til henholdsvis oppvarming, varmtvann, utstyr, belysning og vifter for boliger simulert i denne oppgaven. Ved hjelp av Figur 4.5 var det mulig å identifisere områder hvor energibesparende tiltak burde fokuseres. I kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* presenteres oppgraderingstiltak som har støtte i fagmiljøer som energibesparende tiltak. På bakgrunn av Figur 4.5 og kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* ble det valgt ut ett sett med energibesparende oppgraderingstiltak som presenteres i Tabell 3.5. Tiltakene ble basert på prinsippet ”passiv energidesign” og var primært rettet mot å begrense boligens varmetap gjennom bygningskroppen (Bøhn et al., 2006). Tiltakene ble også basert på tilgjengelige og uttestede bygningsmaterialer og løsninger. En begrensning av oppgraderingstiltakene reduserte datamengden til optimaliseringen.

3.1 Metodebruk

Tabell 3.5 Tiltak for optimalisering.

Bygningsdel	Original og oppgradert bygningsteknisk kvalitet*	
	Original kvalitet	Oppgradert kvalitet
Original tetthet [h^{-1}]	Avh. av boligtype	-
Økt tetthet [h^{-1}]	-	2,50
Originalt tak [W/m^2K]	Avh. av boligtype	-
Etterisolere 100 mm tak [W/m^2K]**	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 150 mm tak [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 200 mm tak [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 250 mm tak [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Originalt gulv [W/m^2K]	Avh. av boligtype	-
Etterisolere 100 mm gulv [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 150 mm gulv [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 200 mm gulv [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 250 mm gulv [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Original yttervegg [W/m^2K]	Avh. av boligtype	-
Etterisolere 100 mm yttervegg [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 150 mm yttervegg [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 200 mm yttervegg [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Etterisolere 250 mm yttervegg [W/m^2K]	-	Avh. av eks. kval.
Originale vinduer [W/m^2K]	Avh. av boligtype	-
Utskifting av vinduer [W/m^2K]	-	1,20
Original temperaturstyring, T_{snitt} [$^{\circ}C$]	Avh. av boligtype	-
Nattsenkning av temperatur, T_{natt} [$^{\circ}C$]	-	5 $^{\circ}C$ reduksjon
Original ventilasjon [m^3/m^2h]	Avh. av boligtype	-
Ventilasjon 80 % v.gjenv [m^3/m^2h]	-	1,20
Original oppvarming	Avh. av boligtype	-
Varmepumpe 90 % av forbruk, eff. 1,22	-	1,10
Varmepumpe 90 % av forbruk, eff. 2,50	-	2,00

* Avh. av boligtype betyr at den originale kvaliteten på boligen varierer avhengig av når boligen er bygget og om det er en enerbolig, småhus eller boligblokk. Avh. av eks. kval. Betyr at den oppgraderte kvaliteten avhenger av hvordan kvalitet det originalt er på boligen.

** Termisk konduktivitet til mineralull er satt til 0,035 W/mK

Hamdy et al. (2013) optimaliserer bygningers termiske utforming basert på definerte tiltak tilsvarende de som vises i Tabell 3.5. For å illustrere antall mulige løsninger av optimaliseringsprosessen summerer Hamdy et al. (2013) opp alle mulig kombinasjoner av tiltakene. En tilsvarende summering av tiltakene som presenteres i Tabell 3.5 gir 6000 ($2 * 5 * 5 * 5 * 2 * 2 * 2 * 3$) mulige løsninger for denne oppgaven. Det er uten å ta hensyn til tiltakets levetid. I følge Novakovic et al. (2007) påvirkes tiltakets effekt av bygningens tilstand. Den totale effekten av å etterisolere vegger og installere varmpumpe er mindre enn

summen av tiltakene hver for seg. Dette kalles konkurrerende tiltak. Tiltak som reduserer varmetap over bygningskroppen er konkurrerende med tiltak som effektiviserer energiforbruket.

6000 individuelle simuleringer er svært tidkrevende å gjennomføre i SIMIEN. Det ble det derfor gjort en forenkling av optimaliseringsprosessen. Det er en slik forenkling Wang et al. (2005), Wright et al. (2002) og Bandyopadhyay og Saha (2012) kaller styring av optimaliseringsprosessen. Optimaliseringsprosessen ble, som Hamdy et al. (2013) anbefaler, delt inn i en stegvis prosess. Stegene som ble valgt er:

1. simulere redusert livssyklusenergi for hvert tiltak individuelt,
2. utføre en marginalbetraktning av hvilke tiltak som individuelt medfører en nærmere optimal løsning,
3. bygge opp pakker av tiltak hvor alle tiltakene i pakken tilfører en vesentlig redusert livssyklusenergi,
4. optimalisere ikke-konkurrerende tiltak mot de konkurrerende tiltakene i pakkene.

I trinn 1 og 2 ble det gjennomført individuelle simuleringer for hvert av tiltakene. Det ble gjort for å kartlegge hvilke tiltak som reduserer driftsenergien betydelig i forhold til tilført bundet energi. Tiltak som i seg selv reduserer driftsenergien vesentlig i forhold til tilført bundet energi ble antatt å være en del av en optimal løsning. Dette fordi at det kan antas at reduksjonen i livssyklusenergien er positiv også etter at konkurrerende tiltak er lagt til. Konkurrerende tiltak er for eksempel nattsenkning av temperatur og økt effektgrad på varmeanlegget.

Tiltak med en antatt positiv livssyklusreduksjon i energi ble kombinert i pakker i trinn 3. Pakkende er vist i Tabell 3.6 og navngitt etter innholdet. Trinn 3 består av totalt fire pakker hvor to virkningsgrader av varmeanlegget er kombinert med utskiftning av ventilasjonsanlegget.

I trinn 4 ble boligens varmetap optimalisert. Varmetapet over boligen er konkurrerende til oppvarmingssystemet, mens etterisolering av yttervegg ikke er konkurrerende med etterisolering av tak. I trinn 4 ble derfor kombinasjoner av isolasjonstykkelser testet. Prosessen ble utført stegvis og startet med utgangspunkt i en av pakkene. Boligen ble oppgradert med tiltakene som ligger i pakken, mens tak, gulv og vegger ble holdt i sin originale tilstand. Første steg i prosessen var å finne optimal tykkelse av isolasjon i tak. Kun den optimale løsningen ble tatt med videre i prosessen. Neste steg var å finne optimal tykkelse av isolasjon i gulv. Også denne optimale løsningen ble tatt med videre. Avslutningsvis ble optimal tykkelse av isolasjon i yttervegger funnet. Denne løsningen, sammen med optimal løsning av tak og gulv, var da optimal løsning av den definerte pakken.

For hver bolig ble det beregnet fire forskjellige optimale løsninger, basert på de fire pakkene. Hver optimale løsning ble definert med optimale isolasjonstykkelser eller som en optimal U-verdi for tak, gulv og vegger. Dette er vist i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen*.

Tabell 3.6 Tiltak til bruk i optimaliseringsprosessen.

Pakke	Innhold
VP 1,1 - ikke vent.	Varmepumpe med virkningsgrad på 1,22. Systemvirkningsgrad 1,1 Nattsenking av temperatur med 5 °C Nye vinduer med U-verdi på 1,2 W/m ² K
VP 2,0 - ikke vent.	Varmepumpe med virkningsgrad på 2,50. Systemvirkningsgrad 2,0 Nattsenking av temperatur med 5 °C Nye vinduer med U-verdi på 1,2 W/m ² K
VP 1,1 - vent.	Varmepumpe med virkningsgrad på 1,22. Systemvirkningsgrad 1,1 Nattsenking av temperatur med 5 °C Nye vinduer med U-verdi på 1,2 W/m ² K Ventilasjonsanlegg med varmegjenvinner på 80 %
VP 2,0 - vent.	Varmepumpe med virkningsgrad på 2,50. Systemvirkningsgrad 2,0 Nattsenking av temperatur med 5 °C Nye vinduer med U-verdi på 1,2 W/m ² K Ventilasjonsanlegg med varmegjenvinner på 80 %

Basert på arketype-metoden som presenteres i 2.12 *Optimalisering* ble det etablert 19 arketypeboliger for å beskrive boligmassen. Hver av disse arketypeboligene ble optimalisert mot fire forskjellige oppgraderingspakker. Optimaliseringsprosessen ga derfor totalt 76 unike løsninger, hvor hver løsning representerer en optimal løsning innen hver pakke og bolig. Ut i fra den optimale løsningen var det mulig å beregne spesifikt energiforbruk og spesifikk energibesparelse for hver arketypebolig. I kapittel 4 er begrepet energibesparelse benyttet for redusert driftsenergi pluss tilført bundet energi. Det kan brukes til å beregne det energibesparende potensialet som ligger i dagens boligmasse.

Levetid og oppgraderingssykluser

I kapittel 2.7.5 *Oppgraderingssykluser* er det gitt en presentasjon av naturlige oppgraderingssykluser ved forvaltning av bygninger. Nødvendig vedlikehold og oppgradering skjer når de eksisterende bygningsmaterialene når et definert nedre akseptnivå. I følge Novakovic et al. (2007) har bygningsmaterialer ulik levetid og når derfor sitt nedre akseptnivå på ulike tidspunkter. FNs klimapanel argumenterer for en hurtig omstilling til mer miljøvennlige bygg. I denne oppgaven ble det derfor forutsatt en miljøteknisk levetid på bygningsmaterialer og installasjoner på 15 år. I tillegg ble bundet energi for ny kledning, himling,

gulv, utlekting, osv. inkludert i optimaliseringsprosessen. Forutsettelsen ble basert på en hurtig omstilling til miljøvennlige bygg. Med utgangspunkt i oppgraderings-syklusene i Figur 2.9 i kapittel 2.7.5 *Oppgraderingssykluser* ble det forutsatt at energibesparende tiltak ikke kan vente til neste planlagte oppgradering. Oppgraderingstiltak relatert til energibesparende tiltak må derfor fremskyndes utover sin naturlige syklus. Det ble i de fleste tilfellene forutsatt at det er uhensiktsmessig å sette opp igjen eksisterende bygningsmaterialer, som for eksempel kledning.

3.1.4 Fremskriving av boligmassen

I kapittel 1.1 *Bakgrunn* vises det at myndighetene har satt målsetninger om å redusere energiforbruket og klimagassutslippene fra boligmassen. For å kunne beregne et fremtidig energiforbruk eller klimagassutslipp er det nødvendig å fremskrive mengden boliger til ett gitt år i fremtiden. I kapittel 2.11 *Endringer i boligmassen* kommer det frem at boligmassen kontinuerlig er i endring. Nye boliger bygges og eldre boliger rives eller oppgraderes.

For å fremskrive boligmassen ble det benyttet en dynamisk modell for endringer i boligmassen. Modellen er presentert i kapittel 2.11.2 *Dynamisk modell*. Boligmassens utvikling er i modellen basert på endringer i befolkningstallet og endringer i livsstil hos befolkningen. I Tabell 2.22 i kapittel 2.11.2 *Dynamisk modell* er tre scenarioer for disse endringene presentert. Scenario høy, middels og lav uttrykker henholdsvis høy, middels og lav befolkningsvekst, få, middels og mange beboere per bolig og høyt, middels og lavt areal per bolig. Modellen er basert på tall fra Bergsdal et al. (2007). For å kunne benytte modellen i denne oppgaven var det nødvendig å justere befolkningstallet, boligmengden og gjennomsnittsareal slik at de stemte med tallene presentert i Tabell 2.5 og Tabell 4.1 i kapittel 2.2 *Boligmassen* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*. For å justere tallene ble det forutsatt at boligmassen følger samme utvikling som Bergsdal et al. (2007) har kommet frem til. Fremskaffing av verdier ble gjort ved direkte avlesning av diagrammer presentert av Bergsdal et al. (2007). Basert på kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* ble boligmassen fremskrevet til år 2020 og år 2040. For vurdering av måloppnåelse mot myndighetsmål ble scenario "middels" benyttet som basissenario.

Oppgraderingsrater frem mot år 2020 og år 2040 ble basert på en lineær fremskriving. Med bakgrunn i klimamålene presentert i kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* ble det beregnet et nødvendig antall oppgraderte boliger i år 2020 og år 2040. Dette tallet dannet grunnlaget for oppgraderingsratene. For å beregne en årlig rate ble snittet av boligmassen innenfor oppgraderingsratens definisjons-

område benyttet. I denne oppgaven ble definisjonsområdene fastsatt til henholdsvis år 2011 til år 2020 og år 2011 til år 2040.

Ved fremskriving av boligmassen er det nødvendig å definere en driftsenergi for nye boliger som bygges frem til fremskrivingstidspunktet. Basert på kapittel 2.1.5 *Miljø* ble det forutsatt at nye boliger bygges etter en passivhusstandard. I det samme kapittelet argumenteres det for at passivhus forbruker mellom 56 - 90 kWh/m². I beregningene ble det forutsatt at nye boliger frem til år 2020 i snitt forbruker 85 kWh/m², mens nye boliger frem til år 2040 i snitt forbruker 80 kWh/m².

3.1.5 Klimagassutslipp

I kapittel 1.2 *Formål og problemstilling* er forskningsspørsmål tre og fire presentert. De spørsmålene handler om reduksjon av klimagasser. På bakgrunn av energimiksene presentert i kapittel 2.10 *Klimagassutslipp* var det mulig å beregne utslippene av klimagasser fra dagens boligmasse, reduksjonspotensialet i dagens boligmasse og et fremskrevet estimat av klimagassutslippene fra en fremtidig boligmasse. Klimagassutslippene fra dagens boligmasse ble beregnet på bakgrunn av de reelle sammensetningene av oppvarmingskilder presentert i Tabell 3.2, Tabell 3.3 og Tabell 3.4. Ved beregning av reduksjonspotensialet og et fremskrevet klimagassutslipp fra boligmassen ble det benyttet en sammensetning av 90 % elektrisitet og 10 % vedfyring. I tråd med EPD-Norge (2011) ble nordisk elektrisitmiks benyttet for den leverte elektrisiteten.

Kapittel 4

*Just because something doesn't
do what you planned it to do
doesn't mean it's useless.*

- Thomas Alva Edison, amerikansk oppfinner

I dette kapitlet presenteres oppgavens resultater og diskusjon. Resultatene er basert på metodene presentert i kapittel 3. I diskusjonen trekkes sentrale linjer fra kapittel 1, 2 og 3.

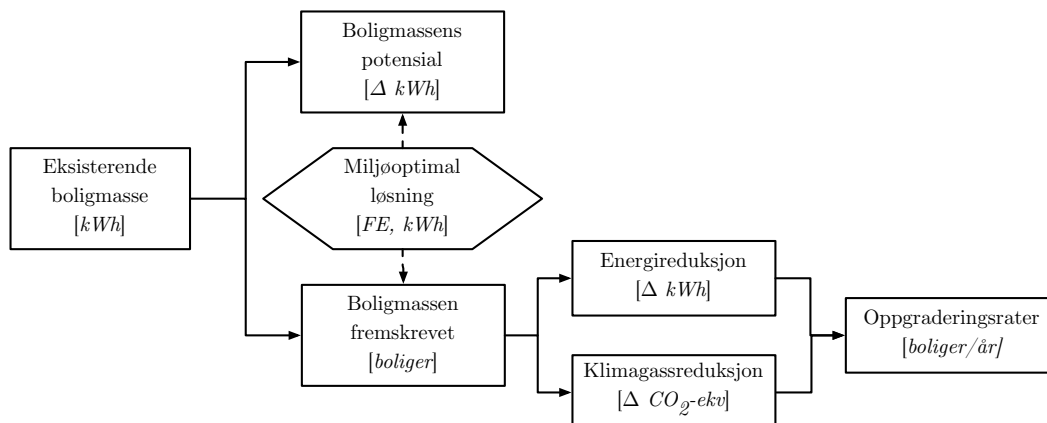
4.1 Resultater

Resultatkapitlet er kronologisk bygget opp rundt forskningsspørsmålene presentert i kapittel 1.2 *Formål og problemstilling*. Nedenfor er forskningsspørsmålene gjengitt.

1. Hvordan er den eksisterende boligmassen bygget opp og hvilket forbruk av driftsenergi har boligmassen?
2. Er det mulig å definere et optimalt oppgraderingsnivå for eksisterende boliger ved å vurdere boligens driftsenergi opp mot tilført bundet energi ved oppgradering?
3. Hva er energi- og klimagassreduksjonspotensialet i dagens boligmasse og på hvilke boliger bør oppgraderinger prioriteres?
4. Vil 2-gradersmålet og myndighetenes målsetninger om redusert energi-forbruk og klimagassutslipp i boligmassen nås med optimal oppgraderingsmengde og innen hvilke rammer?

Figur 4.1 viser en skjematisk fremstilling av beregningene som ble gjennomført i oppgaven.

Skjematisk fremstilling av resultatene



Figur 4.1 Skjematisk fremstilling av beregningene i oppgaven.

4.1.1 Boligmassens oppbygning

I kapittel 2.2 *Boligmassen* er boligmassens areal og termiske egenskaper presentert. For å bruke verdiene i denne oppgaven var det nødvendig å justere de. Nedenfor presenteres resultater for justering av bruksareal og U-verdi.

Bruksareal

I kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* presenteres en metode for justering av boligareal. Tabell 4.1 viser resultatet av justeringen. Det totale gjennomsnittsarealet for den eksisterende boligmassen ble beregnet til 119 m². Tabellen viser det spesifikke arealet for hver arketypebolig. Utregningene som ligger til grunn for resultatene er vedlagt som en datafil.

Tabell 4.1 Arealjustering for boligkategoriene.

	Gjennomsnittlig bruksareal for boliger etter byggeår og bygningstype			
	Enebolig	Småhus	Boligblokk	Gjennomsnitt
	m ²	m ²	m ²	m ²
Byggeår				
Før 1956	140	103	68	114
1956 - 1980	142	112	65	117
1980 - 1999	163	103	70	131
Etter 1999	161	98	68	111
Gjennomsnitt	149	105	67	119

U-verdi

I kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* er det presentert en metode for vekting av U-verdier etter den andelen boliger som har gjennomført oppgraderinger. Tabell 4.2 viser resultatet av vektingen. Utregningene som ligger til grunn for resultatene er vedlagt som en datafil.

Tabell 4.2 Vektete U-verdier for ulike boligdelene.

Byggeår	U-verdi i vegg, gulv, tak og vinduer (original/ oppgradert)			
	Vegg W/m^2K	Gulv W/m^2K	Tak W/m^2K	Vinduer W/m^2K
Enebolig				
Før 1956	0,90/ 0,58	0,69/ 0,50	0,60/ 0,44	2,80/ 2,21
1956 - 1980	0,39/ 0,37	0,32/ 0,29	0,28/ 0,24	2,80/ 2,40
1980 - 1999*	0,26/ 0,26	0,17/ 0,17	0,18/ 0,18	1,93/ 1,93
Etter 1999	0,21/ -	0,15/ -	0,14/ -	1,60/ -
Småhus				
Før 1956	0,90/ 0,60	0,66/ 0,51	0,60/ 0,47	2,80/ 2,23
1956 - 1980	0,39/ 0,37	0,23/ 0,21	0,28/ 0,25	2,80/ 2,30
1980 - 1999*	0,26/ 0,26	0,15/ 0,15	0,18/ 0,18	1,95/ 1,95
Etter 1999	0,21/ -	0,15/ -	0,14/ -	1,60/ -
Boligblokk				
Før 1956	1,00/ 0,74	0,47/ 0,40	0,60/ 0,50	2,80/ 2,22
1956 - 1980	0,70/ 0,56	0,33/ 0,31	0,28/ 0,25	2,73/ 2,25
1980 - 1999*	0,32/ 0,32	0,24/ 0,23	0,24/ 0,23	2,10/ 2,09
Etter 1999	0,27/ -	0,14/ -	0,14/ -	1,60/ -

* U-verdiene for originale og oppgraderte boliger er i noen tilfeller like. Dette kommer av at det er svært få (rundt 6 %) som har gjennomført tiltak på enten vegger, gulv, tak eller vinduer.

4.1.2 Forbruk av driftsenergi i boligmassen

I kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* er det presentert en metode for modellering av energiforbruket i boligmassen etter arketype-metoden. Tabell 4.3 viser energiforbruket til boligmassen beregnet etter denne metoden. Tabell 3.2, Tabell 3.3 og Tabell 3.4 i kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* ble lagt til grunn for simuleringene. Beregningene ble basert på boligantallet presentert i kapittel 2.2.3 *Antall boliger*. Det totale energiforbruket i boligmassen ble beregnet til 46,8 TWh. Tabell 4.3 viser at eneboliger står for omtrent to tredjedeler av energiforbruket i boligmassen.

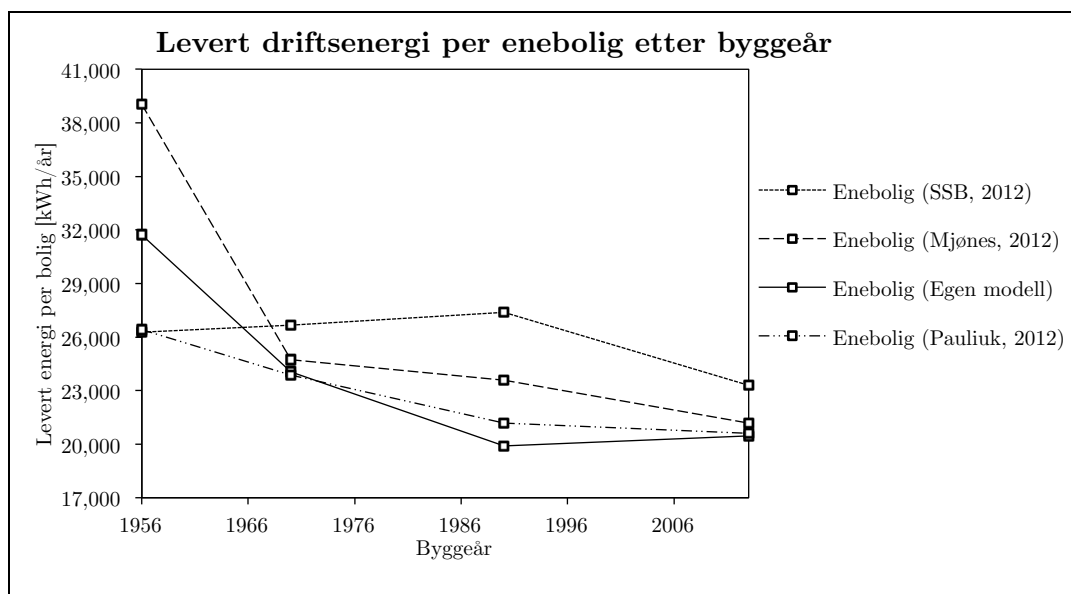
Tabell 4.3 Forbruk av driftsenergi i eksisterende boligmasse etter boligkategori og byggeår.

Byggeår*	Levert energi for boliger etter byggeår fra egen modell**					
	Lev. en./ areal <i>kWh/m²</i>	Lev. en/ bolig <i>kWh/bolig</i>	Lev. en/ beboer <i>kWh/beboer</i>	Tot. lev. en <i>GWh</i>	Andel tot. lev. en <i>%</i>	
Enebolig						
Før 1956	Orig.	293	41 020	16 408	1 158	2 %
	Oppg.	220	30 800	12 320	8 795	19 %
1956 - 1980	Orig.	177	25 162	10 065	4 630	10 %
	Oppg.	164	23 260	9 304	5 910	13 %
1980 - 1999	Orig.	122	19 902	7 961	5 947	13 %
Etter 1999	Orig.	127	20 479	8 192	2 406	5 %
Uoppgitt		168	25 052	10 021	2 639	6 %
Totalt					31 486	67 %
Småhus						
Før 1956	Orig.	285	29 304	13 320	507	1 %
	Oppg.	223	22 928	10 422	2 438	5 %
1956 - 1980	Orig.	157	17 539	7 972	842	2 %
	Oppg.	143	16 027	7 285	1 712	4 %
1980 - 1999	Orig.	122	12 535	5 698	1 498	3 %
Etter 1999	Orig.	125	12 240	5 564	959	2 %
Uoppgitt		159	16 710	7 596	323	1 %
Totalt					8 278	18 %
Boligblokk						
Før 1956	Orig.	263	17 870	11 169	434	1 %
	Oppg.	217	14 736	9 210	1 878	4 %
1956 - 1980	Orig.	184	11 967	7 479	569	1 %
	Oppg.	164	10 634	6 646	1 439	3 %
1980 - 1999	Orig.	114	7 952	4 970	636	1 %
	Oppg.	113	7 903	4 939	40	0 %
Etter 1999	Orig.	127	8 636	5 398	961	2 %
Uoppgitt		167	11 239	7 024	52	0 %
Totalt					6 008	13 %
Annen bygningstype						
Totalt					992	2 %
Totalt i boligmassen					46 765	100 %

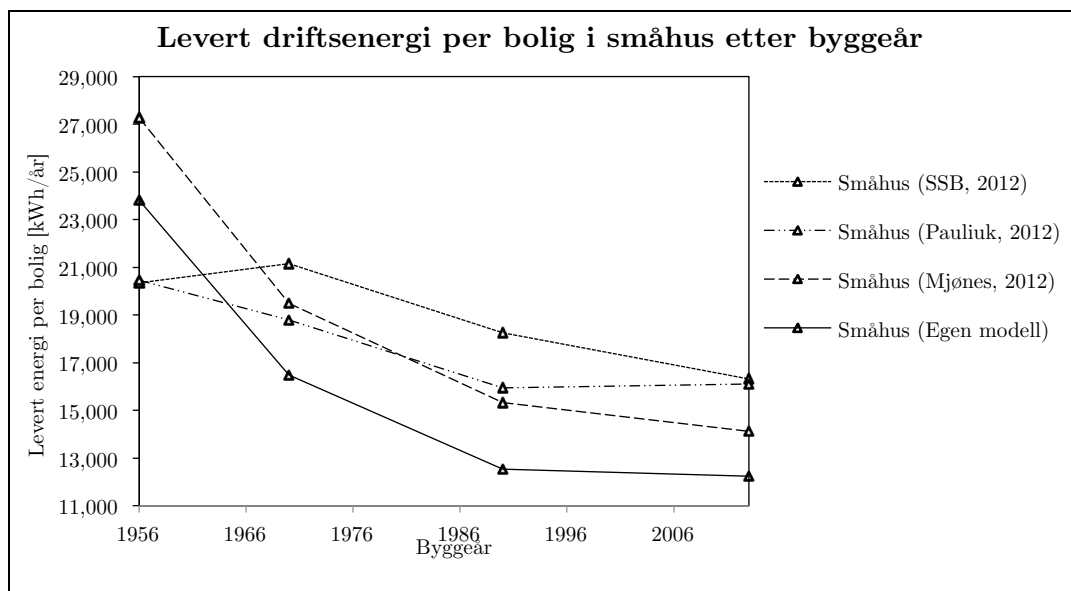
* Originale boliger er i tabellen forkortet med orig. Oppgraderte boliger er i tabellen forkortet med oppg. Andelen oppgraderte boliger er definert i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* og kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*. U-verdier i oppgraderte boliger er definert i kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning*.

** Levert energi er i tabellen forkortet med lev. en.

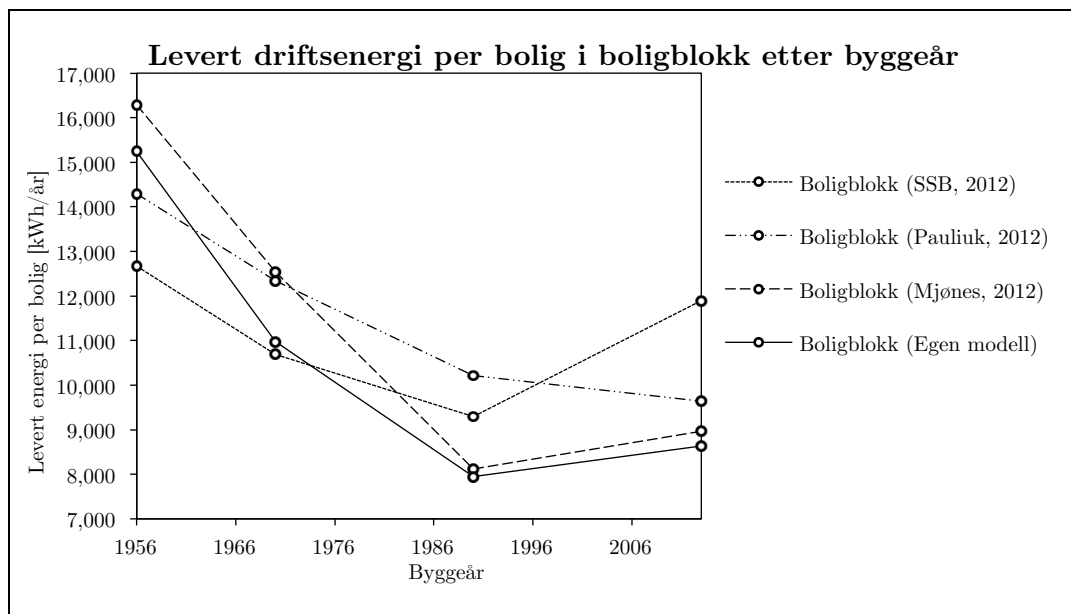
I kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* anbefaler MacGregor et al. (1993) og Swan og Ugursal (2009) at resultater fra arketype-metoden sammenliknes med resultater fra andre metoder. I Figur 4.2, Figur 4.3 og Figur 4.4 sammenliknes energiforbruket beregnet i denne oppgaven med energiforbruket beregnet av Mjønes et al. (2012), Pauliuk et al. (2013) og SSB. Energiforbruket beregnet av overnevnte forfattere er presentert i Tabell 2.18 i kapittel 2.5 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen*.



Figur 4.2 Levert energi for enebolig etter byggeår. Energiforbruket presentert som (SSB, 2012) er hentet fra Mjønes et al. (2012).



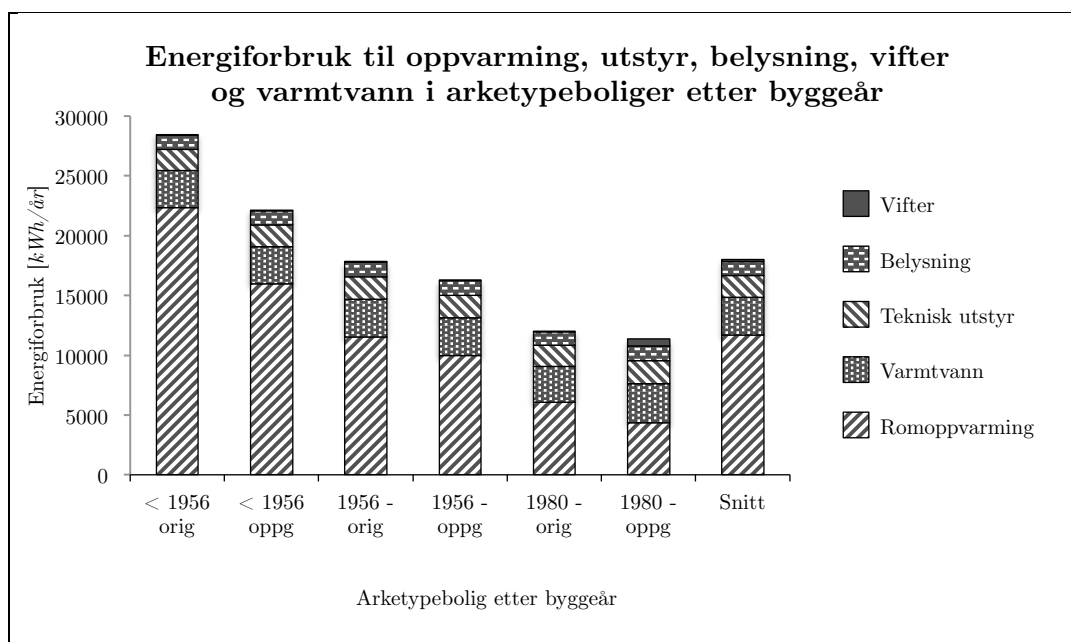
Figur 4.3 Levert energi for småhus etter byggeår. Energiforbruket presentert som (SSB, 2012) er hentet fra Mjønes et al. (2012).



Figur 4.4 Levert energi for boligblokk etter byggeår. Energiforbruket presentert som (SSB, 2012) er hentet fra Mjønes et al. (2012).

I kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* kommer det frem at det kan være nødvendig å avgjøre hva energien i en bolig brukes til ved vurdering av energibesparende tiltak. Figur 4.5 viser et snittet energiforbruket til henholdsvis oppvarming, varmtvann, teknisk utstyr, belysning og vifter for boligmassen.

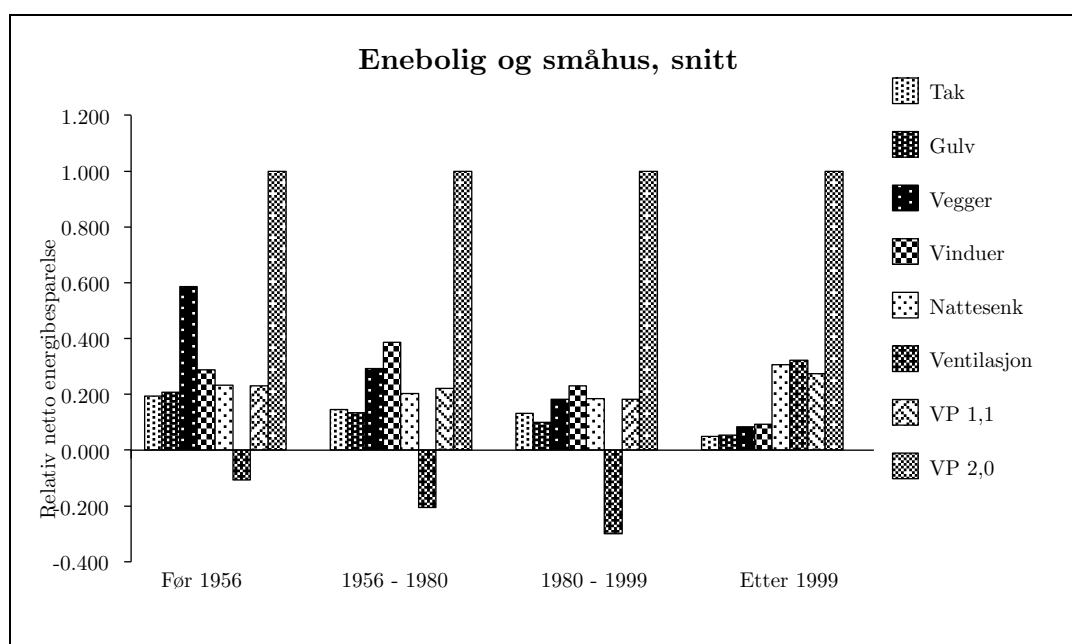
I kapittel 2.12 *Optimalisering* påpekes det av Hamdy et al. (2013), Wang et al. (2005) og Wright et al. (2002) at det er nødvendig med tilleggsinformasjon om optimaliseringsobjektet for å kunne styre optimaliseringen. Figur 4.5 inneholder slik tilleggsinformasjon. Det ble beregnet at den største andelen av energiforbruket går med til romoppvarming, særlig i eldre boliger.



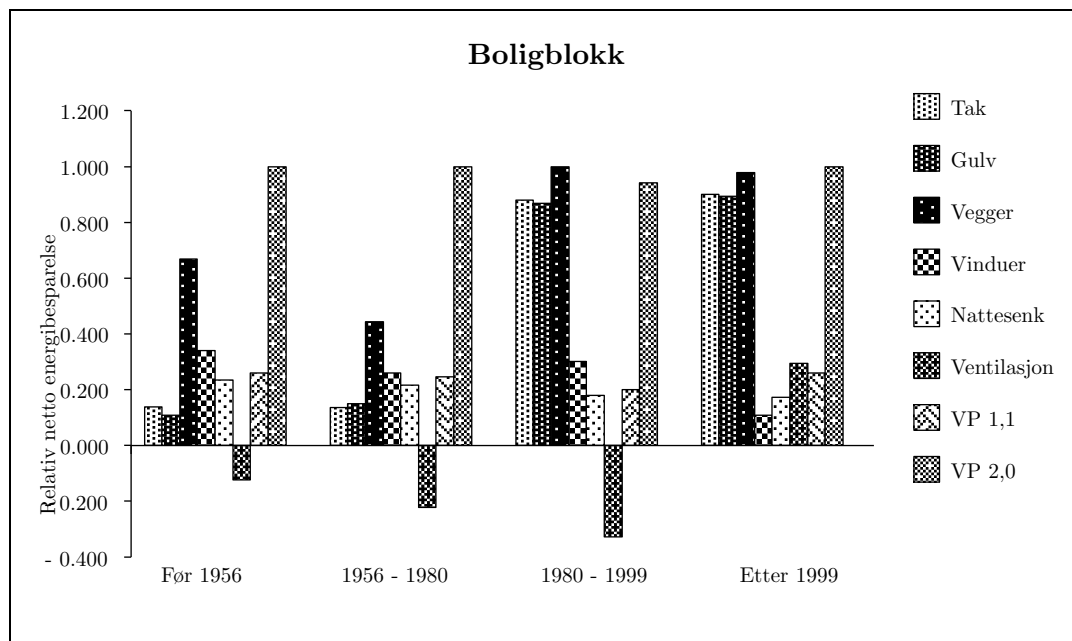
Figur 4.5 Fordeling av årsforbruk av energi etter byggeår.

4.1.3 Optimal oppgradering av boligmassen

Forskningsspørsmål to handler om det finnes et optimalt oppgraderingsnivå ved oppgradering av eksisterende boliger. Kapittel 3.1.3 *Optimalisering* tar for seg en fremgangsmåte for optimaliseringsprosessen. Optimaliseringen baserer seg på en stegvis prosess. Det første steget er å identifisere effekten av oppgraderingstiltaket individuelle effekt på boligen. Figur 4.6 og Figur 4.7 viser effekten av hvert av de individuelle tiltakene. For fremstillingen ble resultatene for enebolig og småhus slått sammen. I de aller fleste tilfellene var oppvarming med varmepumpe med en systemvirkningsgrad på 2,0 det mest effektive tiltaket. For eldre boliger, uten ventilasjonsanlegg, ga installasjon av ventilasjon en negativ effekt på energibesparelsen.



Figur 4.6 Relativ netto energibesparelse for enebolig og småhus. "VP 1,1" betegner et oppvarmingssystem med total systemvirkningsgrad på 1,1. "VP 2,0" er det samme systemet med systemvirkningsgrad på 2,0.

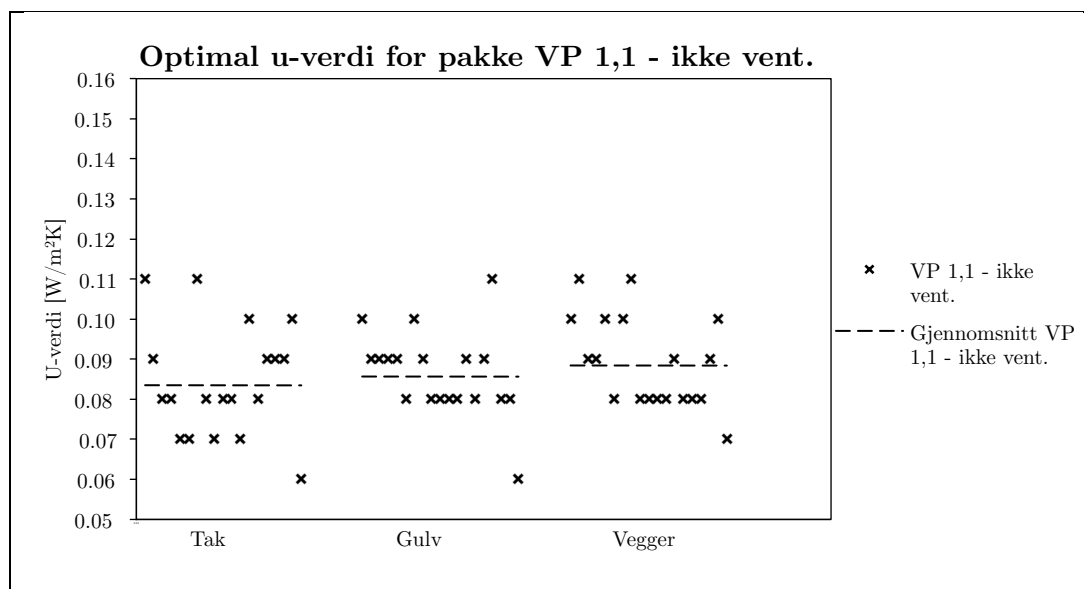


Figur 4.7 Relativ netto energibesparelse for boligblokk. "VP 1,1" betegner et oppvarmingssystem med total systemvirkningsgrad på 1,1. "VP 2,0" er det samme systemet med systemvirkningsgrad på 2,0.

I kapittel 3.1.3 *Optimalisering* er fire ulike oppgraderingspakker presentert. Disse pakkene er basert på prinsippet til Hamdy et al. (2013), Wang et al. (2005) og Wright et al. (2002) om at det er fordelaktig å styre optimaliseringsprosessen. De fire oppgraderingspakkene er navngitt etter innhold og definert som:

1. VP 1,1 – ikke ventilasjon
2. VP 2,0 – ikke ventilasjon
3. VP 1,1 – ventilasjon
4. VP 2,0 – ventilasjon

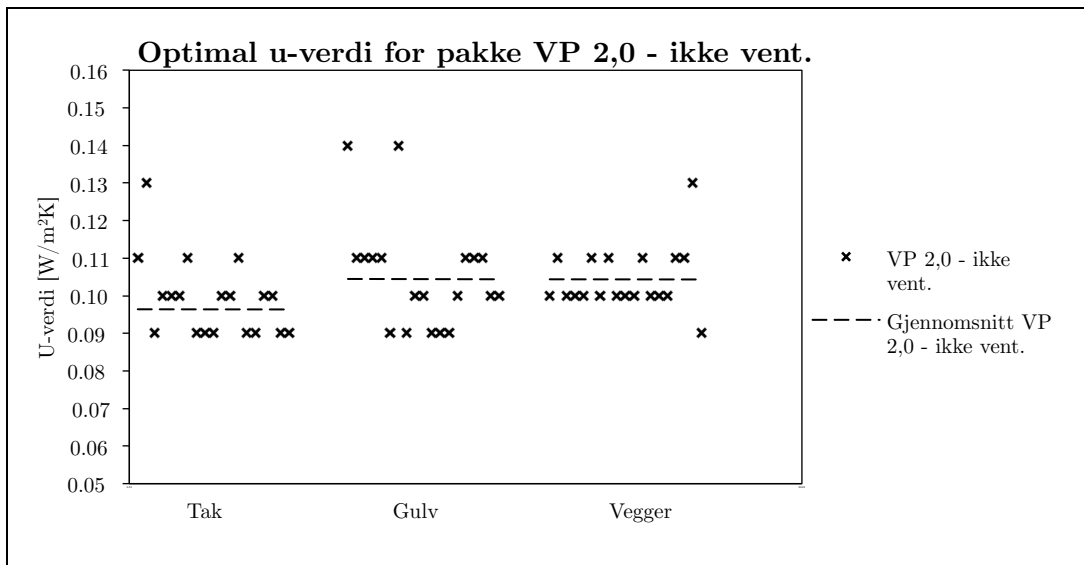
Figur 4.8 - 4.11 viser optimal U-verdi for henholdsvis tak, gulv og vegger for de fire pakkene. I vedlegg 3 presenteres optimal U-verdi for alle boligkategoriene. Figur 4.8 viser at optimal gjennomsnittlig U-verdi for henholdsvis tak, gulv og vegger ble beregnet til 0,084, 0,086 og 0,089 W/m²K for pakken “VP 1,1 - ikke vent”.



Figur 4.8 Optimal U-verdi for oppgraderingspakke “VP 1,1 - ikke vent”.

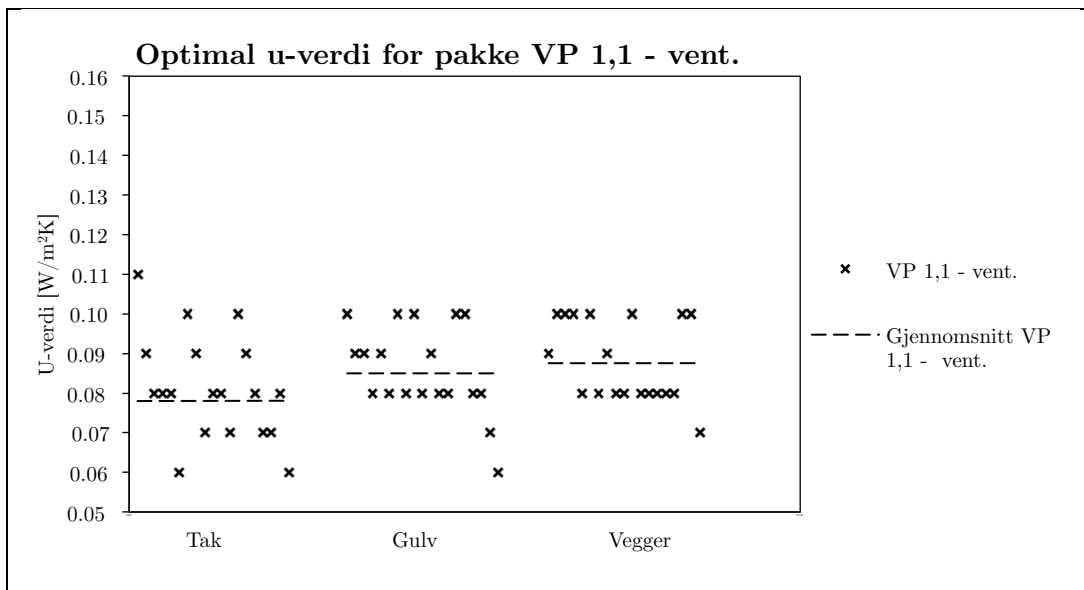
4.1 Resultater

Figur 4.9 viser at optimal gjennomsnittlig U-verdi for henholdsvis tak, gulv og vegger ble beregnet til 0,096, 0,105 og 0,105 W/m²K "VP 2,0 - ikke vent".



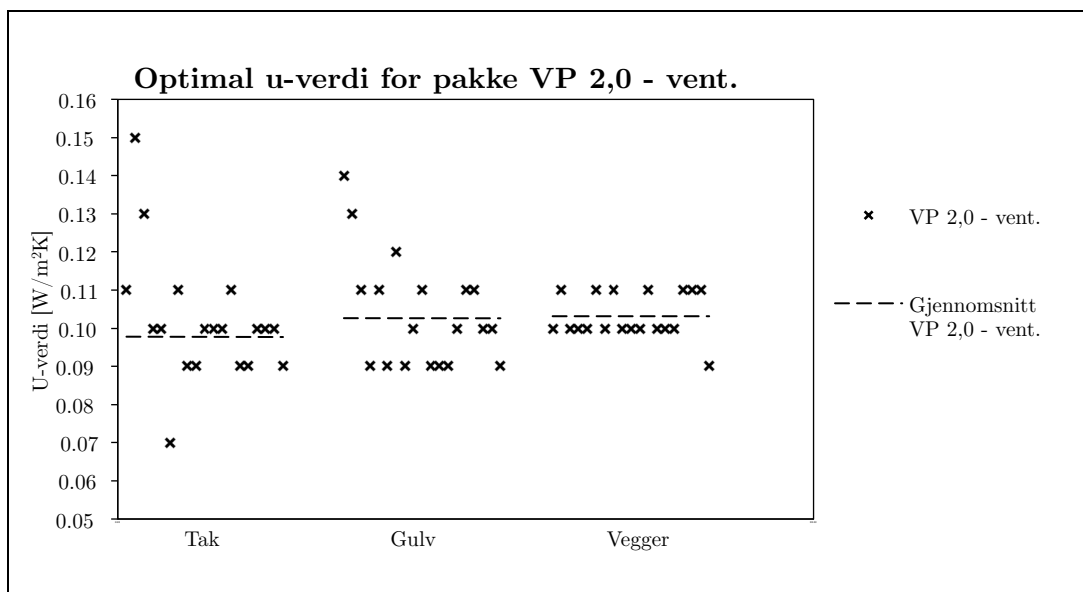
Figur 4.9 Optimal U-verdi for oppgraderingspakke "VP 2,0 - ikke vent".

Figur 4.10 viser at optimal gjennomsnittlig U-verdi for henholdsvis tak, gulv og vegger ble beregnet til 0,078, 0,085 og 0,088 W/m²K for "VP 1,1 - vent".



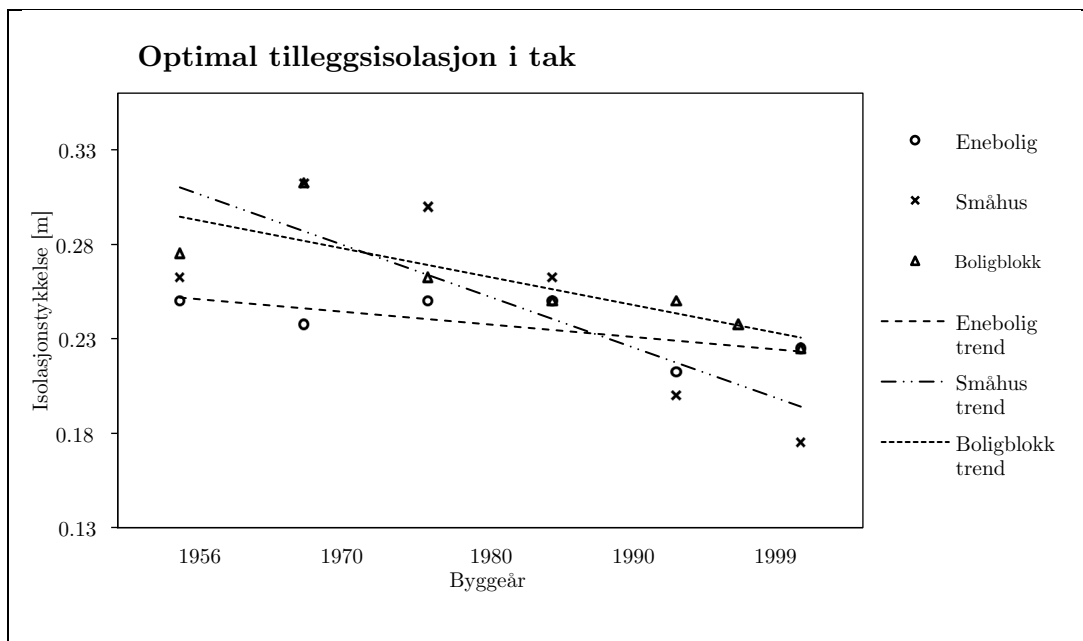
Figur 4.10 Optimal U-verdi for oppgraderingspakke "VP 1,1 - vent".

Figur 4.11 viser at optimal gjennomsnittlig U-verdi for henholdsvis tak, gulv og vegger ble beregnet til 0,098, 0,103 og 0,103 W/m^2K for “VP 2,0 - vent”.

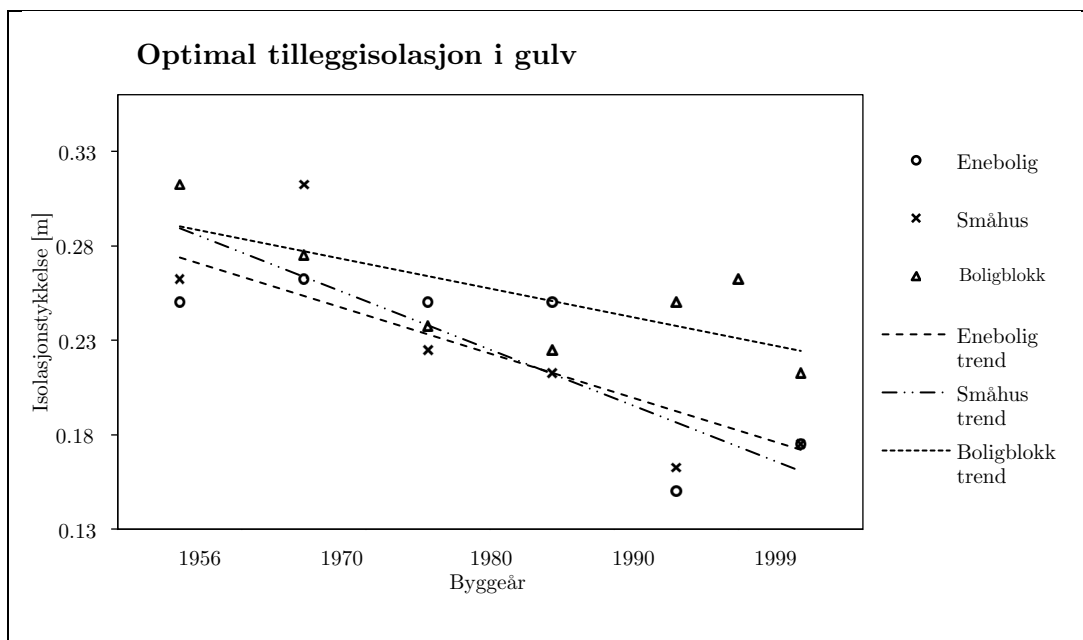


Figur 4.11 Optimal U-verdi for oppgraderingspakke “VP 2,0 - vent”.

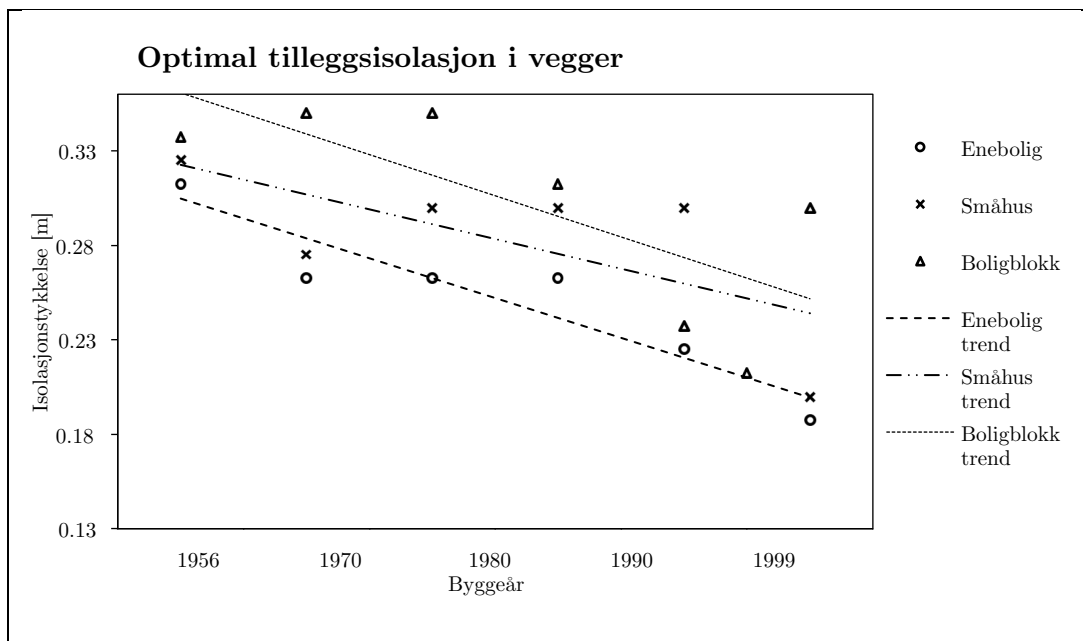
Figur 4.12, Figur 4.13 og Figur 4.14 viser optimal tykkelse av tilleggisolasjon. Isolasjonstykkelsen er vist for henholdsvis tak, gulv og vegger. I figurene ble det lagt inn en trendlinje for å beskrive endringer i optimal isolasjonstykkelse etter byggeår. I vedlegg 3 presenteres optimal tilleggisolasjonstykkelse for alle boligkategoriene. For å forenkle fremstillingen er tilleggisolasjonstykkelse vist som et gjennomsnitt av oppgraderingspakkene.



Figur 4.12 Optimal tilleggisolasjonstykkelse i tak.

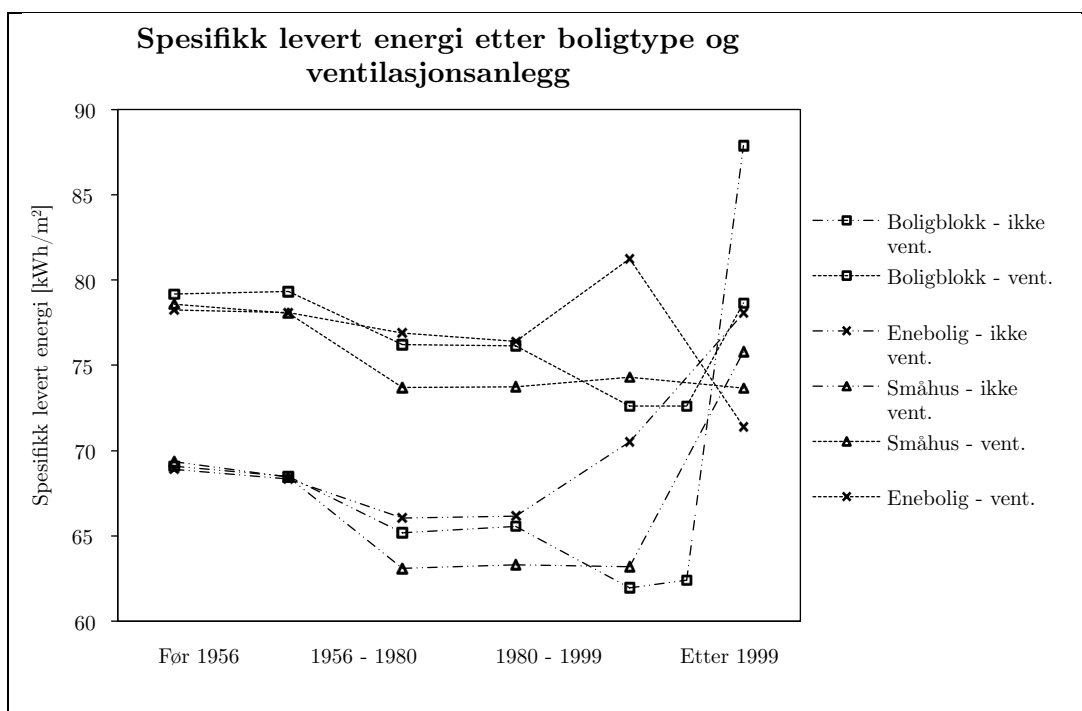


Figur 4.13 Optimal tilleggisolasjonstykkelse i gulv.



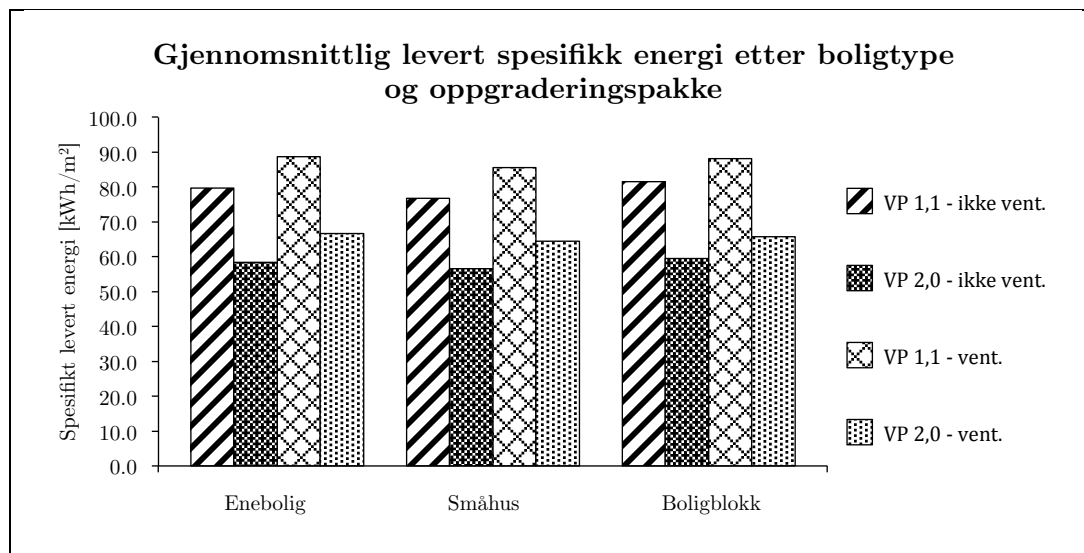
Figur 4.14 Optimal tilleggisolasjonstykkelse i vegger.

Figur 4.15 viser spesifikk levert energi til enebolig, småhus og boligblokker etter oppgradering til miljøoptimal løsning. I Figur 4.15 er det kun vist differansen ved å oppgradere med og uten ventilasjonsanlegg. Dette er vist med et snitt av oppvarmingsanleggene "VP 1,1" og "VP 2,0". I figuren viser de "nederste" plottene optimalt energiforbruk uten endringer på ventilasjonsanlegget. De "øverste" plottene viser optimalt energiforbruk med endringer på ventilasjonsanlegget. Boliger i kategorien "etter 1999" ble simulert med et originalt ventilasjonsanlegg med 50 % varmegjenvinning. Boliger bygget før 1999 ble simulert med naturlig ventilasjon. Figur 4.15 viser at boliger i kategorien "etter 1999" er de eneste boligene som oppnår en energibesparende effekt av å oppgradere ventilasjonen. Dette er vist i figuren ved at de "øverste" plottene oppnår et lavere energiforbruk enn de "nederste" plottene, i kategorien "etter 1999". Optimal spesifikk energi og energibesparelse for alle boligkategoriene er presentert i vedlegg 4.



Figur 4.15 Spesifikk levert energi for boligkategoriene med og uten ventilasjonsanlegg. Figuren leses ved å vurdere ulike boligtyper innen samme alderskategori (leses vertikalt). Ulike boligtyper er vist med trekant, firkant og kryss.

Variasjonene i spesifikk levert energi mellom de fire oppgraderingspakkene er vist i Figur 4.16. Figuren er ikke differensiert etter byggeår. Energiforbruk for henholdsvis eneboliger, småhus og boligblokker er vist med gjennomsnittsverdier.



Figur 4.16 Spesifikk levert energi for boligtype og oppgraderingspakke.

4.1.4 Energibesparende potensial i boligmassen

Det tredje forskningsspørsmålet handler om den eksisterende boligmassens energibesparende potensial. Ved å se på potensialet undersøkes effekten av å endre alle dagens boliger til den optimale løsningen som er beregnet i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen*. I Tabell 4.4, Tabell 4.5, Tabell 4.6 og Tabell 4.7 presenteres potensialet for de fire oppgraderingspakkene. Potensialet presenteres som netto energibesparelse. Boligmassens energibesparende potensial ble basert på det antallet boliger som er presentert i Tabell 2.8 i kapittel 2.2.3 *Antall boliger*. Tabell 4.4 - 4.7 er sammenliknbare med Tabell 4.3.

4.1 Resultater

Tabell 4.4 Netto spart energi ved implementering av pakke "VP 1,1 - ikke vent".

Byggeår*		Spart energi for boliger etter byggeår basert på VP1,1-ikke vent.**				
		Spr. en/ areal	Spr. en/ bolig	Spr. en/ beboer	Tot. spr. en	Relativ be.spr.
		<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/beboer</i>	<i>GWh</i>	<i>%</i>
Enebolig						
Før 1956	Orig.	198	27 655	11 062	781	67 %
	Oppg.	126	17 635	7 054	5 036	57 %
1956 - 1980	Orig.	85	12 120	4 848	2 230	48 %
	Oppg.	72	10 262	4 105	2 608	44 %
1980 - 1999	Orig.	28	4 529	1 812	1 353	23 %
Etter 1999	Orig.	25	3 951	1 580	464	19 %
Uoppgitt		74	11 052	4 421	1 164	44 %
Totalt					13 637	43 %
Småhus						
Før 1956	Orig.	190	19 555	8 889	339	67 %
	Oppg.	129	13 260	6 027	1 410	58 %
1956 - 1980	Orig.	73	8 126	3 694	390	46 %
	Oppg.	59	6 640	3 018	709	41 %
1980 - 1999	Orig.	40	4 150	1 886	496	33 %
Etter 1999	Orig.	30	2 909	1 322	228	24 %
Uoppgitt		71	7 488	3 404	145	45 %
Totalt					3 716	45 %
Boligblokk						
Før 1956	Orig.	172	11 726	7 329	285	66 %
	Oppg.	127	8 627	5 392	1 099	59 %
1956 - 1980	Orig.	101	6 556	4 097	312	55 %
	Oppg.	81	5 250	3 281	710	49 %
1980 - 1999	Orig.	36	2 503	1 564	200	31 %
	Oppg.	35	2 458	1 536	13	31 %
Etter 1999	Orig.	17	1 140	713	127	13 %
Uoppgitt		77	5 194	3 246	24	46 %
Totalt					2 769	46 %
Annen bygningstype						
Totalt					506	51 %
Totalt i boligmassen					20 628	44 %

* Originale boliger er i tabellen forkortet med orig. Oppgraderte boliger er i tabellen forkortet med oppg. Andelen oppgraderte boliger er definert i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* og kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi*.

** Spart energi er i tabellen forkortet med spr. en.

Tabell 4.5 Netto spart energi ved implementering av pakke "VP 2,0 - ikke vent".

Byggeår*	Spart energi for boliger etter byggeår basert på VP2,0-ikke vent**					
	Spr. en/ areal	Spr. en/ bolig	Spr. en/ beboer	Tot. spr. en	Relativ be.spr.	
	<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/beboer</i>	<i>GWh</i>	<i>%</i>	
Enebolig						
Før 1956	Orig.	220	30 823	12 329	871	75 %
	Oppg.	148	20 722	8 289	5 917	67 %
1956 - 1980	Orig.	107	15 214	6 086	2 799	60 %
	Oppg.	94	13 328	5 331	3 387	57 %
1980 - 1999	Orig.	52	8 499	3 399	2 539	43 %
Etter 1999	Orig.	51	8 184	3 273	961	40 %
Uoppgitt		97	14 464	5 786	1 524	58 %
Totalt					17 999	57 %
Småhus						
Før 1956	Orig.	213	21 917	9 962	379	75 %
	Oppg.	152	15 610	7 095	1 660	68 %
1956 - 1980	Orig.	93	10 370	4 714	498	59 %
	Oppg.	79	8 858	4 026	946	55 %
1980 - 1999	Orig.	60	6 225	2 830	744	50 %
Etter 1999	Orig.	53	5 237	2 381	410	43 %
Uoppgitt		93	9 732	4 424	188	58 %
Totalt					4 825	58 %
Boligblokk						
Før 1956	Orig.	196	13 310	8 319	323	74 %
	Oppg.	150	10 214	6 383	1 301	69 %
1956 - 1980	Orig.	122	7 938	4 961	377	66 %
	Oppg.	102	6 618	4 136	895	62 %
1980 - 1999	Orig.	55	3 861	2 413	309	49 %
	Oppg.	54	3 806	2 379	19	48 %
Etter 1999	Orig.	47	3 169	1 981	353	37 %
Uoppgitt		100	6 761	4 226	31	60 %
Totalt					3 609	60 %
Annen bygningstype						
Totalt					658	66 %
Totalt i boligmassen					27 091	58 %

* Originale boliger er i tabellen forkortet med orig. Oppgraderte boliger er i tabellen forkortet med oppg. Andelen oppgraderte boliger er definert i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* og kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi*.

** Spart energi er i tabellen forkortet med spr. en.

4.1 Resultater

Tabell 4.6 Netto spart energi ved implementering av pakke "VP 1,1 - vent".

Byggeår*		Spart energi for boliger etter byggeår basert på VP1,1-vent**				
		Spr. en/ areal	Spr. en/ bolig	Spr. en/ beboer	Tot. spr. en	Relativ be.spr.
		<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/beboer</i>	<i>GWh</i>	<i>%</i>
Enebolig						
Før 1956	Orig.	187	26 178	10 471	739	64 %
	Oppg.	115	16 158	6 463	4 614	52 %
1956 - 1980	Orig.	74	10 563	4 225	1 944	42 %
	Oppg.	61	8 660	3 464	2 200	37 %
1980 - 1999	Orig.	16	2 657	1 063	794	13 %
Etter 1999	Orig.	32	5 228	2 091	614	26 %
Uoppgitt		65	9 691	3 876	1 021	39 %
Totalt					11 927	38 %
Småhus						
Før 1956	Orig.	179	18 416	8 371	319	63 %
	Oppg.	118	12 113	5 506	1 288	53 %
1956 - 1980	Orig.	61	6 864	3 120	329	39 %
	Oppg.	48	5 385	2 448	575	34 %
1980 - 1999	Orig.	29	2 956	1 344	353	24 %
Etter 1999	Orig.	32	3 181	1 446	249	26 %
Uoppgitt		62	6 543	2 974	126	39 %
Totalt					3 240	39 %
Boligblokk						
Før 1956	Orig.	161	10 950	6 844	266	61 %
	Oppg.	115	7 844	4 902	999	53 %
1956 - 1980	Orig.	89	5 772	3 607	274	48 %
	Oppg.	69	4 453	2 783	603	42 %
1980 - 1999	Orig.	24	1 697	1 061	136	21 %
	Oppg.	24	1 652	1 033	8	21 %
Etter 1999	Orig.	29	1 943	1 214	216	22 %
Uoppgitt		70	4 732	2 958	22	42 %
Totalt					2 524	42 %
Annen bygningstype						
Totalt					461	46 %
Totalt i boligmassen					18 152	39 %

* Originale boliger er i tabellen forkortet med orig. Oppgraderte boliger er i tabellen forkortet med oppg. Andelen oppgraderte boliger er definert i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* og kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi*.

** Spart energi er i tabellen forkortet med spr. en.

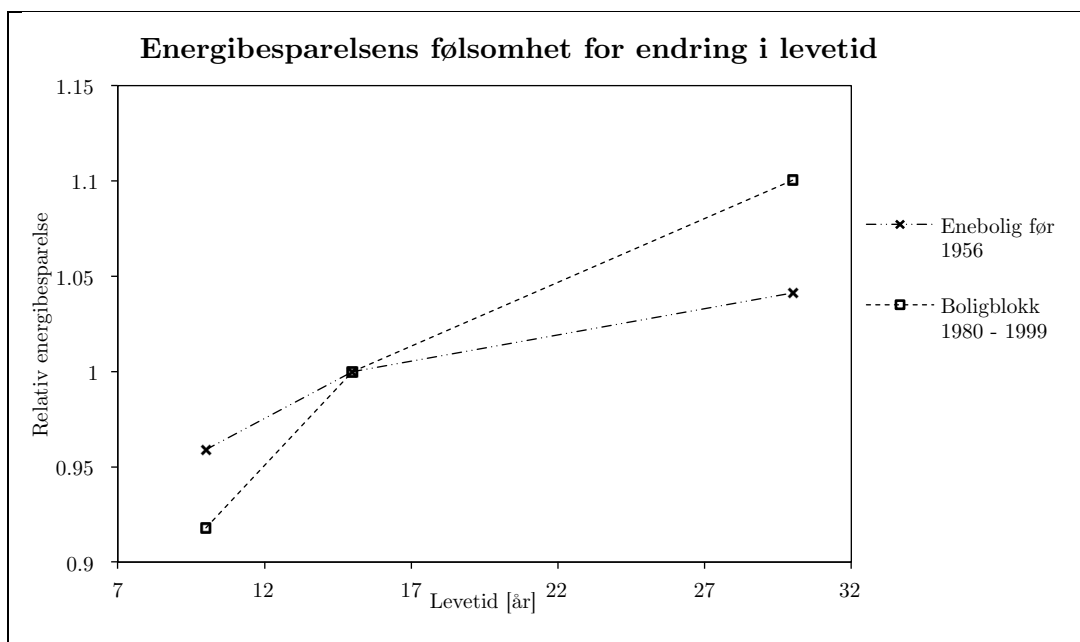
Tabell 4.7 Netto spart energi ved implementering av pakke "VP 2,0 - vent".

Byggeår*	Spart energi for boliger etter byggeår basert på VP2,0-ikke vent**					
	Spr. en/ areal	Spr. en/ bolig	Spr. en/ beboer	Tot. spr. en	Relativ be.spr.	
	<i>kWh/m²</i>	<i>kWh/bolig</i>	<i>kWh/beboer</i>	<i>GWh</i>	<i>%</i>	
Enebolig						
Før 1956	Orig.	211	29 577	11 831	835	72 %
	Oppg.	139	19 452	7 781	5 555	63 %
1956 - 1980	Orig.	98	13 884	5 554	2 555	55 %
	Oppg.	85	12 033	4 813	3 058	52 %
1980 - 1999	Orig.	42	6 803	2 721	2 033	34 %
Etter 1999	Orig.	55	8 795	3 518	1 033	43 %
Uoppgitt		89	13 249	5 300	1 396	53 %
Totalt					16 465	52 %
Småhus						
Før 1956	Orig.	203	20 957	9 526	363	72 %
	Oppg.	142	14 652	6 660	1 558	64 %
1956 - 1980	Orig.	83	9 328	4 240	448	53 %
	Oppg.	70	7 842	3 565	838	49 %
1980 - 1999	Orig.	51	5 246	2 385	627	42 %
Etter 1999	Orig.	54	5 316	2 416	416	43 %
Uoppgitt		85	8 929	4 059	172	53 %
Totalt					4 422	53 %
Boligblokk						
Før 1956	Orig.	186	12 664	7 915	307	71 %
	Oppg.	140	9 543	5 964	1 216	65 %
1956 - 1980	Orig.	112	7 294	4 559	347	61 %
	Oppg.	92	5 968	3 730	807	56 %
1980 - 1999	Orig.	45	3 182	1 989	254	40 %
	Oppg.	45	3 140	1 962	16	40 %
Etter 1999	Orig.	53	3 586	2 241	399	42 %
Uoppgitt		94	6 324	3 952	29	56 %
Totalt					3 376	56 %
Annen bygningstype						
Totalt					616	62 %
Totalt i boligmassen					24 878	53 %

* Originale boliger er i tabellen forkortet med orig. Oppgraderte boliger er i tabellen forkortet med oppg. Andelen oppgraderte boliger er definert i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* og kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi*.

** Spart energi er i tabellen forkortet med spr. en.

Ved beregning av boligmassens optimale oppgraderingsmengde og energibesparende potensial ble det gjort en forenkling ved å definere én bestemt levetid på oppgraderingstiltakene. Dette ble gjort med bakgrunn i 2.7.4 *Fremtidens bygningsmaterialer*. Levetiden som ble brukt i beregningene er 15 år. Figur 4.17 viser en følsomhetsanalyse av energibesparelsen relatert til levetiden. Figuren viser et lavere stigningstall for lengre levetider. Som en forenkling ble det valgt å utføre følsomhetsanalysen på to boliger. Boligtypene ble valgt med hensyn på både boligtype og alder.



Figur 4.17 Levetidens påvirkning på energibesparelsen.

4.1.5 Klimamål - energiforbruk

Det fjerde forskningsspørsmålet handler om myndighetenes klimamål og 2-gradersmålet. Målene er definerte målsetninger om fremtidige kutt i energiforbruk og klimagassutslipp. Som beskrevet i kapittel 3.1.4 *Fremskrivning av boligmassen* må boligmassens fremtidige antall fremskrives for å vurdere fremtidige klimamålsetninger.

Fremskrivning av boligmassen

I kapittel 3.1.4 *Fremskrivning av boligmassen* beskrives det hvordan boligmassen kan fremskrives til år 2020 og 2040 ved bruk av en dynamisk modell for boligmassens endringer. Tabell 4.8 viser antall boliger og antall nye boliger i år 2020 og 2040. Antall boliger ble justert i forhold til Tabell 2.8 i kapittel 2.2.3 *Antall boliger*, for å samsvare med det boligantallet som ble benyttet i denne oppgaven. I kapittel 2.11.2 *Dynamisk modell* presenteres tre scenarier for utviklingene i boligmassen. Disse tre scenarioene kalles lav, middels og høy. Tabell 4.8 viser de tre scenarioene.

Tabell 4.8 Fremskrivning av boligmassen.

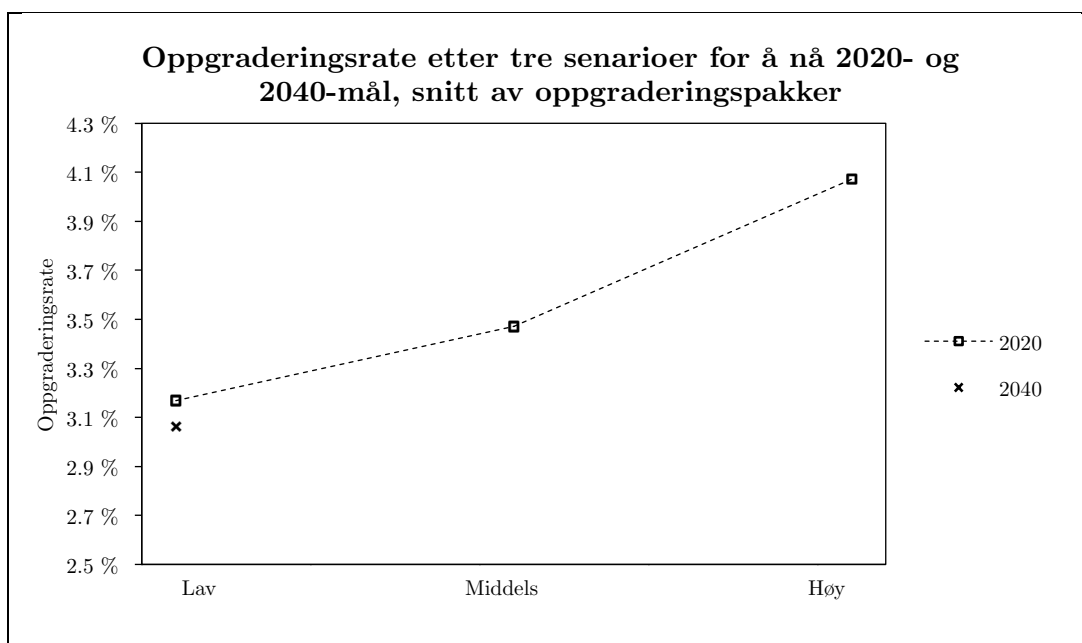
År	Antall boliger og nye boliger i 2020 og 2040 relatert til 2011					
	Lav		Middels		Høy	
	Antall boliger	Nye boliger	Antall boliger	Nye boliger	Antall boliger	Nye boliger
2011*	2 415 000		2 415 000		2 415 000	
2020**	2 441 000	30 000	2 564 000	170 000	2 788 000	426 000
2040**	2 579 000	212 000	2 886 000	594 000	3 577 000	1 464 000

* Antall boliger etter kapittel 2.2.3 *Antall boliger*.

** Nye boliger relatert til 2011-nivå.

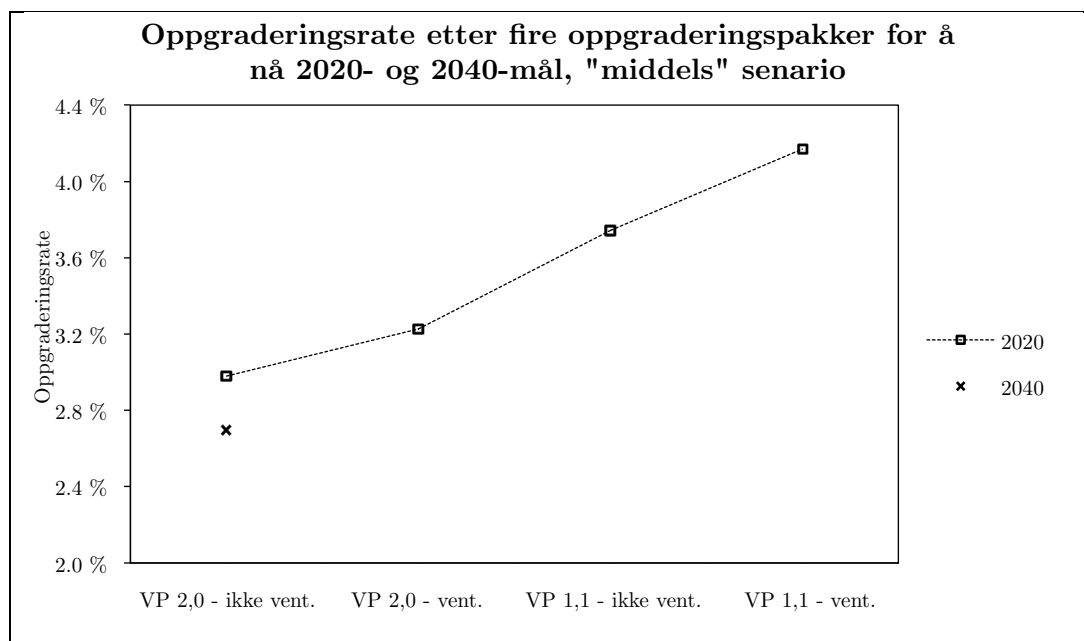
Oppgraderingsrater

Figur 4.18 viser de laveste oppgraderingsratene nødvendig for å nå myndighetenes målsetning om redusert energiforbruk fra boligmassen i år 2020 og 2040. I kapittel 1.1 *Bakgrunn* er målsetningene presentert som en 17 % reduksjon innen år 2020 og halvering innen 2040. Oppgraderingsratene er vist etter boligutviklings-senarioene lav, middels og høy. Det er kun vist oppgraderingsrater frem mot 2040 i senario lav. Målsetningen om en halvering av energiforbruket nås ikke i senario middels og høy, selv ved en fullstendig oppgradering av boligmassen. Tabell 4.9 viser energiforbruket i boligmassen etter en fullstendig oppgradering etter senario middels og høy.



Figur 4.18 Nødvendig oppgraderingsrate for ulike senarioer for å nå 2020- og 2040-mål. Oppgraderingsrater for 2040-målsetning er kun vist med et kryss i senario lav. Tabell 4.9 viser at målsetningen om halvering ikke nås etter senario middels og høy.

Figur 4.19 viser nødvendige oppgraderingsrater, basert på de fire oppgraderingspakkene, for å nå målsetningene innen år 2020 og 2040. Boligutvikling etter middels senario ble lagt til grunn for beregningene. For 2040-målsetningen er det kun oppgraderingspakken "VP 2,0 - ikke vent." hvor målsetningen om halvering av energiforbruket nås. Tabell 4.9 viser energiforbruket i boligmassen etter en fullstendig oppgradering etter pakkene "VP 2,0 - vent", "VP 1,1 - ikke vent." og "VP 1,1 - vent."



Figur 4.19 Nødvendig oppgraderingsrate for de ulike oppgraderingspakkene for å nå 2020- og 2040-mål. Oppgraderingsrater for 2040-målsetning er kun vist med et kryss for pakken "VP 2,0 - ikke vent.". Tabell 4.9 viser at målsetningen om halvering ikke nås etter de tre andre pakkene.

4.1 Resultater

Tabell 4.9 viser boligmassens energiforbruk i år 2040 etter ulike oppgraderingspakker og boligutviklingssenarioer. Av Figur 4.18 og Figur 4.19 kommer det frem at Arnstad-rapportens målsetning om halvering av energiforbruket innen år 2040 kun nås etter utviklingssenario lav, eller ved oppgraderingspakke ”VP 2,0 – ikke vent”. Tabell 4.9 viser energibesparelsen i år 2040 etter de andre pakkene og senarioene.

Tabell 4.9 Energiforbruket til boligmassen i år 2040 etter ulike pakker og utviklingssenarioer.

Pakke/ mål	Oppg.rater og energibesparelse			
	Oppg.rater	Levert energi	Besparelse	Relativ besparelse
	%	kWh	kWh	%
P.t.				
Boligmassen	-	46 765	-	-
Fremskrevet - middels***				
”VP 1,1 - ikke vent.” - 2040 - Arnstrad-mål	2,9 %*	27 365	19 400	41 %
”VP 2,0 - ikke vent.” - 2040 - Arnstrad-mål	2,7 %	23 383	23 383	50 %
”VP 1,1 - vent.” - 2040 - Arnstrad-mål	2,9 %*	29 698	17 067	36 %
”VP 2,0 - vent.” - 2040 - Arnstrad-mål	2,9 %*	23 688	23 077	49 %
Fremskrevet - snitt pakker****				
Lav - 2040 - Arnstrad-mål	3,1 %	23 383	23 383	50 %
Middels - 2040 - Arnstrad-mål	2,9 %*	25 575	21 190	45 %
Høy - 2040 - Arnstrad-mål	4,0 %**	32 319	14 446	31 %

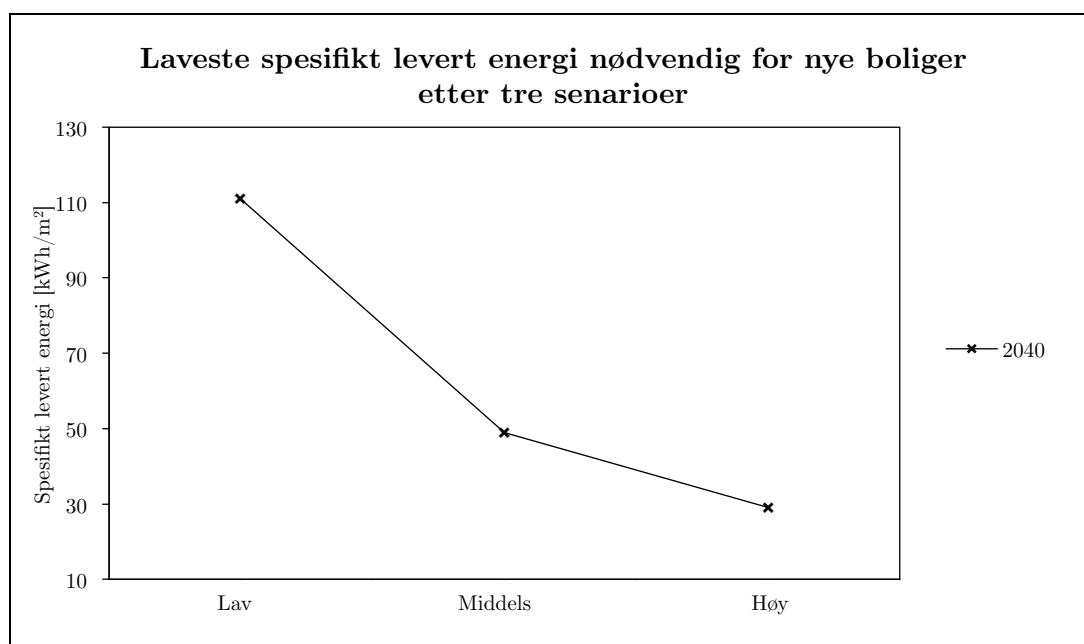
* Målsetningen om en halvering av energiforbruket nås ikke. Oppgraderingsraten representerer derfor kun den nødvendige raten for en fullstendig oppgradering av boligmassen. Dette innebærer at 79 % av boligmassen i år 2040 har gjennomgått oppgraderinger. De resterende 21 % er i år 2040 nye boliger.

** Målsetningen om en halvering av energiforbruket nås ikke. Oppgraderingsraten representerer derfor kun den nødvendige raten for en fullstendig oppgradering av boligmassen. Dette innebærer at 59 % av boligmassen i år 2040 har gjennomgått oppgraderinger. De resterende 41 % er i år 2040 nye boliger.

*** Boligmassen er fremskrevet til år 2040 og en vurdering mot Arnstad-rapportens målsetning om halvering av energiforbruket er presentert. Utviklingen av boligmassen holdes konstant til utviklingssenario middels.

**** Boligmassen er fremskrevet til år 2040 og en vurdering mot Arnstad-rapportens målsetning om halvering av energiforbruket er presentert. De fire oppgraderingspakkene er snittet og gjennomsnittlig energiforbruk er 73 kWh/m².

Den optimale oppgraderingsmengden for den eksisterende boligmassen er vist i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen*. Av Figur 4.18 og Figur 4.19 kommer det frem at myndighetenes målsetning om en halvering av energiforbruket innen år 2040 ikke oppnås med en fullstendig og miljøoptimal oppgradering av boligmassen. En mulig løsning for å nå halveringsmålet er å redusere energiforbruket i nye boliger. Figur 4.20 viser nødvendig gjennomsnittlig spesifikk levert energi for nye boliger bygget frem mot år 2040 for å nå målsetningen om halvering av energiforbruket. Figur 4.20 viser dette for scenarioene lav, middel og høy. Etter scenario middels er det nødvendig at nye boliger bygges med lavere spesifikk energibruk enn 49 kWh/m^2 .



Figur 4.20 Nødvendig spesifikk levert energi for å nå 2040-målene ved tre ulike scenarioer for utvikling av boligareal.

4.1.6 Klimamål - klimagasser

I kapittel 1.1 *Bakgrunn* kommer det frem at FNs klimapanel har definert en målsetning om å halvere utslippene av klimagasser. En reduksjon av klimagassutslippet er også noe norske myndigheter satser på. Tabell 4.1 viser boligmassens klimagassutslipp per dags dato, reduksjonspotensialet i dagens boligmasse etter fire oppgraderingspakker og klimagassutslippet fra boligmassen fremskrevet til år 2020 og år 2040. Tabellen viser netto utslipp og inkluderer derfor tilført bundet karbon. Klimagassutslippet i dagens boligmasse ble basert på en energimiks som representerer den reelle sammensetningen av energibærerne presentert i Tabell 3.2 - 3.4 i kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi*. Energimiksen som ble bruk for å beregne potentialet og EU- og Arnstad-mål ble basert på 90 % nordisk elektrisitet og 10 % vedfyring.

Tabell 4.10 Utslipp og reduksjon av CO₂-ekvivalenter.

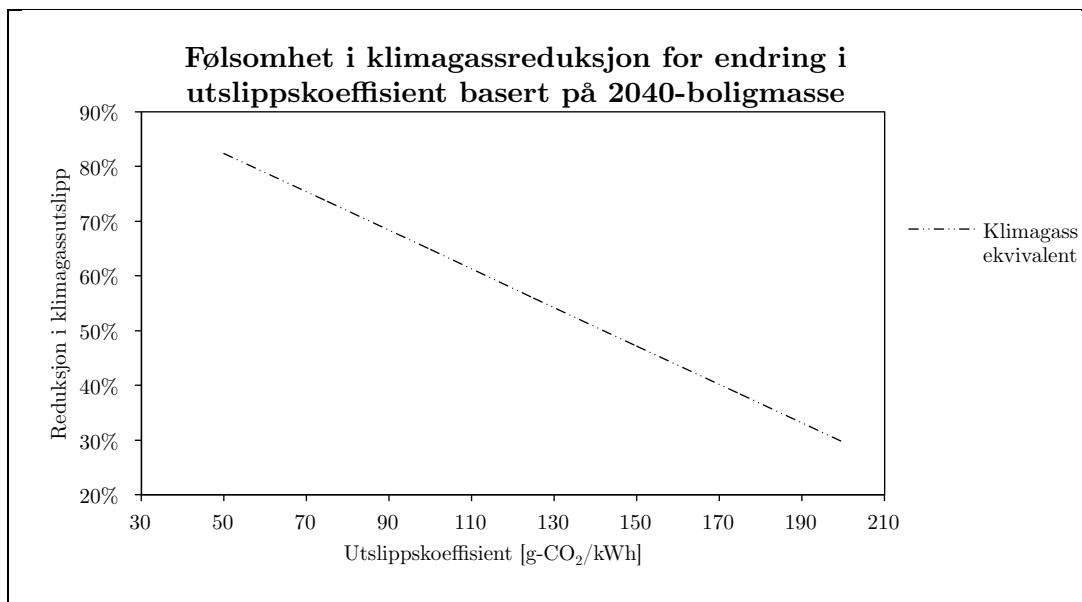
Pakke/ mål	Total netto utslipp og reduksjon av CO ₂ -ekvivalenter			
	Utslipps- koeffisient	Utslipp	Besparelse	Relativ besparelse
	<i>g-CO₂/kWh</i>	<i>mill tonn</i>	<i>mill tonn</i>	%
P.t.				
Boligmassen	155	7,26	-	-
Potensial				
VP 1,1 - ikke vent.	163	3,90	3,36	46 %
VP 2,0 - ikke vent.	163	2,85	4,41	61 %
VP 1,1 - vent.	163	4,31	2,96	41 %
VP 2,0 - vent.	163	3,21	4,05	56 %
Fremskrevet - middels				
Full impl. 2020 - EU-mål *	163	6,32	0,94	13 %
Full impl. 2040 - Arnstad-mål**	163	4,17	3,10	43 %
Full impl. 2040 - IPCC-mål***	142	3,63	3,63	50 %

* Full impl. 2020 - EU-mål er brukt for å betegne den boligsammensetningen som er nødvendig for å nå EUs målsetning om 17 % reduksjon av energiforbruket fra boliger. Dette innebærer at 34 % av boligmassen i år 2020 har gjennomgått oppgradering. 7 % er nye boliger.

** Full impl. 2040 - Arnstad-mål er brukt for å betegne den boligsammensetningen som er nødvendig for å nå Arnstad-utvalgets målsetning om å halvere energiforbruket fra boliger. Dette innebærer at 79 % av boligmassen i år 2040 har gjennomgått oppgraderinger. De resterende 21 % er i år 2040 nye boliger

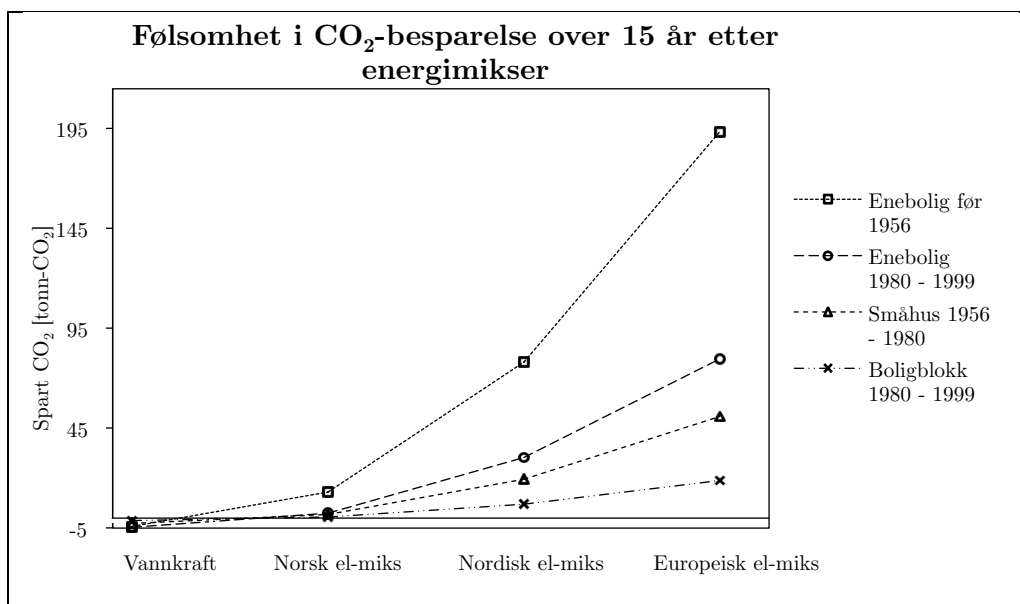
*** Full impl. 2040 - IPCC-mål er brukt for å betegne den boligsammensetningen som er nødvendig for å nå FNs klimapanel's målsetning om å halvere utslippene av klimagasser fra boliger. Dette innebærer at 79 % av boligmassen i år 2040 har gjennomgått oppgraderinger. De resterende 21 % er i år 2040 nye boliger

Tabell 4.10 viser at det er nødvendig å redusere utslippskoeffisienten for å nå FN's klimapanel's målsetning om halvering av klimagassutslippet innen 2040. I Figur 4.21 er det vist en følsomhetsanalyse av hvordan endring i utslippskoeffisienten påvirker utslippsreduksjonen av klimagasser. Følsomhetsanalysen ble basert på en fullstendig oppgradering av dagens boliger innen år 2040.



Figur 4.21 Følsomhetsanalyse for endring i utslippskoeffisienter.

I kapittel 3.1.5 *Klimagassutslipp* er det forklart at optimaliseringsprosessen i denne oppgaven ble utført ved å optimalisere bundet energi mot driftsenergi. I det samme kapittelet er det gitt en presentasjon av en alternativ fremgangsmåte hvor optimaliseringsprosessen utføres med hensyn på bundet karbon og klimagassutslipp fra driften. En slik alternativ fremgangsmåte kan påvirke resultatet, da valg av energimiks blir en tilleggsvariabel. I Figur 4.22 er det vist en følsomhetsanalyse av hvordan spart CO₂ endrer seg med ulike energimikser. Figuren viser at optimalisering ved bruk av vannkraft gir negativ CO₂-besparelse.



Figur 4.22 Energimiksens påvirkning på CO₂-besparelsen over et 15 års perspektiv.

4.2 Diskusjon

Dette kapitlet bygger på de foregående kapitlene og interessante funn i teori- og resultatdelen belyses. Diskusjonen er strukturert rundt forskningsspørsmålene og en presentasjon av hvert forskningsspørsmål er gitt i starten av hver diskusjonsdel. Avslutningsvis presenteres aktuelle feilkilder for beregningene.

4.2.1 Oppbygning og forbruk av driftsenergi

Hvordan er den eksisterende boligmassen bygget opp og hvilket forbruk av driftsenergi har boligmassen?

Boligmassens oppbygning

I denne oppgaven benyttes bottom-up-metoden for å beregne boligmassens driftsenergi. I kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* kommer det frem at bottom-up-metoden er fordelaktig når ulike tiltak på boligmassen skal evalueres. Dette er bakgrunnen for valget av bottom-up-metoden i oppgaven.

En ulempe ved bruk av bottom-up-metoden er at den baserer seg på detaljert og omfattende informasjon om boligmassens oppbygning. Flere forskere har forsøkt å beskrive boligmassens oppbygning. I kapittel 2.2 *Boligmassen* er det gitt en presentasjon av ulike alternative oppbygninger. Myhre (1995) gikk, med sitt arbeid, i dybden for å beskrive boligmassens oppbygning basert på dens fysiske og tekniske utforming. I de påfølgende 10-årene har flere benyttet seg av arbeidet til Myhre (1995) for å beskrive boligmassen. For dagens boligmasse er det i utgangspunktet arbeidet til Mjønes et al. (2012) og Pauliuk et al. (2013) som er mest oppdatert. Allikevel viser det seg at Pauliuk et al. (2013) i stor grad benytter seg av eldre data utarbeidet av Myhre, mens Mjønes et al. (2012) i stor grad har gjennomført en ny og oppdatert kartlegging av boligmassen.

Oppbygningen av boligmassen er basert på en inndeling etter boligtype og byggeår. Det er konsensus for at inndelingen enebolig, småhus og boligblokk brukes for å beskrive hovedbygningstypene i boligmassen. Når det gjelder inndeling etter årstall har Myhre (1995) blant annet forankret dette i historisk utvikling av byggeskikker. Som Tabell 2.4 i kapittel 2.2 *Boligmassen* viser støtter Mjønes et al. (2012) inndelingen til Myhre. For å begrense datamengden og optimaliseringsprosessen er det i denne oppgaven valgt å slå sammen noen av kategoriene som benyttes av Myhre og Mjønes. I kapittel 2.2.2 *Boligmassens historiske utvikling* kommer det frem at det rundt midten av 1950-tallet ble et tydelig skifte mot bedre isolerte hus. Fra midten av 1950-tallet skjedde utviklingen mer gradvis, før isolasjonstykkelsen økte med energiprisene tidlig på 1980-tallet. I 1997 kom en teknisk forskrift som satte strenge krav til isolasjonstykkelser. For å kategorisere boliger etter byggeår er det derfor sett på

disse endringene og kategoriseringen er definert med skiller i år 1956, 1980 og 1999.

I denne oppgaven er fysisk og teknisk utforming av boligmassen i stor grad basert på data hentet fra Mjønes et al. (2012) og Myhre (1995). For beregning av driftsenergien i boligmassen er innetemperatur, lekkasjetall og ventilasjon, oppvarmingssystem, boligens termiske egenskaper og bruksarealet av stor betydning.

For innetemperatur er det valgt verdier fra Myhre (1995). Verdiene samsvarer i stor grad med tall fra NS 3031:2007. Gjennomsnittstemperaturene til Myhre (1995) og Mjønes et al. (2012) er lavere for eldre boliger enn for nye. Det virker som en fornuftig antakelse ettersom eldre boliger gjerne har dårligere termiske egenskaper enn nye boliger.

Det er brukt verdier for lekkasjetall og ventilasjon fra Mjønes et al. (2012). Tabell 2.13 i kapittel 2.2.8 *Lekkasjetall og ventilasjon* viser at det er uenighet blant innhentet litteratur. I tabellen kan det stilles spørsmål ved ventilasjonsmengdene presentert av Thyholt et al. (2009), da de er lavere enn de andre presenterte verdiene. Myhre (1995), på sin side, oppgir verdier for infiltrasjon som reelle verdier. Det betyr at verdiene ikke er overførbare til det standardiserte lekkasjetallet (n_{50}). Mjønes et al. (2012) sine verdier treffer til gjengjeld best med verdier gitt i NS 3031:2007, som er de standardiserte verdiene for energiberegninger.

Valg av oppvarmingssystem er basert på Mjønes et al. (2012). Det er heller ikke for oppvarmingssystem konsensus i litteraturen. Mjønes sine verdier er til gjengjeld blant de mest oppdaterte og dette er bakgrunnen for at de verdiene er valgt. For virkningsgrad til oppvarmingssystemene er det valgt verdier fra Mjønes et al. (2012). Mjønes justerer virkningsgraden for varmpumpe til en verdi som, i følge Mjønes, er den reelle virkningsgraden til varmpumper. Mjønes argumenterer for at flere som installerer varmpumpe øker temperaturen i boligen og at den reelle virkningsgraden derfor går ned. I tillegg er effekten av luft-til-luft-varmpumpe lavest i den perioden av året da oppvarmingsbehovet er størst (Novakovic et al., 2007). Arbeidet med å vurdere virkningsgrad for varmpumper avdekket at en konkretisering av den reelle virkningsgraden til varmpumper ikke eksisterer. Ved beregning av boligens driftsenergi benyttes ofte verdier fra NS 3031:2007. Virkningsgraden i standarden overestimerer trolig effekten av luft-til-luft-varmpumper. Det gir luft-til-luft-varmpumpe en falsk fordel i forhold til andre oppvarmingssystemer.

I kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* er det vist at en andel av boligmassen allerede har gjennomgått oppgraderinger. Det er derfor valgt å dele boligmassen inn i oppgradert og originale boliger. Mye av litteraturen benytter seg av en mer

omfattende inndeling basert på mengden oppgraderinger innen hver bolig. Som beskrevet i kapittel 3.1.2 *Modellering av driftsenergi* er det valgt å vekte de termiske egenskapene til boligen slik at de gjenspeiler den oppgraderingsmengden som er gjennomført. Dette gir en grovere inndeling av boligmassen, men til gjengjeld færre simuleringer i optimaliseringsprosessen. Totalt sett blir den beregnede driftsenergien innen hver arketypebolig riktig ved bruk av denne metoden. Verdier for den oppgraderingsmengden som er gjennomført i boligmassen er basert på Mjønes et al. (2012). Thyholt et al. (2009), som baserer seg på verdier utarbeidet av Myhre (1995), er ikke brukt i denne oppgaven, da det virker som at Thyholt har tolket arbeidet til Myhre feil. Dette er kommentert med en fotnote i Tabell 2.11 i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger*.

For å beregne den totale driftsenergien for boligmassen er det nødvendig å kartlegge antall boliger i Norge. Tall fra SSBs Folke- og bolig telling fra 2011 ligger til grunn for boligantallet brukt i oppgaven. Folke- og bolig tellingen fra 2011 er den nyeste bolig tellingen og dermed den informasjonskilden som gir mest oppdaterte verdier. Fra SSB finnes det informasjon om antall boliger per 2013, men denne informasjon kategoriserer ikke boliger etter byggeår. Ved hjelp av den dynamiske modellen for boligmassen, presentert i kapittel 2.11.2 *Dynamisk modell*, kunne boligmassen blitt justert for dagens verdier. Det er valgt å ikke gjennomføre en slik justering på bakgrunn av manglende informasjon om antall eksisterende boliger som rives årlig, kategorisert etter byggeår.

Boligmassens driftsenergi

Beregninger i denne oppgaven estimerer det totale årlige forbruket av driftsenergi i den eksisterende boligmassen til 46,8 TWh. Dette er vist i Tabell 4.3 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen*. Omkring to tredjedeler av forbruket kommer fra eneboliger. Det totale energiforbruket er i stor grad avhengig av antall boliger i hver kategori. Etter Tabell 2.8 i kapittel 2.2.3 *Antall boliger* står eneboliger for over halvparten av alle boligene i Norge.

Spesifikk levert energi (kWh/m^2) har lenge vært ansett som den foretrukne metoden for å sammenligne forbruk av driftsenergi i boliger. I kapittel 2.5.1 *Indikator for bruk av driftsenergi* kommer det frem at en slik metode ikke skiller mellom arealeffektivitet og bruk. Småhus og boligblokker har ofte flere beboere per arealenhet enn eneboliger, selv om det i snitt bor flere personer per boenhet i enebolig enn i småhus og boligblokker. Det skyldes at gjennomsnittlig bruksareal i eneboliger er vesentlig større enn i småhus og boligblokker. Tabell 4.1 i kapittel 4.1.1 *Boligmassens oppbygning* viser det.

For to identiske boenheter med ulikt antall beboere vil det totale energiforbruket være høyest for boenheten med flest beboere. Den boenheten vil derimot ha et lavere energibruk per beboer. Eneboliger vil derfor kunne oppnå lavere spesifikt

energibruk enn småhus og boligblokker, selv om energibruken per beboer og boenhet er høyere.

Levert energi per bolig og levert energi per beboer kan brukes som alternative indikatorer til spesifikk levert energi. Tabell 4.3 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen* illustrerer det. Tabellen viser energiforbruket målt i kWh/m², kWh/boenhet og kWh/beboer for eneboliger, småhus og boligblokker bygget etter 1999. Det spesifikke energiforbruket er tilnærmet likt (125 – 127 kWh/m²) for enebolig, småhus og boligblokk. Om en fremstilling basert på levert energi per bolig benyttes, forbruker en enebolig omtrent dobbelt så mye energi som en bolig i et småhus og boligblokk. En fremstilling basert på levert energi per beboer viser at en enebolig forbruker omtrent en tredjedel mer energi enn en bolig i et småhus eller en boligblokk.

De ulike fremstillingsmetodene egner seg til å identifisere ulike sider av boligmassen. En fremstilling basert på energi per beboer kan eksempelvis brukes til å fremme arealeffektive boliger. I kapittel 4.2.3 *Energi- og klimagassreduksjonspotensialet* er både spesifikk levert energi, levert energi per bolig og levert energi per beboer brukt i en diskusjon rundt det energibesparende potensialet i boligmassen.

Beregningene av boligmassens driftsenergi viser en liten tendens til å underestimere energiforbruket. I kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* anbefales det av MacGregor et al. (1993) og Swan og Ugursal (2009) at beregninger basert på arketype-metoden sammenliknes med resultater fra andre metoder. Figur 4.2, Figur 4.3 og Figur 4.4 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen* viser beregningene i denne oppgaven sammenliknet med andre informasjonskilder. Av de fire resultatene estimerer "Egen modell" jevnt over et noe lavere energiforbruk enn de andre modellene. Det er særlig for småhus at modellen underestimerer. Modellen til SSB er den som estimerer det høyeste energiforbruket. Denne modellen baseres på, det som i Figur 2.3 kalles, statistisk metode. I kapittel 4.2.5 *Feilkilder* er underestimeringen diskutert.

Den leverte energien til boligmassen er lavere for nyere boliger. Unntaket er for eneboliger og boligblokker bygget etter år 1999. I disse boligene stiger energiforbruket i forhold til boliger bygget mellom år 1980 – 1999. Det kommer av at boliger bygget etter år 1999 er simulert med ventilasjonsanlegg. Ventilasjonsanlegget har, i følge Mjønes et al. (2012), en varmegjenvinner med effektivitetsgrad på 50 %. Levert energi til boligen øker fordi ventilasjonsanlegget tilfører større luftmengder, samt at energiforbruket til vifter går opp. Tabell 4.3 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen* viser dette. Figur 4.5 viser det differensiert energiforbruk for boligmassen etter byggeår. Figuren viser også at

internlaster, som belysning, teknisk utstyr og varmtvann, bidrar med en relativt større andel av energiforbruket i nye boliger, sammenliknet med eldre boliger.

4.2.2 Optimalt oppgraderingsnivå

Er det mulig å definere et optimalt oppgraderingsnivå for eksisterende boliger ved å vurdere boligens reduserte driftsenergi opp mot tilført bundet energi ved oppgradering?

Den eksisterende boligmassens forbruk av driftsenergi er diskutert i det foregående kapittelet. I dette kapittelet er det diskutert om det er mulig å definere et optimalt oppgraderingsnivå. For å finne et optimalt oppgraderingsnivå er det, i kapittel 3.1.3 *Optimalisering*, vist en optimaliseringsprosess som vurderer redusert driftsenergi mot tilført bundet energi ved oppgradering.

Optimalt oppgraderingsnivå

I kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* vises det at, det med et relativt godt presisjonsnivå, er mulig å definere en optimal U-verdi for ulike bygningsdeler. I Figur 4.8 - 4.11 er optimale U-verdier vist. Det er allikevel verdt å merke seg at optimal oppgraderingsmengde varierer blant de ulike oppgraderingspakkene. De ulike pakkene er vist i kapittel 3.1.3 *Optimalisering*. Optimal U-verdi er høyere for oppgraderingspakker hvor effektgraden på oppvarmingsanlegget er høy. I følge Novakovic et al. (2007) er det naturlig, da boligens varmemotstand er et konkurrerende tiltak til boligens oppvarmings-system. En sammenlikning av U-verdiene for tak, gulv og vegger viser at det er mest fordelaktig med høy varmemotstand i taket. Denne tendensen er lik for alle de fire oppgraderingspakkene.

På den andre siden er det en tendens til at vegger optimalt bør etterisolerers med større isolasjonstykkelse enn tak og gulv. Figur 4.8 - 4.11 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* viser den tendensen. En årsak til dette kan være at gamle boliger originalt sett har en relativt høy isolasjonstykkelse i taket i forhold til veggene. Figurene viser også at optimal tykkelse for etterisolering er stigende med boligens alder. Den naturlige årsaken til dette er at nye boliger originalt er bedre isolert enn eldre boliger. Det er på den andre siden verdt å merke seg at relativt nye boliger har en miljøoptimal tykkelse for etterisolering på rundt 20 cm.

Et optimalt nivå for spesifikk levert energi er, i motsetning til U-verdi, vanskelig å definere. Figur 4.15 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* viser dette. For eldre boliger virker det som at både eneboliger, småhus og boligblokker oppnår et tilnærmet likt nivå for optimal løsning. Etter hvert som boligene blir nyere er det større sprik mellom de optimale løsningene. For boliger bygget etter år 1999 er det vanskelig å definere et optimalt nivå for spesifikk levert energi.

Et interessant resultat fra Figur 4.15 er det store spranget i økt driftsenergi fra boliger bygget mellom 1980 - 1999 og boliger bygget etter 1999, i kategorien ”ikke vent”. Boligene i kategorien etter 1999 er bygget med originalt ventilasjonsanlegg med 50 % varmegjenvinning. I de boligene er det ikke utført oppgraderinger på ventilasjonsanlegget. Boligblokker med gammelt ventilasjonsanlegg forbruker over 10 % mer energi enn boligblokker med oppgradert ventilasjonsanlegg. På den andre siden øker forbruket med over 20 % ved installering av ventilasjonsanlegg i en bolig som originalt ventileres naturlig. Energiforbruket relatert til ventilasjon er videre diskutert i kapittel 4.2.3 *Energi- og klimagassreduksjonspotensialet*.

Energibesparende tiltak

Den negative energibesparelsen ved installasjon av ventilasjonsanlegg vises i Figur 4.6 og Figur 4.7 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen*. Figuren viser at økt virkningsgrad på varmeanlegget bidrar til størst energibesparelse. Økt virkningsgrad bidrar, i tillegg til en vesentlig reduksjon i driftsenergi, med lite tilført bundet energi. Nattsenking av innnetemperaturen er også et effektivt tiltak. Både fordi tiltaket reduserer driftsenergien, men også fordi det innebærer tilnærmet ingen økning i bundet energi og enkel implementering i boligen. Blant tiltakene som går på ”passiv energidesign” er det etterisolering av yttervegger som i de fleste tilfeller bidrar med størst netto energireduksjon.

Beregningene i denne oppgaven viser at økt virkningsgrad på varmesystemet i de fleste tilfeller har større effekt enn å redusere varmetapet. Nattsenking av innnetemperaturen er også et tiltak som i mange tilfeller har like stor netto energibesparende effekt som ”passiv energidesign”. I kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak* er Kyotopyramiden og prinsippet om ”passiv energidesign” presentert. Figur 4.6 og Figur 4.7 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* viser at ”passiv energidesign” ikke nødvendigvis er det mest fordelaktige ved energioppgradering av eksisterende boliger. Med Kyotopyramiden argumenteres det for at reduksjon av varmetapet bør ha førsteprioritet ved energioppgraderinger. Nattsenking og oppvarmingssystem har i Kyotopyramiden henholdsvis nest siste og siste prioritet. På den andre siden anbefaler Enova (2014b), i kapittel 2.6 *Energibesparende tiltak*, å installere varmestyringssystem som første prioritet ved energioppgradering av rekkehus. Dette er i tråd med funnene i denne oppgaven.

I kapittel 3.1.3 *Optimalisering* kommer det frem at optimaliseringen av energitiltakene baseres på 15 års levetid. I tråd med FN’s klimapanel er valgt levetid for tiltakene relativt kort. FN’s klimapanel argumenterer i kapittel 2.7.4 *Fremtidens bygningsmaterialer* for at mye energi bygges inn i bygg på grunn av byggets relativt lange levetid. Det som er ny teknologi i dag, vil om noen år være ansett som gammel. Allikevel vil energien tilknyttet den gamle teknologien være bygget

inn i bygningen i lang tid. Ved å beregne kortere levetid på oppgraderings-tiltakene åpnes det for at ny teknologi kan implementeres når teknologien er på plass. På den andre siden er det viktig å påse at energioppgraderinger ikke blir satt på vent i påvente av at ny teknologi blir utviklet. Det vil øke det akkumulerte energiforbruket. Kapittel 4.2.3 *Energi- og klimagassreduksjonspotensialet* tar denne diskusjonen videre.

Figur 4.17 i kapittel 4.1.4 *Energibesparende potensial i boligmassen* viser hvordan levetiden til oppgraderingstiltakene påvirker energibesparelsen til boliger. Figuren viser at energibesparelsen er mest sensitiv for levetider kortere enn 15 år. For levetider over 15 år er stigningstall lavere og energibesparelsen er mindre sensitiv for endringer i levetid. Dette underbygger valget av levetid på 15 år.

Utviklingen av ny energiteknologi påvirker også valg av optimaliseringsmetode og optimal løsning. I kapittel 3.1.3 *Optimalisering* er det vist at optimaliseringsprosessen kunne vært utført med hensyn på bundet karbon og klimagassutslipp. Optimalisering basert på klimagasser medfører en tilleggsvariabel i form av utslippskoeffisienter. Med stor sannsynlighet vil fremtidig produsert energi inneholde mindre klimagasser per energimengde. En optimalisering basert på klimagasser medfører at CO₂-besparelsen ved optimal løsning varierer med fremtidige utslippskoeffisienter. En slik optimalisering har ikke vært målet for denne oppgaven. Samtidig er det nødvendig å vise hvordan CO₂-besparelse varierer med ulike utslippskoeffisienter. Dette vises i Figur 4.22 i kapittel 4.1.6 *Klimamål - klimagasser*. Figuren viser at norsk elektrisitet, uten bruk av gasskraftverkene på Mongstad og Kårstø, medfører en negativ CO₂-besparelse. En slutning å trekke fra dette er at klimaoptimal løsning ikke nødvendigvis samsvarer med energioptimal løsning. En annen slutning er at renere energi trolig reduserer optimalt oppgraderingsnivå betraktelig. Forskning og utvikling av renere energikilder kan potensielt redusere klimagassutslipp fra både drift av boliger og materialbruk. Usikkerheten rundt fremtidige energikilder er noe av grunnen til at den relativt korte levetiden på 15 år er benyttet i beregningene. Utvikling av renere energikilder er videre omtalt i kapittel 4.2.4 *Redusert energiforbruk og klimagassutslipp*.

4.2.3 Energi- og klimagassreduksjonspotensialet

Hva er energi- og klimagassreduksjonspotensialet i dagens boligmasse og på hvilke boliger bør oppgraderinger prioriteres?

I foregående kapittel er det vist og argumentert for at boligkategoriene har et optimalt miljøteknisk oppgraderingsnivå. Ved hjelp av optimalt oppgraderingsnivå for hver boligkategori er energi- og klimagassreduksjonspotensialet for hele boligmassen beregnet. Det er gjort for alle fire oppgraderingspakker og vises i kapittel 4.1.4 *Energibesparende potensial i boligmassen*.

Boligmassens potensiale

Den største potensielle reduksjonen i utslipp av klimagasser som kan oppnås basert på den miljøoptimale løsningen er 4,41 mill tonn CO₂-ekv. Det laveste potensialet som er beregnet er 2,96 mill tonn CO₂-ekv. Reduksjonene oppnås med henholdsvis "VP 2,0 - ikke vent" og "VP 1,1 - vent". Totalt beregnede utslipp og reduksjoner for de ulike oppgraderingspakken er presentert i Tabell 4.10.

Det største miljøtekniske energireduksjonspotensialet i boligmassen er 27,1 TWh/år. Det tilsvarer en relativ besparelse på 58 %. Dette oppnås ved å implementere oppgraderingspakken "VP 2,0 - ikke vent". "VP 1,1 - vent" er oppgraderingspakken som gir lavest potensial med 18,2 TWh/år. Det tilsvarer en relativ besparelse på 39 %. I Tabell 4.4 - 4.7 i kapittel 4.1.4 *Energibesparende potensial i boligmassen* presenteres potensialet i de ulike boligkategoriene for alle oppgraderingspakker. Forskjellen i besparelse mellom største og minste potensial er på nesten 19 prosentpoeng. Myndighetene har som mål å redusere energibruken og klimagassutslippene fra boligmassen. Forskjellene i energireduksjonspotensialet som er funnet er betydelig. En slik differanse i besparelse gir incentiver til å ta riktige valg. De riktige valgene kan være å prioritere tiltak med størst besparelse sett i forhold til ressursene som tiltaket krever.

Figur 4.16 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* viser to tydelige tendenser til hva som påvirker den leverte energien til boligmassen. Det ene er effektiviteten på oppvarmingssystemet og det andre er om oppgraderingen inkluderer installering av ventilasjonsanlegg. Hvordan ventilasjonsanlegget påvirker levert energi til boligen vises også i Figur 4.15. Figuren viser at optimal oppgraderingsnivå for pakker som inkluderer oppgradert ventilasjon har betydelig høyere levert energi enn de uten. Unntaket er for boliger bygget etter 1999. De oppnår en energibesparende effekt av å oppgradere varmegjenvinneren fra 50 -80 %.

Thomsen og Berge (2012) stiller spørsmål om kvaliteten på inneluften er god nok i moderne bygg med tett bygningskropp og balansert ventilasjon. De mener det er

viktig å fokusere på at ventilasjonsanlegget leverer nok luft til at kvaliteten på inneluften blir tilfredsstillende. Sammenliknes dette med resultatene i oppgaven er det tydelig at det gir utfordringer. Ventilasjonsanlegg øker i de fleste tilfeller energiforbruket. Sett fra et miljøperspektiv gir det incentiver for å redusere antall luftskifter i en bolig. Ses det derimot på hensynet til innemiljø vil et høyt luftskifte gi frisk luft uten sjenerende mengder forurensing. Ulempen er et høyere energiforbruk. Utfordringen ligger i å minimere energibruken relatert til ventilasjon uten at det går på bekostning av innemiljøet.

Behovsstyring av ventilasjonsanlegg reduserer energibruken til vifter og oppvarming av luft. I følge SINTEF (2013) kan behovsstyring redusere energibruken til et ventilasjonssystem med 60 %, uten at det går på bekostning av innemiljøet. En bolig består av mange ulike rom med ulik bruk og oppholdstid. Et behovsstyringssystem som gir god luftkvalitet når personer er til stede og ellers holder luftmengden på et minimum, vil med stor sannsynlighet gi betydelig energibesparing. På den måten kan det være mulig å redusere energiforbruket til ventilasjon uten at det går på bekostning av innemiljøet.

Prioritering av boligkategorier

Boligkategorien med størst potensiale for netto energireduksjon er ”originale eneboliger før 1956”. Det spesifikke potensialet er der 187 - 211 kWh/m². ”Originale eneboliger før 1956” har også størst potensiale hvis indikatorene kWh/beboer eller kWh/bolig benyttes. Boligkategorien hvor det totale potensiale for energibesparing er størst er derimot ”oppgraderte eneboliger før 1956”. Hvis alle boliger i denne kategorien oppgraderes vil det gi en netto energireduksjon på 4,6 - 5,9 TWh/år, avhengig av hvilke oppgraderingspakker som benyttes. Hvilke boliger som skal prioriteres må derfor vurderes ut i fra hva som ønskes oppnådd. Hvis en gitt mengde boliger skal oppgraderes er det smart å velge ”originale eneboliger før 1956”. Er ønsket å fokusere på en kategori og oppnå størst reduksjon er det ”oppgraderte eneboliger etter 1956” som bør prioriteres.

Reduksjon av det akkumulerte energiforbruket er tidligere diskutert og identifisert som et viktig fokusområde. Ved å redusere det akkumulerte forbruket vil det totale forbruket over tid minke. Tiltak må derfor gjøres på et så tidlig stadium som mulig. Informasjon om potensialet til de ulike bygningskategoriene kan være et nyttig hjelpemiddel i en slik sammenheng. Denne informasjonen kan brukes til å gjøre de mest effektive tiltakene tidlig, noe som igjen kan føre til at den totale gevinsten øker.

4.2.4 Redusert energiforbruk og klimagassutslipp

Vil 2-gradersmålet og myndighetenes målsetninger om redusert energiforbruk og klimagassutslipp i boligmassen nås med optimal oppgraderingsmengde og innen hvilke rammer?

I de foregående kapitlene er muligheten for å definere et optimalt oppgraderingsnivå i den eksisterende boligmassen diskutert. I tillegg er reduksjonspotensialet i dagens boligmasse vurdert. I dette kapitlet diskuteres energiforbruk og klimagassutslipp for en fremskrevet boligmasse.

EUs 2020-mål

Resultatene fra oppgaven viser at EUs målsetning, om en 17 % reduksjon i energiforbruket fra boligmassen, kan nås innen år 2020. Figur 4.18 og Figur 4.19 i kapittel 4.1.5 *Klimamål - energiforbruk* viser at det er nødvendig med oppgraderingsrater på mellom 3,0 og 4,2 % for å nå EUs målsetninger. Dette medfører at boligmassen i år 2020 vil bestå av 34 % miljøoptimalt oppgraderte boliger og 7 % nye boliger. Nye boliger er antatt en moderat passivhus-standard, med et spesifikt energiforbruk på 85 kWh/m². I kapittel 2.11.1 *Lineær trendanalyse* kommer det frem at dagens oppgraderingsrate av boligbygg er på 1,5 %. Funnene i denne oppgaven tyder på at det er behov for å øke oppgraderingsraten betraktelig for å nå målene om energireduksjon. En hurtig omstilling til oppgraderingsrater rundt 3 - 4 % er nødvendig, både for å nå reduksjonsmålene, men også for å redusere akkumulert forbruk av energi.

For å øke oppgraderingsratene må det gjøres investeringer i boligmassen. FN's klimapanel estimerer at en tilnærming til 2-gradersmålet reduserer BNP-veksten med omkring 0,06 prosentpoeng. En relativt stor andel av denne kostnaden må påberegnes i boligmassen. Samtidig anslår Arnstad et al. (2010) at økte investeringer relatert til bygningsoppgraderinger vil bidra med omkring 80 000 nye årsverk. For å redusere det akkumulerte forbruket av energi fra boligmassen er det nødvendig at investeringene kommer raskt. FN's klimapanel understreker at det private næringslivet selv ikke vil gjennomføre investeringene som må gjøres og at det kan være nødvendig med støtteordninger for energiinvesteringer. Fra myndighetenes side er det nødvendig, i tillegg til strengere forskriftskrav, å stille med relevante støtteordninger.

Arnstads 2040-mål

Beregningene i denne oppgaven viser at det trolig ikke er realistisk å nå Arnstad-rapportens mål om en halvering av energiforbruket i boligmassen innen år 2040. Kapittel 4.1.5 *Klimamål - energiforbruk* viser energiforbruket for ulike utviklings-scenarioer av boligmassen frem mot år 2040. Ved kun et fåtall av scenarioene nås målet om halvering av energiforbruket. Med utgangspunkt i scenario "middels"

forbruker boligmassen omtrent 55 % av dagens energiforbruk i år 2040. For å nå energireduksjonen må samtlige av dagens boliger oppgraderes innen år 2040. Det innebærer en oppgraderingsrate på underkant av 3 %. Det er en dobling av dagens rate.

Det finnes ulike aktuelle tiltak for å nå Arnstad-rapportens mål om halvering av energiforbruket innen år 2040. Tiltakene går i stor grad på brukeratferd og kvaliteten til nye boliger. Figur 4.20 i kapittel 4.1.5 *Klimamål - energiforbruk* viser en følsomhetsanalyse av hvilket minimumsnivå nye boliger må ha for å nå en halvering av energiforbruket. For scenario "middels" innebærer det en spesifikk levert energi lavere enn 49 kWh/m². Dette er et nivå som ligger godt under passivhus-nivå.

Det mest effektive og umiddelbare tiltaket er endring av brukeratferd. Endring av brukeratferd innebærer både en endring i antall personer per bolig og boligens størrelse, samt en holdningsendring blant brukere. Tabell 4.9 i kapittel 4.2.4 *Redusert energiforbruk og klimagassutslipp* viser at Arnstad-rapportens mål er oppnåelig etter et lavt utviklingsscenario av boligmassen. Et lavt utviklingsscenario innebærer flere beboere per boligareal. Bedre termiske egenskaper i boligene gjør også at forbruk av varmtvann, belysning og teknisk utstyr får en relativt større betydning for det totale energiforbruket. Behovsstyring, bedre elektriske apparater og redusert forbruk av varmtvann vil i perioden frem mot år 2040 få betydning for om målsetningen om en halvering av energiforbruket nås. Figur 4.5 i kapittel 4.1.2 *Forbruk av driftsenergi i boligmassen* viser hvordan internlaster i boliger får en relativt større betydning for det totale energiforbruket når oppvarmingsbehovet synker. En endring mot flere personer per bolig og en minskning av boligens størrelse kan oppnås ved en premiering av beboere i små boliger. Dette kan for eksempel stimuleres ved hjelp av skattesystemet, som forklart i kapittel 2.1.3 *Økonomi*.

FNs klimapanel 2040-mål

Beregningene i denne oppgaven viser at det er mulig å nå FNs klimapanel målsetning om en halvering av klimagassutslipp fra boligmassen innen år 2040. Tabell 4.10 i kapittel 4.1.6 *Klimamål - klimagasser* viser beregnede klimagassutslipp i år 2040. For å nå halveringsmålet til FNs klimapanel er det nødvendig at hele dagens boligmasse oppgraderes til miljøoptimalt nivå innen år 2040. I tillegg er det nødvendig at det utvikles energikilder med lavere utslippskoeffisienter. I kapittel 2.10 *Klimagassutslipp* kommer det frem at det ved omregning av energi til klimagasser anbefales å benytte nordisk energimiks. Denne energimiksen gir omtrent 60 ganger så mye utslipp av CO₂-ekv. som vannkraft. Et økende fokus på klimaendringer, særlig i vestlige land, vil med stor sannsynlighet bidra til at det i fremtiden blir produsert energi med lavere

klimagassutslipp. Beregningene i denne oppgaven viser at det er nødvendig med en utslippsreduksjon på omtrent 13 % i fremtidige energimikser, relatert til dagens nordiske mikser, for å nå halveringsmålet. Figur 4.21 i kapittel 4.1.6 *Klimamål - klimagasser* viser hvordan endringer i utslippskoeffisientene til energi påvirker klimagassutslippene.

Innen hvilke rammer

I totalt fire kapitler er forskningsspørsmålene diskutert. Gjennom denne diskusjonen er det kommet frem at det er nødvendig med drastiske endringer av boligmassen for å nå myndighetenes energi- og klimamålsetninger. Enkelte av de foreslåtte endringene går på bekostning av det som i kapittel 2.1 *Bygningspolitikk* defineres som bærekraft. Bærekraft, i denne sammenhengen, handler om å vurdere oppgraderingstiltakene med hensyn på økonomi, miljø og sosiale forhold. Hittil i oppgaven er det fokusert på miljøkonsekvensene relatert til forvaltning av boligmassen. Med et ensidig fokus på miljø er det fort at de to andre sidene av bærekraftsprinsippet neglisjeres. Det er ikke gunstig og et moderne velferds-samfunn ser gjerne at det er en balanse mellom alle de tre dimensjonene av prinsippet. Det er på den andre siden viktig å adressere spørsmålet om hva som skal prioriteres. Klimaendringene er i dag en alvorlig trussel for hele verdenssamfunnet. Denne trusselen kan ikke neglisjeres.

For de sosiale forholdene er det særlig krav om tilgjengelighet og universell utforming som er i konflikt med miljøhensynet. Økt tilgjengelighet og universell utforming medfører i mange tilfeller økt materialbruk og større boligareal. Som nevnt i kapittel 4.2.2 *Optimalt oppgraderingsnivå* er det svært effektivt for energiforbruket å øke antall beboere per areal. Det gjelder både for nye og oppgraderte boliger. Ved oppgradering av boliger er det også nødvendig å ta hensyn til den økte materialbruken som er nødvendig for å gjøre boligen tilgjengelig eller universelt utformet. Per i dag finnes ingen god løsning for hvordan boligarealet kan reduseres, samtidig som tilgjengelighet og universell utforming tilfredsstilles.

Kapittel 4.2.3 *Energi- og klimagassreduksjonspotensialet* adresserer konflikten mellom hensynet til innemiljø kontra energiforbruk i sammenheng med ventilasjon. I det kapitlet er det argumentert for at konflikten i stor grad kan løses med behovsstyring. Behovsstyring av ventilasjon er en relativt ny teknologi i boliger. I mange tilfeller kan konflikter mellom miljø, økonomi og sosiale forhold løses med ny teknologi. Et annet eksempel er automatisk nattsinking av innnetemperaturen. Både behovsstyring og nattsinking reduserer energiforbruket i en bolig drastisk. Det finnes allikevel enkelte områder hvor teknologien ikke har kommet langt nok til å kompensere for ulempene relatert til miljøoppgraderinger. Ett av disse områdene er vernede og fredede bygninger. For etterisolering av

vernede og fredede bygninger er det fortsatt ingen god løsning. Det jobbes aktivt med å forbedre isolasjonsmaterialene og både vakuumisolasjon og nanopore-isolasjon er under utvikling. Med dagens teknologi er innvendig etterisolering, av flere grunner, lite attraktivt. Nye isolasjonsmaterialer vil med stor sannsynlighet bli mer effektive og materialene vil oppta mindre volum. Dette kan åpne for gode og energieffektive løsninger også for vernede og fredede boliger.

I kapittel 2.1 *Bygningspolitikk* kommer det frem at bygninger og byggesaker forvaltes gjennom plan- og bygningsloven. Det er mindre gunstig at plan- og bygningsloven tillater boligeiere selv å bestemme hvilket energinivå en boligen skal oppgraderes til. I følge FNs klimapanel er lovgivning og regulering det mest effektive virkemiddelet for å redusere energiforbruket i boligmassen. Gjennom TEK10 stilles det krav til enkeltkomponenters kvalitet ved oppgradering. Mens TEK10 medfører at oppgraderte enkeltkomponenter holder god kvalitet, er det på den andre siden gjennom PBL at oppgraderingstiltakenes helhet ivaretas. Lovens presisering av hovedombygging skal ivareta denne helheten. Det viser seg allikevel at unntaksbestemmelsene i plan- og bygningsloven åpner for at boligeiere i utstrakt grad selv får bestemme helheten i oppgraderingen. Dette kan medføre at boligens fulle energireduksjonspotensiale ikke utnyttes.

Dagens forskriftskrav er for lave til at boligens fulle energireduksjonspotensial nås. I denne oppgaven er eksisterende boligens energireduksjonspotensial beregnet ut i fra et miljøperspektiv. Differansen mellom dagens forskriftskrav og optimal løsning i denne oppgaven er relativt stor. For å utnytte reduksjonspotensialet er det nødvendig å øke kravsnivået i TEK10. Det er på den andre siden verdt å vurdere de sosiale og økonomiske konsekvensene av en slik økning i kravsnivået. Det er mulig at energireduksjonspotensialet beregnet i denne oppgaven ikke er privatøkonomisk lønnsomt for boligeiere. Økonomisk stimuli kan derfor være et hjelpemiddel for å nå det fulle potensialet i boligmassen. Økonomisk stimuli kan forankres i den økte sysselsetningen en implementering av energireduksjonspotensialet gir tilbake til samfunnet.

4.2.5 Feilkilder

I dette kapitlet er det gitt en presentasjon av feilkilder. Kapitlet er bygget opp rundt forskningsspørsmålene og i starten av hvert kapittel gis det en presentasjon av hvilket forskningsspørsmål feilkildene er knyttet til.

Oppbygning og forbruk av driftsenergi

Feilkildene i dette kapitlet er tilknyttet beregninger relatert til forskningsspørsmål én. Forskningsspørsmål én handler om den eksisterende boligmassens oppbygning og forbruk av driftsenergi.

Som kapittel 2.4 *Metoder for modellering av driftsenergi* viser mener Swan og Ugursal (2009) at modellering av boligmassens driftsenergi ved hjelp av arketype-metoden er komplisert og krever store datamengder. Kapittel 2.2 *Boligmassen* og kapittel 3.1 *Metodebruk* viser omfanget av data i denne oppgaven. Data presentert i kapittel 2.2 *Boligmassen* er basert på eksisterende litteratur. Informasjonen er bygget opp for å generalisere boligmassens fysiske og tekniske utforming. Det er vanskelig å etterprøve denne informasjon, da den ikke representerer noe fysisk i boligmassen. Dette er med på å svekke informasjonens reliabilitet. På den andre siden er det hentet informasjon fra flere informasjonskilder. Dette er vist i Kapittel 2.2 *Boligmassen*. En form for triangulering mellom informasjonskildene er brukt for å øke validiteten til informasjonen.

For denne oppgaven er det aktuelt å vurdere kvaliteten av informasjonen som er brukt til å definere innetemperatur, oppvarmingssystem og lekkasjetall. Disse tre parameterne har alle en stor innvirkning på driftsenergien til boligmassen. For boliger har det i flere tiår vært forskriftskrav relatert til termiske egenskaper. Det finnes derfor gode kilder på hvordan denne utviklingen har vært. For innetemperatur og oppvarmingssystem har valg av kvalitet i stor grad vært opp til brukerne selv. Informasjon om de parameterne er derfor i større grad beheftet med usikkerhet. Det reduserer informasjonens reliabilitet. Store sprik i litteraturen for lekkasjetall gir redusert validitet.

En grunn til at "Egen modell" underestimerer i forhold til de andre presenterte modellene kan være andelen oppgraderte boliger som brukes. Tabell 2.10 og Tabell 2.11 i kapittel 2.2.6 *Oppgraderte boliger* viser at Mjønes et al. (2012) jevnt over estimerer en høyere andel oppgraderte boliger i boligmassen. Som det tidligere er vist benytter Mjønes et al. (2012) seg av den mest oppdaterte informasjonen og det kan antas at det øker validiteten. Dette styrker resultatene presentert som "Egen modell".

Generelt kan det sies at resultatene presentert kapittel 4.1 *Resultater* har høy reliabilitet, i den grad det er mulig å reproduserer resultatene på bakgrunn av modellen presentert i kapittel 3.1 *Metodebruk*.

Optimalt oppgraderingsnivå

Feilkildene i dette kapitlet er tilknyttet beregninger relatert til forskningsspørsmål to. Forskningsspørsmål to handler om det er mulig å definere et miljøoptimalt oppgraderingsnivå for den eksisterende boligmassen.

Kapittel 3.1.3 *Optimalisering* viser et overslag over omfanget av simuleringene i oppgaven. I arbeidet med å finne en optimal oppgraderingsmengde for den eksisterende boligmassen er hver simulering plottet manuelt på en simuleringsmaskin. Resultatene er deretter plottet manuelt inn i et Excel-ark. Ved vurdering av resultatene er det derfor nødvendig å være klar over at det kan finnes avlesnings- og inntastningsfeil. Slike feil reduserer validiteten til resultatene. Figur 4.8 - 4.11 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen* viser optimal løsning av hver optimaliseringsprosess. Fremstillingen av resultatene viser resultatenes spredning. Resultatene er i stor grad samlet rundt gjennomsnittsverdien. Det viser god validitet.

Optimaliseringsprosessen er i oppgaven gjennomført som en stegvis prosess. Prosessen er iterativ og den optimale løsningen tilnærmes ved å optimalisere én og én bygningsparameter. Etter hvert som boligen optimaliseres reduseres driftsenergien i boligen. Når optimaliseringsprosessen nærmer seg optimal løsning endres driftsenergien marginalt. På dette stadige har inndataene til simuleringen mindre betydning, da boligen, nesten uavhengig av utforming, nærmer seg en optimal U-verdi. Dette er vist i Figur 4.8 - 4.11 i kapittel 4.1.3 *Optimal oppgradering av boligmassen*. SIMIEN simulerer driftsenergi med én desimaler nøyaktighet mens U-verdier simuleres med to. I nærheten av optimal løsning kan avrunding i SIMIEN derfor medføre unøyaktighet. Det kan medføre at optimaliseringen stoppes for tidlig eller for sent, og med de resultatene at optimalt oppgraderingsnivå blir for lavt eller for høyt. Dette påvirker i større grad optimal tilleggsisolasjonstykkel enn optimal U-verdi. Slike avrundingsfeil har betydning for resultatenes reliabilitet. Fordelen med fremgangsmåten valgt i denne oppgaven er at hver bolig optimaliseres fire ganger. En gang for hver oppgraderingspakke. Denne fremgangsmåten, med for eksempel et snitt av oppgraderingspakkene, øker validiteten til resultatene.

I kapittel 2.9.4 *Materialelegenskaper* presenteres materialelegenskaper i Tabell 2.20. Tabellene viser at det brukes ulike systemgrenser for materialene. Det er en potensiell feilkilde ved beregningene. Systemgrensen vugge til grav dekker hele livsløpet til et bygningsmateriale. I denne oppgaven er det etterstrebet å benytte vugge til grav. Konsekvent bruk av én systemgrense gir resultater med god

validitet. I denne oppgaven er det identifisert at det finnes manglende informasjon om livsløpet til bygningsmaterialer. Informasjonsgrunnlaget er basert på flere ulike kilder. Flere av kildene benytter seg av ulike systemgrenser. Dette har vanskeliggjort arbeidet med å bruke systemgrensen vugge til grav konsekvent. Bruk av snevrere systemgrenser medfører en underestimering av bundet energi og kan medføre at optimal løsning flytter seg mot større isolasjonstykkelser. Det kunne vært aktuelt å gjennomføre en korrigerende slik at alle materialene endte med systemgrensen vugge til grav. En korrigerende ville gjort beregningene mer konsekvente. Problemet med en slik korrigerende er at det finnes lite informasjon om materialets livsløp utover den definerte systemgrensen.

Energi- og klimagassreduksjonspotensialet

Feilkildene i dette kapitlet er tilknyttet beregninger relatert til forskningsspørsmål tre. Forskningsspørsmål tre handler om energi- og klimagassreduksjonspotensialet i den eksisterende boligmassen.

I beregningene som er gjennomført i oppgaven er ventilasjonsanlegg simulert med standard driftstid i SIMIEN. Det innebærer 24 timers driftstid per døgn hele året. Det er ikke funnet grunnlag for å endre på dette, men det stilles spørsmål ved om driftstiden er reell for boliger. Usikkerheten rundt driftstiden til ventilasjonsanlegget kan gi en negativ påvirkning på validiteten til resultatene.

Redusert energiforbruk og klimagassutslipp

Feilkildene i dette kapitlet er tilknyttet beregninger relatert til forskningsspørsmål fire. Forskningsspørsmål fire handler om det er mulig å oppnå definerte målsetninger om redusert energiforbruk og klimagassutslipp.

I denne oppgaven er boligmassen fremskrevet til år 2020 og år 2040 ved hjelp av tall fra Bergsdal et al. (2007). Tallmaterialet er avlest manuelt fra den publiserte artikkelen. Manuell avlesning kan føre til redusert reliabilitet for resultatene.

Kapittel 5

*Do the best you can until you
know better. Then when you
know better, do better.*

- Maya Angelou, amerikansk forfatter

5.1 Konklusjon

Klimaendringer er en av de største utfordringene for verdenssamfunnet i dag. Kun en umiddelbar og kollektiv reduksjon i utslipp av klimagasser kan snu den negative trenden. I denne oppgaven danner EUs og norske myndigheters klimapolitikk grunnlaget for problemstillingen:

Med utgangspunkt i EUs og myndighetenes klimamålsetning, er det mulig og realistisk å redusere energiforbruket fra boliger med 17 % innen 2020 og energiforbruket og klimagassutslippene med 50 % innen 2040?

Er det mulig?

Beregninger viser at det er mulig å nå EUs målsetning om en 17 % reduksjon av energiforbruket fra boligmassen innen år 2020. En økning i oppgraderingsrater, fra omkring 1,5 %, til mellom 3 - 4 % er nødvendig for å nå dette målet.

Arnstad-rapportens målsetning om en halvering av energiforbruket innen år 2040 virker på den andre siden mindre mulig. En fullstendig oppgradering av dagens boligmasse vil redusere energiforbruket med omtrent 45 %. En dobling av dagens oppgraderingsrate er nødvendig for å få til dette.

Beregninger viser at FNs klimapanelers målsetning om en halvering av klimagassutslipp fra boligmassen er mulig innen år 2040. I tillegg til en dobling av opp-

graderingsraten må klimagassutslipp fra produksjon av energi reduseres med omtrent 13 % i forhold dagens nordiske energimiks.

Er det realistisk?

Beregningene i denne oppgaven er basert på en miljøoptimal oppgradering av den eksisterende boligmassen og løsningen når langt på vei et passivhus-nivå. Oppgradering til et passivhus-nivå i eksisterende boliger vil trolig være realistisk, men det vil kreve videre utvikling av ny teknologi for at hensynet til bærekraft i boligmassen skal bevares. Behovsstyring av ventilasjon og automatisk nattsenkning av innetemperatur er eksempler på ny teknologi som reduserer energiforbruket uten å gå på bekostning av innemiljøet. Funn viser også at behovsstyring av ventilasjon og nattsenkning av innetemperatur er blant de mest energibesparende oppgraderingstiltakene. Funnene står i kontrast til den etablerte tankegangen om ”passiv energidesign”.

For at det skal være realistisk å nå reduksjonsmålene må TEK10 revideres. Minimumskravene i dagens forskrift er fortsatt lavere enn passivhus-nivået. En endring av forskriften bør skje raskt for å redusere akkumulerte klimagassutslipp i fremtiden. En rask implementering av nye krav kan eksempelvis skje ved hjelp av økonomisk stimuli fra myndighetene. Et annet tiltak kan være premiering av beboere i små boliger. For å nå Arnstad-rapportens mål er det trolig nødvendig å påvirke brukervaner. En reduksjon av boligareal per person er ett av de mest effektive tiltakene. For å redusere det akkumulerte klimagassutslippet er det nødvendig å fokusere på boligene med høyest utslipp. Det største potensialet finnes i eneboliger bygget før 1956.

5.2 Videre arbeid

I denne oppgaven er boligmassen modellert med mål om å finne et miljøoptimalt oppgraderingsnivå. For å håndtere store datamengder er det gjort enkelte avgrensninger. Avgrensningene er vist i kapittel 1.3 *Avgrensninger*. For videre arbeid er det mulig å implementere flere av disse avgrensningene i studien.

En avgrensning som er nevnt i kapittel 1.3 *Avgrensninger* er at det ikke gjøres vurderinger av hva som er optimal oppgradering ut i fra et økonomi- og sosialperspektiv. Trolig finnes det studier som vurderer de økonomiske perspektivene ved oppgradering. I en bærekraftvurdering er det derfor aktuelt å gjennomføre en studie for å definere et sosialoptimalt oppgraderingsnivå. En slik studie bør blant annet se på tilgjengelighet, universell utforming, innemiljø, belysning, osv. i en oppgraderingssammenheng. Med studier som viser optimalt oppgraderingsnivå innen både miljø, økonomi og sosiale forhold åpnes muligheten for å gjennomføre en optimalisering basert på bærekraft innen eksisterende boliger.

I oppgaven er det ikke tatt hensyn til at enkelte av de eksisterende boligene er vernede eller fredete. En studie som ser på hvilken påvirkning disse boligene har på det totale energireduksjonspotensialet ville vært nyttig. Litteraturstudiet viser at det trolig er vanskelig å kombinere bevaringshensyn og en oppgradering til passivhus-standard. En vurdering av det miljømessige energireduksjonspotensialet er nødvendig i en slik studie.

Gjennomførbarheten til oppgraderingstiltakene er ikke vurdert i denne oppgaven. En studie som tar utgangspunkt i oppgraderingstiltakene i denne oppgaven og vurderer gjennomførbarheten i praksis er anbefalt. En slik studie kan med fordel bygges opp med flere case-studier.

Gjennom denne oppgaven understrekes det at det er nødvendig med umiddelbare tiltak for å redusere de totale utslippene av klimagasser. En interessant studie vil være se på hvordan de akkumulerte utslippene endrer seg med implementering av ulike oppgraderingsløsninger. Med en slik studie er det mulig å kvantifisere de totale utslippene over tid, basert på ulike løsninger. Det vil også gi et bedre grunnlag for å vurdere hvilke tiltak som bør prioriteres.

Referanser

- Adalberth, K. (1997). Energy use during the life cycle of buildings: a method. *Building and Environment*, 32 (4): 317-320.
- Arnstad, E., Askjer, T. O., Landet, R., Helle, T., Strandskog, T., Steinsvik, O. K., Helland, M., Høystad, D. A., Bryn, I., Dokka, T. H., et al. (2010). Energieffektivisering av bygg. En ambisiøs og realistisk plan mot 2040. Oslo: Kommunal- og regionaldepartementet. 60 s.
- Arnøy, S. (2013). Hydroelectricity from Trollheim Power Station: EPD-Norge.
- Bandyopadhyay, S. & Saha, S. (2012). *Unsupervised Classification: Similarity Measures, Classical and Metaheuristic Approaches, and Applications*: Springer.
- Barlett, S. (1993). Rapport 93/21 - The evolution of the Norwegian energy use from 1950 to 1991. Oslo - Kongsvinger: Statistisk Sentralbyrå.
- Bergsdal, H., Brattebø, H., Bohne, R. A. & Müller, D. B. (2007). Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock. *Building Research & Information*, 35 (5): 557-570.
- Bing, J. (2003). *Klage på Datatilsynets vedtak om opphør av behandling av opplysninger samt sletting av registre - Stavanger kommune*. Personvernemnda.
- Bjørnsgard, B. & Eide, E. (2008). Utvikling av registerbasert boligstatistikk, Status og videre arbeid: Statistisk sentralbyrå.
- Borvik, N. P. (2013). *Lavkarbonbetong - Bidrag til klimagassregnskapet på Fornebu S-prosjektet*. Trondheim: NTNU, Institutt for konstruksjonsteknikk. 124 s.
- BuildingGreen. (2011). *Embodied Carbon: Measuring How Building Materials Affect Climate*. Tilgjengelig fra: <http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/2011/3/30/Embodied-Carbon-Measuring-How-Building-Materials-Affect-Climate/> (Hentet: 9. april 2014).
- Byggeforskrift 1969. (1983). *FOR-1983-10-07 - Byggeforskrift 1969*. FOR-1983-10-07 utg.: Kommunal- og arbeidsdepartementet. Tilgjengelig fra:

- <http://oppslagsverket.dsb.no/content/arkiv/plan-bygg/Byggeforskrift-1969/> (Hentet: 21. mars 2014).
- Bøhn, T. I., Ulriksen, T. & Weydahl, E. (2006). Veiledning for boligrådgivere. Oslo: Enova SF.
- Bøhn, T. I., Palm, L. T., Bakken, L., Nossun, Å. & Jordell, H. (2011). Potensial- og barrierestudie - Norske Næringsbygg. Oslo: Enova.
- Capper, G., Matthews, J. & Lockley, S. (2012). Incorporating embodied energy in the BIM process.
- The Chicago manual of style.* (1993). Chicago: University of Chicago Press. IX, 921 s. : ill. s.
- Christophersen, J. (2010). Universell utforming. Oversikt. *Byggforskserien*. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Circular Ecology. (2011). *Embodied energy and Carbon- The ICE Database*: University of Bath. Tilgjengelig fra: <http://www.circularecology.com/ice-database.html> - .UzxINdxsAhM (Hentet: 2. april 2014).
- Circular Ecology. (2014). *Embodied carbon assessment from leading experts*. Tilgjengelig fra: <http://www.circularecology.com/embodied-carbon.html> (Hentet: 9. april 2014).
- Civitas. (2007). Klimagassregnskap for utbyggingsprosjekter. Utvikling av et beregningsverktøy og eksempel på et klimagassregnskap for en del av Fornebu. Et FoU- prosjekt finansiert av Statsbygg: Statsbygg.
- Dahlstrøm, O., Sørnes, K., Eriksen, S. T. & Hertwich, E. G. (2012). Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional-or passive house standard. *Energy and buildings*, 54: 470-479.
- Dalland, O. (1993). *Metode og oppgaveskriving*. 1. utgave utg. Oslo: Gyldendal akademisk.
- Day, R. A. (1998). *How to write & publish a scientific paper*. Westport, Conn.: Oryx Press. XVI, 275 s. : ill. s.
- De Smet, B. & Stalmans, M. (1996). LCI data and data quality. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1 (2): 96-104.
- DIBK. (2013). *Veiledning til Byggeteknisk forskrift (TEK10)*.

- Ding, G. K. (2004). *The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities*: University of technology, Sydney.
- Dixit, M. K., Fernandez-Solis, J. L., Lavy, S. & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42 (8): 1238-1247.
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. & Culp, C. H. (2012). Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16 (6): 3730-3743.
- Dixit, M. K., Culp, C. H. & Fernández-Solís, J. L. (2013). System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21: 153-164.
- Dokka, T. H. & Hermstad, K. (2006). *Energieffektive boliger for fremtiden - En håndbok for planlegging av passivhus og lavenergiboliger*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Dokka, T. H., Brunsell, J. & Grini, C. (2008). *Energireduserende tiltak i Husarveien 26 Energisystemer*. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T. (2010). *Håndbok 53 Trehus*. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Enova. (2012). *Potensial- og barrierestudie - Energieffektivisering i norske bygg*. *Enova rapport 2012:01*. Enova.
- Enova. (2014a). *De 5 mest effektive tiltakene for deg som bor i en gammel enebolig*: Enova. Tilgjengelig fra: <http://www.enova.no/radgivning/privat/energismarte-rad-for-din-bolig/gammel-boligfor-1987/148/0/> (Hentet: 10. april 2014).
- Enova. (2014b). *De 5 mest effektive tiltakene for deg som bor i rekkehus*: Enova. Tilgjengelig fra: <http://www.enova.no/radgivning/privat/energismarte-rad-for-din-bolig/rekkehus/155/0/> (Hentet: 10. april 2014).
- Enova. (u.å.-a). *Ordforklaring: Definisjoner og forklaring av terminologi*. Tilgjengelig fra: <http://www.enova.no/getpage.aspx?menu=627> (Hentet: 9. april 2014).

- Enova. (u.å.-b). *Passivhus: Hjelp til deg som skal kjøpe eller bygge*. Enova SF. Tilgjengelig fra: <http://www.enova.no/radgivning/privat/rad-om-produkter-og-losninger/tiltak-i-bygningskroppen/passivhus-hjelp-til-deg-som-skal-kjope-eller-bygge-/103/0/> (Hentet: 17. mai 2014).
- EPD-Norge. (2004). Retningslinjer for Næringslivets Stiftelsesle for Miljødeklarasjoner (EPD Foundation Norway. Tilgjengelig fra: epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/PDF/NEPDvedtekt_Nov04.pdf (lest 04. mai 2014).
- EPD-Norge. (2011). *Vekting av CO2 ved bruk av elektrisitet uttrykt i en EPD*: EPD Norge. Tilgjengelig fra: <http://www.epd-norge.no/article.php?articleID=1592&categoryID=657> (Hentet: 05. mai 2014).
- EPD-Norge. (2014). Det Norske EPD-programmet - Norsk tilpasning av ISO 14025 Miljødeklarasjoner type III. I: version 2:2014 (red.): EPD-Norge.
- EPD-Norge. (u.å.-a). Emission factors for electricity (physical mix): EPD-Norge.
- EPD-Norge. (u.å.-b). *Hva er en EPD?*: EPD-NORGE. Tilgjengelig fra: <http://www.epd-norge.no/category.php?categoryID=531> (Hentet: 24. april 2014).
- EPLCA. (2014). *Tool SimaPro 7*. Tilgjengelig fra: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ResourceDirectory/tool.vm?tid=216> (Hentet: 24. april 2014).
- European Council. (1996). *1939th Council meeting - Environment - Brussels*: European Council,. Tilgjengelig fra: http://europa.eu/rapid/press-release_PRES-96-188_en.htm (Hentet: 02. mai 2014).
- Evjenth, A., Sandvik, P., Almås, A.-J. & Bjørberg, S. (2011). Grunnlag for, og krav om, utbedring av eksisterende byggverk: Kluge Advokatkontor. 46 s.
- Fossdal, S. (2000). Livsløpsvurdering av bygninger og bygningsmaterialer. I: Byggforsk, S. (red.). *Byggforskserien*: SINTEF Byggforsk.
- Fredriksen, S. (2013). *Bærekraftig oppgradering av eksisterende boliger*. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*, b. 50. Oslo: Instituttet. 465 s. : ill. ; 31 cm s.

- GLAVA. (2014). *Historie om GLAVA*. Tilgjengelig fra:
<http://www.glava.no/om-glava/kort-om-glava/historikk/historien-om-glava/> (Hentet: 15. mars 2014).
- GLAVA AS. (2013). Glava Dampsperre. *FDV- Dokumentasjon*.
- Graham, P. (2009). G8 summit to set 2 degrees Celsius global warming goal. *Reuters*.
- Granum, H. & Lundby, S. E. (1952). *Trehus i dag = Modern frame houses*, b. 1. Oslo: I kommisjon hos Tanum. 152 s. : ill. s.
- Granum, H. & Larsen, K. E. (1989). *Ferdighus og typehus i Norge 1940-1970: materiale fra et seminar ved NTH/SINTEF, 9-10 mars 1989*. Trondheim: Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole, Institutt for arkitekturhistorie, Arkitektavdelingen. 137 s. : ill. s.
- Grini, C. (2010a). Norsk innvendig panel (ubehandlet). *Environmental Product Declaration ISO 14025: 085N*: EPD Norge.
- Grini, C. (2010b). Norsk utvendig kledning behandlet med vanntynnbar maling. *Environmental Product Declaration ISO14025: 137N*: EPD Norge.
- Hamdy, M., Hasan, A. & Siren, K. (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy and Buildings*, 56: 189-203.
- Hammond, G. & Jones, C. (2008). Inventory of carbon & energy (ICE): University of Bath.
- Hammond, G. P. & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 161 (2): 87-98.
- Hamnaberg, H. & Selfors, A. (2010). Klimagassutslipp fra fjernvarme: Tiltak og virkemidler - et innspill til Klimakur 2020: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Hille, J., Simonsen, M. & Aall, C. (2011). Trender og drivere for energibruk i norske husholdninger. Rapport til NVE: Vestlandsforskning.
- Holme, V. & Gjerlow, J. (2011). Gyproc Plasterboard 12,5 mm, GN13. *Environmental Product Declaration ISO 14025: 223E*: EPD Norge.

- Holthe, K., Folvik, K., Eng Kalbakk, T., Kristjansdottir, T. F., Rønning, A., Lyng, K.-A. & Vold, M. (2011). *Konsensus: metode for miljøvurdering av bygninger - dagens praksis og anbefalinger : rapport delprosjekt 1 - konsensus arena*, b. 2011 A0113. Trondheim: SINTEF Byggforsk. 31 s. s.
- Horne, P.-A. (u.å.). *Pbl §31-2 endring på eksisterende bebyggelse, Oslo kommunes erfaring så langt*. Byggesaksdagene.
- Haakonsen, G. & Kvingedal, E. (2001). Utslipp til luft fra vedfyring i Norge. Utslippsfaktorer, ildstedbestand og fyringsvaner: Statistisk sentralbyrå.
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L. & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings-A review of current trends. *Energy and Buildings*, 66: 232-245.
- IPCC. (2010). *Understanding Climate Change: Intergovernmental Panel on Climate Change*,.
- IPCC. (2014a). *5th Assessment Report: Climate Change 2014: Impacts, Adaption, and Vulnerability, Technical Summary: Intergovernmental Panel on Climate Change*,.
- IPCC. (2014b). *5th Assessment Report: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Chapter 9 Buildings*. Berlin: Intergovernmental Panel on Climate Change,.
- IPCC. (2014c). *IPCC Report: A changing climate creates pervasive risks but opportunities exist for effective responses*. Yokohama: Intergovernmental Panel on Climate Change,.
- IPCC. (2014d). *IPCC: Greenhouse gas emissions accelerate despite reduction efforts, Many pathways to substantial emissions reductions are available*. Berlin: Intergovernmental Panel on Climate Change,.
- Isola. (2008). Veggsystem. *Produktdatablad*.
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43 (10): 2549-2563.
- Jensen, L. J. (2013). *Krav til universell utforming, ved hovedbygging etter TEK 10, sin påvirkning på bærekraft*. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.

- Jensen, Ø. N., Rudén, O. & Nilsen, L. P. (2013). *Norsk prisbok 2013*. 2013 utg. Sandvika: Norconsult informasjonssystemer.
- Johannesen, A. H. & Stien, H. (2011). *Bærekraftig realisering av potensialet i 180-talls murgårder. På bekostning av bevaringstanken?* Masteroppgave. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport. 176 s.
- Jones, D. C. (2011). *ICE Database, V2.0: Circular Ecology*.
- Kalhagen, K. O. (2011). *Konsekvensanalyse av å innføre nye forskriftskrav til energieffektivisering av bygg*: Multiconsult. 100 s. : tab. s.
- Kalnæs, S. E. & Jelle, B. P. (2014). Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*, 116: 355-375.
- Kartverket. (2012). *Hva er matrikkelen?*: Kartverket. Tilgjengelig fra: <http://kartverket.no/Eiendom-og-areal/Matrikkelen/Eiendomsregisteret/> (Hentet: 19. februar 2014).
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z. & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building an Environment*, 45: 1683-1697.
- Klinski, M., Thomsen, J., Hauge, Å. L., Jerkø, S. & Dokka, T. H. (2012). Systematisering av erfaringer med passivhus, Prosjektrapport 90: SINTEF Byggforsk, Husbanken.
- Kohler, N. & Hassler, U. (2002). The building stock as a research object. *Building Research & Information*, 30 (4): 226-236.
- KRD. (2009). *Bygg for fremtida Miljøhandlingsplan for bolig- og byggsektoren 2009-2012*. Kommunal- og regionaldepartementet.
- Kulturminneloven. (1978). *Lov om kulturminner*. LOV-197806-09-50: Klima- og miljødepartementet. Tilgjengelig fra: <http://lovdata.no/dokument/NL/lov/1978-06-09-50?q=kulturminneloven> (Hentet: 16. mai 2014).
- Langston, Y. L. & Langston, C. A. (2008). Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of 30 Melbourne case studies. *Construction Management and Economics*, 26 (2): 147-160.

- Langvik, M. & Røysland, O. J. (2005). *Puss på isolasjon og plater*: Mur-Sentret. Tilgjengelig fra: http://www.handverksmur.no/images/Marketing/Murkatalogen/P5_Puss_p_isolasjon.pdf (Hentet: 23. mai 2014).
- Lassen, N., Fylling, A., Mysen, M., Dokka, T. H. & Bordewich. (2009). Passivbygg som forskriftskrav i 2020: Statens Bygningstekniske Etat. 62 s.
- Lavenergiprogrammet. (u.å.-a). *Politiske mål*: Lavenergiprogrammet. Tilgjengelig fra: <http://www.lavenergiprogrammet.no/politiske-maal/category143.html> (Hentet: 08. mai 2014).
- Lavenergiprogrammet. (u.å.-b). *Tøffe forhandlinger om energieffektivisering i EU*: Lavenergiprogrammet. Tilgjengelig fra: <http://www.lavenergiprogrammet.no/nyheter-fra-eu/toeffe-forhandlinger-om-energieffektivisering-i-eu-article1969-142.html> (Hentet: 08. mai 2014).
- Lavenergiutvalget. (2009). *Energieffektivisering*. Oslo: Lavenergiutvalget. 104 s. s.
- Lepš, M. (2004). *Single and multi-objective Optimization in Civil Engineering with Applications*: Czech Technical University.
- Ljones, A., Nesbakken, R., Sandbakken, S. & Aaheim, A. (1990). *Energibruk i husholdningene - Energiundersøkelsen 1990. Rapport*: Statistisk Sentralbyrå.
- MacGregor, W., Hamdullahpur, F. & Ugursal, V. (1993). Space heating using small-scale fluidized beds: A techno-economic evaluation. *International journal of energy research*, 17 (6): 445-466.
- Magnussen, I. H., Spilde, D. & Killingland, M. (2011). *Energibruk i Fastlands-Norge*: Norges vassdrags- og energidirektorat.
- Martens, J.-D. (1993). *Norske boliger*. Oslo: Norsk arkitekturforl. 148 s. : ill. s.
- Marton, I. (2009). *Livsløpsanalyser*: Byggemiljø. Tilgjengelig fra: <http://www.byggemiljo.no/category.php/category/Livsl%F8psanalyser/?categoryID=300> (Hentet: 05. desember 2013).
- McKenzie, S. (2004). *Social sustainability: towards some definitions*: Hawke Research Institute, University of South Australia.

- MD. (2012). *Klimaforliket vedtatt i Stortinget*. <http://www.regjeringen.no>: Miljøverndepartementet,.
- Meadows, D. H., Goldsmith, E. & Meadow, P. (1972). *The limits to growth*, b. 381: Universe books New York.
- Medby, P., Christophersen, J., Denizou, K. & Edvardsen, D. F. (2006). Samfunnsøkonomiske effekter av universell utforming: Norges byggforskningsinstitutt. 189 s.
- Meld. St. 21. (2012). *Norsk klimapolitikk*. Miljøverndepartementet.
- Meld. St. 28. (2012). *Melding til Stortinget - Gode bygg for eit betre samfunn - Ein framtidsretta bygningspolitikk*. Kommunal- og regionaldepartementet. Bergen: Fagbokforlaget. 118 s.
- Microsoft. (2014). *Excel*. Tilgjengelig fra: <http://office.microsoft.com/nb-no/microsoft-excel-programvare-for-regneark-FX010048762.aspx> (Hentet: 28.april 2014).
- Mjønes, C., Pettersen, F. V. H., Kristoffersen, B. S., Birkeland, B. M., Essen, J. v. & Haarberg, K. J. (2012). Potensial- og barrierestudie Energieffektivisering av norske boliger: Enova.
- Monahan, J. & Powell, J. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: a case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 43 (1): 179-188.
- Myhre, L. (1995). *Some environmental and economic aspects of energy saving measures in houses: an estimation model for total energy consumption and emissions to air from the Norwegian dwelling stock, and a life cycle assessment method for energy saving measures in houses*, b. 1995:120. Trondheim: NTH. IX, 239 s. : ill. s.
- Myhre, L. (2000). *Towards sustainability in the residential sector: a study of future energy use in the Norwegian dwelling stock*, b. 41. Oslo: Byggforsk. 67 bl. : diagr. s.
- Myhre, L. (2012). Boligprodusentenes BIM-manual for passivhusprosjektering. *PassivhusNorden*, 2012.
- Müller, D. B. (2006). Stock dynamics for forecasting material flows—case study for housing in The Netherlands. *Ecological Economics*, 59 (1): 142-156.

- Mørk, M. I., Bjørberg, S., Sæbøe, O. E., Weisæth, O. & Valen, M. S. (2008). Ord og utrykk innen eiendomsforvaltning - fasilitetsstyring (Facilities Management): Norges bygg- og eiendomsforening.
- NBI anv. 7. (1958). *Varme hus, billige hus*, b. 7. Oslo: I kommisjon hos Tanum. [12] s. : ill. s.
- NGBC. (2011). BREEAM-nor kort innføring. Tilgjengelig fra: [http://www.byggutengrenser.no/filer/nedlasting/BRREAM nor kort innf%C3%B8ring.pdf](http://www.byggutengrenser.no/filer/nedlasting/BRREAM_nor_kort_innf%C3%B8ring.pdf) (lest 20. mai 2014).
- NGBC. (2013). *Om BREEAM*: Norwegian Green Building Council (Hentet: 20. mai 2014).
- Nilsen, L. P. (2013). Flere Norske EPD'er gir bedre grunnlag for carbon footprint analyser. Tilgjengelig fra: <http://www.norskprisbok.no/BookContentFile.aspx?id=4c4e006b-2d8d-4dd1-a15e-b1e182d3f47b> (lest 03. mai 2014).
- Nilsen, L. P. (2014). *Norsk Prisbok 2013* (e-post til Oll Ruden, AS Bygghanalyse 30. april 2014).
- NordPool. (2013). *Nord Pool Spot*. Tilgjengelig fra: <http://www.nordpoolspot.com> (Hentet: 25. februar 2014).
- NOU 1998:11. *Energi- og kraftbalansen mot 2020*. Olje- og energidepartementet. Oslo: Statens Forvaltningstjeneste.
- NOU 2005:8. *Likeverd og tilgjengelighet*. Justis- og Politidepartementet. Oslo: Statens forvaltningstjeneste Informasjonsforvaltning. 377 s.
- Novakovic, V., Hanssen, S. O., Thue, J. V., Wangensteen, I. & Gjerstad, F. O. (2007). *Enøk i bygninger Effektiv energibruk*. Gyldendal Undervisning.
- NS 3700:2013. (). *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger*: Standard Norge,.
- Olerud, K. (2012). *Klimakonvensjonen*: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/Klimakonvensjonen> (Hentet: 08. mai 2014).
- Olsson, H. & Sörensen, S. (2003). *Forskningsprosessen: kvalitative og kvantitative perspektiver*. Oslo: Gyldendal akademisk. 191 s. : ill. s.
- Olsson, N. (2011). *Praktisk rapportskrivning*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.

- Palm, L., Almås, A.-J., Kristiansen, Ø., Bjertnes, A. G. & Forsén, N. E. (2012). Utredning av materielle krav ved tiltak på eksisterende bebyggelse: Kommunal- og regionaldepartementet. 49 s.
- Papadopoulos, A. & Giama, E. (2009). Rating systems for counting buildings' environmental performance. *International Journal of Sustainable Energy*, 28 (1-3): 29-43.
- Pauliuk, S., Sjöstrand, K. & Müller, D. B. (2013). Transforming the Norwegian dwelling stock to reach the 2 degrees celsius climate target. *Journal of Industrial Ecology*, 17 (4): 542-554.
- Plan- og bygningsloven. (2008). *Lov om planlegging og byggesaksbehandling*. LOV-2008-06-27-71: Miljøverndepartementet. Tilgjengelig fra: <http://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71> (Hentet: 02. mai 2014).
- Plessner, T. (2013). Glava glassull. *Environmental Product Declaration ISO 14025: 221N ver 2*: EPD Norge.
- PRé. (u.å.). *SimaPro / World's leading LCA Software*. Tilgjengelig fra: <http://www.pre-sustainability.com/simapro> (Hentet: 24. april 2014).
- Prisbok, N. (u.å.). *Hva er Norsk Prisbok?* Tilgjengelig fra: <http://www.norskprisbok.no/WhatIsNP.aspx> (Hentet: 02. mai 2014).
- ProgramByggerne. (2014a). *Introduksjon til SIMIEN*. Tilgjengelig fra: <http://www.programbyggerne.no/SIMIEN/introduksjon> (Hentet: 07. april 2014).
- ProgramByggerne. (2014b). *SIMIEN*. Tilgjengelig fra: <http://www.programbyggerne.no> (Hentet: 07. april 2014).
- Prop. 1 L (2009). *Proposisjon til Stortinget (forslag til lovvedtak)*. Finansdepartementet. Oslo. 131 s.
- Prop. 91 L. (2011). *Endring i plan- og bygningsloven*. regionaldepartementet, K.-o. 9 s.
- Ramesh, T., Prakash, R. & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42 (10): 1592-1600.

- Randers, J. (2012). *2052: A global forecast for the next forty years*: Chelsea Green Publishing.
- Regjeringen. (u.å.). *Kulturminneloven*. Tilgjengelig fra: http://www.regjeringen.no/nb/dok/lover_regler/lover/kulturminneloven.html?id=173106 (Hentet: 16. mai 2014).
- Reiersen, E., Thue, E. & Jensen, L.-A. (1996). *De tusen hjem: Den norske stats husbank 1946-96*. Oslo: Ad notam Gyldendal. 488 s. : ill. ; 28 cm s.
- Rognlien, S., Kvarsvik, O. K., Bjørberg, S. & Bølviken, T. (2002). "Gjenbruk i byggebransjen - State of Art": Statsbygg. 77 s.
- Rosvold, K. A. & Olerud, K. (2014). *Klimaforliket*: Store Norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/Klimaforliket> (Hentet: 08. mai 2014).
- Ruden, A. & Nystad, J. F. (2006). *Husbanken 60 år - et jubileumsskrift*. Oslo: Husbanken. 88 s. : ill. ; 30 cm s.
- Rønning, A., Lyng, K.-A. & Vold, M. (2011). Kunnskapsplattform for beregning av klimabelastning fra bygg og byggematerialer - Litteraturstudie: Østfoldforskning.
- Raaholdt, R. K. (2011). *BREEAM og fjernvarme*: Multiconsult.
- Samsø, K. (2008). *Prosjekt i tidligfasen, valg av konsept*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Sartori, I., Wachenfeldt, B. J. & Hestnes, A. G. (2009). Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction. *Energy Policy*, 37: 1614-1627.
- Sartori, I., Dokka, T. & Andresen, I. (2011). Proposal of a Norwegian ZEB definition: Assessing the Implications for Design. *College Publishing*, 6 (3): 133-150.
- Schmidt, L. & Guttu, J. (2012). Små boliger - universell utforming, bovaner og brukskvalitet: Norsk institutt for by- og regionsforskning. 189 s.
- Selvig, E. (2011). *Klimagassberegninger for vernede boligbygg vs. nye lavenergiboliger: en sammenligning av: et vernet laftet boligbygg (1812/1920), rehabilitert (2005-2010) og et nytt boligbygg, lavenergihus, klasse II (2010)*. Oslo: Civitas. 21 s. : diag., tab. s.

- Simonsen, C. (2013). *Arealeffektivitet, i form av delt bruk, sin påvirkning på bærekraft, krav og sertifiseringer i undervisningsbygg*. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg anlegg og transport. 128 s.
- SINTEF. (1994). *552.301 Ventilasjon av boliger. Prinsipper og behov*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (1998). *614.016 Byggebestemmelser 1924 - 1996. Krav til utførelse*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2003). *723.312 Etterisolering av betong- og murvegger*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2004a). *701.266 Energisparende tiltak i boliger*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2004b). *722.506 Etterisolering av etasjeskillere over kjeller og kryprom*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2004c). *723.511 Etterisolering av yttervegger av tre*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2005a). *612.015 Bygningsvern. Lover aktører og støtteordninger*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2005b). *725.403 Etterisolering av tretak*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2007a). *523.255 Bindingsverk av tre. Varmeisolasjon og tetting*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2007b). *525.207 Kompakte tak*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2008). *Hvordan oppfylle energikravene i TEK*: SINTEF Byggforsk.
Tilgjengelig fra: <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Fagartikler/16-08/Energikrav.pdf> (Hentet: 19. mai 2014).
- SINTEF. (2009). *522.362 Tilfarergolv i nye og eksisterende bygg*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2010a). *470.103 Miljødeklarasjon av byggevarer*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2010b). *612.012 Bygningsvern. Definisjoner, verneverdier og råd om bygningspleie*. SINTEF Byggforsk.

- SINTEF. (2012). *720.035 Måling av bygningers luftlekkasje. Trykkmetoden*: SINTEF Byggforsk.
- SINTEF. (2013). *Nye veiledere for behovsstyrt ventilasjon*: SINTEF. Tilgjengelig fra: <http://www.sintef.no/Byggforsk/Nyheter/Nye-veiledere-for-behovsstyrt-ventilasjon/> (Hentet: 24. mai 2014).
- SINTEF. (2014). *523.251 Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse*. SINTEF Byggforsk.
- Skanche, G. & Haraldsen, G. (1990). *Boforholdsundersøkelsen 1988*: Statistisk sentralbyrå.
- Slette, P. A. (2012). *Arealeffektivitet i norske kontorbygninger relatert til bærekraftig utvikling i byggsektoren*. Trondheim: NTNU, Institutt for bygg anlegg og transport. 147 s.
- Solem, H. (2014). *SV: SV: (Ticket: #2437986) Potensial- og barrierestudie - boliger; vedlegg (26.02)*.
- SSB. (2011a). *Energibruk i husholdningene, 2009 - Statistikkens hovedside*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/husenergi/> (Hentet: 17. april 2014).
- SSB. (2011b). *Folke- og boligtelling, boliger 19. november 2011 - Om statistikken*. Tilgjengelig fra: <https://http://www.ssb.no/befolkning/statistikker/fobbolig/hvert-10-aar/2013-02-26?fane=om-content> (Hentet: 11. mars 2013).
- SSB. (2011c). *Folke- og boligtelling, boliger, 19. november 2011 - Statistikkens hovedside*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/befolkning/statistikker/fobbolig/hvert-10-aar/2013-02-26-content> (Hentet: 06. april 2014).
- SSB. (2013a). *Boliger, 1. januar 2013 - Om statistikken*: Statistisk Sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://http://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/boligstat/aar/2013-07-12?fane=om-content> (Hentet: 26. februar 2014).
- SSB. (2013b). *Bygningsmassen, 1. januar 2013*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://http://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/statistikker/bygningsmasse> (Hentet: 19. februar 2014).

- SSB. (2013c). *Folke- og bolig telling, boliger, 19. november 2011; Boliger i alt og bebodde boliger, etter byggeår og bygningstype. 2011. Antall og prosent*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://ssb.no/befolkning/statistikker/fobbolig/hvert-10-aar/2013-02-26?fane=tabell&sort=nummer&tabell=99246> (Hentet: 19. februar 2014).
- SSB. (2014a). *Folkemengden, 1. januar 2014*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/befolkning/statistikker/folkemengde/aar> (Hentet: 27. mai 2014).
- SSB. (2014b). *Utslipp av klimagasser, 2013, foreløpige tall*: Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/klimagassn/aar-forelopige/2014-05-14?fane=tabell&sort=nummer&tabell=177135> (Hentet: 19. mai 2014).
- SSB. (u.å.). *Folkemengd og befolkningsendringar*: Statistisk sentralbyrå,. Tilgjengelig fra: <https://http://www.ssb.no/statistikkbanken/selectvarval/Define.asp?subjectcode=&ProductId=&MainTable=FolkHistorie&nvl=&PLanguage=0&nyTmpVar=true&CMSSubjectArea=befolkning&KortNavnWeb=folkendrkv&StatVariant=&checked=true> (Hentet: 16. mai 2014).
- St.meld nr. 16. (2005). *Leve med kulturminner*: Miljøverndepartementet. 95 s.
- Standard Norge. (2006). *Miljøstyring, livsløpsvurdering, prinsipper og rammeverk (ISO 14040:2006)*. Lysaker: Standard Norge. 28 s. s.
- Standard Norge. (2007). *Beregning av bygningers energiytelse. Metode og data*. NS 3031:2007+A1:2011. Oslo.
- Standard Norge. (2009). *Beskrivelsestekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del Q: Tømrerarbeider*. NS 3420-Q:2009: Oslo.
- Standard Norge. (2013). *Klassifikasjoner av byggverk - Del 3: Bygningstyper*. NS 3457-3:2013. Oslo.
- Statsbygg. (2012). *Klimagassregnskap.no/versjon 4*: Statsbygg.
- Statsbygg. (u.å.). *Beregningsverktøy*. Tilgjengelig fra: <http://www.statsbygg.no/Miljo/Beregningsverktoy/> (Hentet: 22. april 2014).

- Swan, L. G. & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (8): 1819-1835.
- Sørnes, K. (2012). Norsk konstruksjonslast (ubehandlet). *Environmental Product Declaration ISO 14025: 084N rev1*: EPD Norge.
- Sørnes, K. (2013a). H-vinduet, 1.23 x 1.48, type AT200E. *Environmental Product Declaration ISO 14025: 233N*: EPD Norge.
- Sørnes, K. (2013b). Protan SE 1.2 Takbelegg. *Environmental Product Declaration 14025: 233N*: EPD Norge.
- TEK07. (2007). *Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven 1997*: Kommunal- og regionaldepartementet - Bolig og bygningsavdelingen. Tilgjengelig fra: http://dibk.no/Documents/Byggeregler/Tidligere_regelverk/Tekniske_skrifter_2007.pdf (Hentet: 21. mars 2014).
- TEK10. (2010). *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*. FOR-2010-03-26-489 utg.: Kommunal- og regionaldepartementet,. Tilgjengelig fra: <http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489> (Hentet: 20. mars 2014).
- Thomsen, J. & Berge, M. (2012). Inneklima i energieffektive boliger - en litteraturstudie. Trondheim: SINTEF Byggforsk.
- Thue, J. V. (u.å.). *totrinns tetting*: Store Norske leksikon. Tilgjengelig fra: http://snl.no/totrinns_tetting (Hentet: 23. mai 2014).
- Thyholt, M. & Dokka, T. H. (2003). *Nye forskriftskrav til bygningers energibehov*, b. STF22 A03524. Trondheim: SINTEF. 65 s. : ill. s.
- Thyholt, M., Pettersen, T. D., Haavik, T. & Wachenfeldt, B. J. (2009). Energy Analysis of the Norwegian Dwelling Stock Subtask A - Internal working document. *Solar Heating and Cooling Programme*: International Energy Agency.
- Thyholt, M., Dokka, T. H. & Jenssen, B. (2012). Powerhouse One: the first plus-energy commercial building in Norway. *PassivhusNorden*, 2012.
- Treloar, G. J., Love, P. E. & Holt, G. D. (2001). Using national input-output data for embodied energy analysis of individual residential buildings. *Construction Management & Economics*, 19 (1): 49-61.

- Treteknisk håndbok*. (2009). b. nr. 4. Oslo: Norsk treteknisk institutt. 338 s. : ill. s.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Climate Leaders Greenhouse Inventory Protocol Offset Project Methodology: Climate Protection Partnerships Division/ Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs, U.S. Environmental Protection Agency.
- Valen, M. S., Haavaldsen, T. & Lædre, O. (2010). Innspill til Stortingsmelding om bygningspolitikk - for sikring av bærekraft/levedyktighet. Tilgjengelig fra:
http://www.regjeringen.no/upload/KRD/Vedlegg/BOBY/horinger/innspe_l_bygnpol/ntnu_vfl.pdf (lest 26. mai 2014).
- Verdenskommisjonen. (1987). *Vår felles framtid*. Verdenskommisjonen for miljø og utvikling,: Tiden Norsk Forlag.
- VIKO. (u.å.). *Veien til informasjonskompetanse*: NTNU. Tilgjengelig fra:
<http://www.ntnu.no/viko/> (Hentet: 29. februar 2014).
- Vold, M., Rønning, A. & Nyland, C. A. (2005). EPD'er - Hvem? Hva? Hvorfor? Fredrikstad: Stiftelsen Østfoldforskning.
- Vold, M. (2006). Høyelastisk fugemasse (Sikaflex®-15LM). *Environmental Product Declaration ISO 14025: 095N*: EPD Norge.
- Vold, M. (2009). Murmørtel Weber M5. *Environmental Product Declaration ISO 14025: 130N*: EPD Norge.
- Wang, W., Zmeureanu, R. & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 40 (11): 1512-1525.
- WBGU. (1995). Scenario for the derivation of global CO2 reduction targets and implementation strategies, Statement on the occasion of the First Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Berlin. Bremerhaven: German Advisory Council on Global Change,.
- WBGU. (1997). Targets for Climate Protection, A study for the Third Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Kyoto. Bremerhaven: German Advisory Council on Global Change,.

- Weydahl, E. (2011). *Energi: med vekt på energibruk i boliger*. Oslo: Eiendomsforlaget AS. 132 s. : ill. ; 30 cm s.
- Wolfgang, O. & Mo, B. (2007). Reduserte CO2 utslipp som følge av økt fornybar kraftproduksjon i Norge: SINTEF Energiforskning.
- Wright, J. A., Loosemore, H. A. & Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34 (9): 959-972.

Vedlegg

Vedlegg 1 - Egenskaper for eksisterende boliger

Vedlegg 2 - Bundet energi og karbon

Vedlegg 3 - Optimale isolasjonstykkelser og U-verdi

Vedlegg 4 - Spesifikk energi og energibesparelse

Vedlegg 1 - Egenskaper for eksisterende boliger

Tabell 1.1 Avgrensning mot uoppvarmede soner for boliger. Sortert etter byggeår og boligtype

Byggeår	Boligers avgrensning mot uoppvarmede soner etter byggeår			
	Avgrensning tak		Avgrensning gulv	
	Rom	Materialer	Rom	Materialer
Enebolig				
Før 1956	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1956 - 1970	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1970 - 1980	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Markplate	Betong
1980 - 1990	Oppvarmet loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1990 - 1999	Oppvarmet loft	Bjelkelag i tre	Markplate	Betong
Etter 1999	Oppvarmet loft	Bjelkelag i tre	Markplate	Betong
Småhus				
Før 1956	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1956 - 1970	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1970 - 1980	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1980 - 1990	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1990 - 1999	Oppvarmet loft	Bjelkelag i tre	Markplate	Betong
Etter 1999	Oppvarmet loft	Bjelkelag i tre	Markplate	Betong
Boligblokk				
Før 1956	Kaldt loft	Bjelkelag i tre	Uoppvarmet kjeller	Bjelkelag i tre
1956 - 1970	Kaldt loft	Betongdekker	Uoppvarmet kjeller	Betongdekker
1970 - 1980	Flatt tak mot friluft	Betongdekker	Uoppvarmet kjeller	Betongdekker
1980 - 1990	Flatt tak mot friluft	Betongdekker	Uoppvarmet kjeller	Betongdekker
1990 - 1999	Flatt tak mot friluft	Betongdekker	Uoppvarmet kjeller	Betongdekker
Etter 1999	Flatt tak mot friluft	Betongdekker	Uoppvarmet kjeller	Betongdekker

Tabell 1.2 Boligkategoriernes geometri

Byggeår	Størrelse grunnflate	
	Myhre ^a	Mjønes ^b
Enebolig		
Før 1956	7,5 m x 8,1 m	8,86 m x 8,24 m
1956 - 1970	7,5 m x 7,9 m	8,76 m x 8,35 m
1970 - 1980	7,6 m x 11,7 m	10,80 m x 7,01 m
1980 - 1990	7,6 m x 12,1 m	13,85 m x 8,70 m
1990 - 1999	-	12,48 m x 8,52 m
Etter 1999	-	13,11 m x 8,52 m
Småhus		
Før 1956	7,5 m x 12,3 m	13,32 m x 8,12 m
1956 - 1970	7,1 m x 28,4 m	21,73 m x 5,43 m
1970 - 1980	7,1 m x 28,4 m	21,51 m x 5,38 m
1980 - 1990	7,1 m x 28,4 m	21,27 m x 5,32 m
1990 - 1999	-	15,11 m x 6,65 m
Etter 1999	-	17,85 m x 5,80 m
Boligblokk		
Før 1956	10,0 m x 18,0 m	15,97 m x 8,87 m
1956 - 1970	10,0 m x 44,4 m	34,18 m x 7,70 m
1970 - 1980	12,0 m x 42,5 m	39,79 m x 11,24 m
1980 - 1990	12,0 m x 42,0 m	40,07 m x 11,45 m
1990 - 1999	-	34,43 m x 11,98 m
Etter 1999	-	37,93 m x 11,16 m

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

Tabell 1.3 Fordeling av vinduer etter himmelretning for boligkategoriene

Byggeår	Retning vinduer (%)					
	Myhre ^a		Myhre ^e		Mjønes ^b	
	Sør - Vest-	Øst - Nord	Sør - Vest-	Øst - Nord	Sør - Vest-	Øst - Nord
Enebolig						
Før 1956	35 - 35 -	20 - 10	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
1956 - 1970	35 - 35 -	20 - 10	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
1970 - 1980	35 - 35 -	20 - 10	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
1980 - 1990	35 - 35 -	20 - 10	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
1990 - 1999		-	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
Etter 1999		-	38 - 19 -	24 - 19	35 - 35 -	20 - 10
Småhus						
Før 1956	35 - 35 -	20 - 10	35 - 20 -	10 - 35	35 - 35 -	20 - 10
1956 - 1970	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	35 - 35 -	20 - 10
1970 - 1980	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
1980 - 1990	60 - 00 -	00 - 40	35 - 20 -	10 - 35	60 - 00 -	00 - 40
1990 - 1999		-	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
Etter 1999		-	55 - 05 -	35 - 05	60 - 00 -	00 - 40
Boligblokk						
Før 1956	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
1956 - 1970	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
1970 - 1980	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
1980 - 1990	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
1990 - 1999		-	60 - 00 -	00 - 40	60 - 00 -	00 - 40
Etter 1999		-	55 - 05 -	35 - 05	60 - 00 -	00 - 40

a) (Myhre, 1995)

b) (Mjønes et al., 2012)

e) (Myhre, 2000)

Vedlegg 2 - Bundet energi og karbon

Tabell 2.1 Materialelegenskaper for bygningsmaterialer

Material	Massetetthet		Levetid	Funksjonell enhet (FE)	Bundet energi				Bundet karbon		Systemgrense
	kg/m^3	kg/FE			$\text{\AA}r$	MJ/FE	MJ/kg	kWh/FE	kWh/kg	$kg\ CO2.ekv/FE$	
Dampsperre ^{i,j}		0,1		A = 1 m ² t = 0,15 mm	12,5	89,3	3,5	24,81	0,36	2,60	Vugge til port
Fugemasse ^k	800,0	0,2	> 20	1 patron, 300 ml	39,1	162,9	10,9	45,25	2,29	9,54	Vugge til byggeplass
Gipsplate ^u		9,0	60	A = 1 m ² t = 0,0125 m	45,7	5,1	12,7	1,4	2,66	0,30	Vugge til grav
Isolasjon ^l	16,5	0,6	60	V = 1 m ² R = 1 m ² K/W $\lambda_D = 0,035\ W/mK$ t = 0,035 m	19,5	33,8	5,4	9,38	0,76	1,32	Vugge til grav
Kledning ^m	460,0		50	A = 1 m ² 198x19 mm 25 mm omlegg	166,0		46,1		5,60		Vugge til grav
Takbelegg ^o		1,4	30	A = 1 m ²	107,9		30,0		3,9		Vugge til grav
Panel ^v			30	A = 1 m ²	32,0	-	8,9	-	0,4		Vugge til grav
Puss ⁿ		1,0		1 kg m\rtel	1,3	1,3	0,4	0,4	0,13	0,13	Vugge til port
Stenderverk ^{o, p}	460,0	460,0	60	V = 1 m ³	2455	5,3	681,9	1,48	37,30	0,08	Vugge til grav
Vindsperre ^{q, j}		0,1		A = 1 m ²	5,0	83,1	1,4	23,08	0,15	2,54	Vugge til port
Vinduer ^f		54,9	60	A = 1,23 x 1,48 m U = 1,2 W/m ² K	1235	22,5	342,9		122,42	2,23	Vugge til grav

Tabell 2.2 Egenskaper tekniske installasjoner

Material	Massetetthet		Levetid år	Funksjonell enhet (FE)	Bundet energi				Bundet karbon		Systemgrense
	<i>kg/m³</i>	<i>kg/FE</i>			<i>MJ/FE</i>	<i>MJ/kg</i>	<i>kWh/FE</i>	<i>kWh/kg</i>	<i>kg CO2.ekv/FE</i>	<i>kg CO2.ekv/kg</i>	
Varepumpe ^{s, t}	-	-	60	Komplett 4 kW pumpe	330,3	-	91,8	-	30,9	-	Vugge til port*
Ventilasjon ^{s, t}	-	-	60	Komplet anlegg A = 1 m ² Luftskifte = 1 m ³ /h	0,2	-	0,6	-	0,02	-	Vugge til port*

Fotnoter

ø) (Sørnes, 2013b)

i) (GLAVA AS, 2013)

j) (Jones, 2011)

k) (Vold, 2006)

l) (Plessner, 2013)

m) (Grini, 2010b)

n) (Vold, 2009)

o) (Sørnes, 2012)

p) (*Treteknisk håndbok*, 2009)

q) (Isola, 2008)

r) (Sørnes, 2013a)

s) (Jensen et al., 2013)

t) (Nilsen, 2014)

u) (Holme & Gjerlow, 2011)

v) (Grini, 2010a)

* Norsk prisbok opererer med systemgrensen vugge til port pluss at de i tillegg har lagt til forventede utskiftninger i levetiden. Den er definert til 60 år.

Vedlegg 3 - Optimale isolasjonstykkelser og U-verdier

Tabell 3.1 Optimalisering av enebolig

Byggeår/ pakke	Optimale løsninger					
	Optimal isolasjon tykkelse			Optimal u-verdi		
	Tak	Gulv	Vegger	Tak	Gulv	Vegger
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K
Før 1956						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,30	0,30	0,11	0,10	0,10
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,30	0,11	0,14	0,10
VP 1,1 - vent	0,25	0,30	0,35	0,11	0,10	0,09
VP 2 - vent	0,25	0,20	0,30	0,11	0,14	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,30	0,25	0,09	0,09	0,11
VP 2 - ikke vent	0,20	0,25	0,25	0,13	0,11	0,11
VP 1,1 - vent	0,30	0,30	0,30	0,09	0,09	0,10
VP 2 - vent	0,15	0,20	0,25	0,15	0,13	0,11
1956 - 1980						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,30	0,30	0,08	0,09	0,09
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,25	0,09	0,11	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,30	0,25	0,08	0,09	0,10
VP 2 - vent	0,15	0,20	0,25	0,13	0,11	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,25	0,30	0,08	0,09	0,09
VP 2 - ikke vent	0,20	0,20	0,25	0,10	0,11	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,30	0,25	0,08	0,08	0,10
VP 2 - vent	0,20	0,25	0,25	0,10	0,09	0,10
1980 - 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,20	0,20	0,07	0,09	0,10
VP 2 - ikke vent	0,15	0,10	0,20	0,10	0,11	0,10
VP 1,1 - vent	0,25	0,20	0,30	0,08	0,09	0,08
VP 2 - vent	0,15	0,10	0,20	0,10	0,11	0,10
Etter 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,20	0,25	0,07	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,10	0,15	0,15	0,10	0,09	0,11
VP 1,1 - vent	0,30	0,20	0,20	0,06	0,08	0,10
VP 2 - vent	0,25	0,15	0,15	0,07	0,09	0,11

Tabell 3.2 Optimalisering av småhus

Byggeår/ pakke	Optimale løsninger					
	Optimal isolasjon tykkelse			Optimal u-verdi		
	Tak	Gulv	Vegger	Tak	Gulv	Vegger
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K
Før 1956						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,30	0,30	0,11	0,10	0,10
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,30	0,11	0,14	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,30	0,40	0,10	0,10	0,08
VP 2 - vent	0,25	0,25	0,30	0,11	0,12	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,35	0,30	0,25	0,08	0,09	0,11
VP 2 - ikke vent	0,30	0,30	0,25	0,09	0,09	0,11
VP 1,1 - vent	0,30	0,35	0,35	0,09	0,08	0,09
VP 2 - vent	0,30	0,30	0,25	0,09	0,09	0,11
1956 - 1980						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,35	0,30	0,35	0,07	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,25	0,09	0,10	0,10
VP 1,1 - vent	0,35	0,20	0,35	0,07	0,10	0,08
VP 2 - vent	0,25	0,20	0,25	0,09	0,10	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,25	0,35	0,08	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,25	0,09	0,10	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,25	0,35	0,08	0,08	0,08
VP 2 - vent	0,20	0,15	0,25	0,10	0,11	0,10
1980 - 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,20	0,30	0,08	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,15	0,15	0,20	0,10	0,09	0,10
VP 1,1 - vent	0,25	0,15	0,50	0,08	0,09	0,10
VP 2 - vent	0,15	0,15	0,20	0,10	0,09	0,10
Etter 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,20	0,25	0,07	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,10	0,15	0,15	0,10	0,09	0,11
VP 1,1 - vent	0,25	0,20	0,25	0,07	0,08	0,08
VP 2 - vent	0,10	0,15	0,15	0,10	0,09	0,11

Tabell 3.3 Optimalisering av boligblokk

Byggeår/ pakke	Optimale løsninger					
	Optimal isolasjon tykkelse			Optimal u-verdi		
	Tak	Gulv	Vegger	Tak	Gulv	Vegger
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K
Før 1956						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,30	0,35	0,10	0,09	0,09
VP 2 - ikke vent	0,25	0,30	0,30	0,11	0,09	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,35	0,40	0,10	0,08	0,08
VP 2 - vent	0,25	0,30	0,30	0,11	0,09	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,35	0,35	0,40	0,08	0,08	0,08
VP 2 - ikke vent	0,30	0,25	0,30	0,09	0,10	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,25	0,40	0,09	0,10	0,08
VP 2 - vent	0,30	0,25	0,30	0,09	0,10	0,10
1956 - 1980						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,30	0,40	0,09	0,09	0,08
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,30	0,09	0,11	0,10
VP 1,1 - vent	0,30	0,25	0,40	0,08	0,10	0,08
VP 2 - vent	0,25	0,20	0,30	0,09	0,11	0,10
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,20	0,35	0,09	0,11	0,08
VP 2 - ikke vent	0,20	0,20	0,25	0,10	0,11	0,11
VP 1,1 - vent	0,35	0,30	0,40	0,07	0,08	0,08
VP 2 - vent	0,20	0,20	0,25	0,10	0,11	0,11
1980 - 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,25	0,30	0,30	0,09	0,08	0,09
VP 2 - ikke vent	0,20	0,20	0,20	0,10	0,11	0,11
VP 1,1 - vent	0,35	0,30	0,25	0,07	0,08	0,10
VP 2 - vent	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,11
Oppgradert						
VP 1,1 - ikke vent	0,20	0,30	0,25	0,10	0,08	0,10
VP 2 - ikke vent	0,25	0,20	0,15	0,09	0,10	0,13
VP 1,1 - vent	0,30	0,35	0,25	0,08	0,07	0,10
VP 2 - vent	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,11
Etter 1999						
Original						
VP 1,1 - ikke vent	0,30	0,30	0,35	0,06	0,06	0,07
VP 2 - ikke vent	0,15	0,10	0,25	0,09	0,10	0,09
VP 1,1 - vent	0,30	0,30	0,35	0,06	0,06	0,07
VP 2 - vent	0,15	0,15	0,25	0,09	0,09	0,09

Vedlegg 4 - Spesifikk energi og energibesparelse

Tabell 4.1 Spesifikk energi og energibesparelse for optimalisering av enebolig

Byggeår/ pakke	Optimal løsning	
	Spesifikk energi	Energibesparelse
	W/m^2K	kWh
Før 1956		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	79,9	414 821
VP 2 - ikke vent	57,9	462 351
VP 1,1 - vent	89,7	392 670
VP 2 - vent	66,8	443 658
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	78,9	264 523
VP 2 - ikke vent	57,8	310 829
VP 1,1 - vent	88,7	242 372
VP 2 - vent	67,5	291 786
1956 - 1980		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	76,1	181 794
VP 2 - ikke vent	56,0	228 208
VP 1,1 - vent	87,8	158 438
VP 2 - vent	66,0	208 260
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	76,1	153 930
VP 2 - ikke vent	56,2	199 918
VP 1,1 - vent	87,8	129 896
VP 2 - vent	65,0	180 493
1980 - 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	81,5	67 939
VP 2 - ikke vent	59,5	127 480
VP 1,1 - vent	92,6	39 855
VP 2 - vent	69,9	102 048
Etter 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	89,8	59 266
VP 2 - ikke vent	66,3	122 754
VP 1,1 - vent	81,8	78 427
VP 2 - vent	61,0	131 932

Tabell 4.2 Spesifikk energi og energibesparelse for optimalisering av småhus

Byggeår/ pakke	Optimal løsning	
	Spesifikk energi W/m^2K	Energibesparelse kWh
Før 1956		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	80,5	586 647
VP 2 - ikke vent	58,2	657 512
VP 1,1 - vent	90,0	552 495
VP 2 - vent	67,2	628 718
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	79,7	397 796
VP 2 - ikke vent	57,2	468 300
VP 1,1 - vent	89,6	363 387
VP 2 - vent	66,5	439 558
1956 - 1980		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	72,1	487 554
VP 2 - ikke vent	54,1	622 200
VP 1,1 - vent	84,0	411 834
VP 2 - vent	63,4	559 693
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	72,5	398 404
VP 2 - ikke vent	54,1	531 480
VP 1,1 - vent	83,7	323 130
VP 2 - vent	63,8	470 544
1980 - 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	72,4	248 995
VP 2 - ikke vent	54,0	373 496
VP 1,1 - vent	85,1	177 372
VP 2 - vent	63,5	314 776
Etter 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	87,0	174 556
VP 2 - ikke vent	64,6	314 241
VP 1,1 - vent	83,5	190 881
VP 2 - vent	63,8	318 935

Tabell 4.3 Spesifikk energi og energibesparelse for optimalisering av boligblokk

Byggeår/ pakke	Optimal løsning	
	Spesifikk energi W/m^2K	Energibesparelse kWh
Før 1956		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	80,4	1 407 075
VP 2 - ikke vent	57,8	1 597 222
VP 1,1 - vent	91,1	1 313 991
VP 2 - vent	67,3	1 519 689
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	79,3	1 035 271
VP 2 - ikke vent	57,7	1 225 632
VP 1,1 - vent	91,3	941 274
VP 2 - vent	67,4	1 145 174
1956 - 1980		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	75,3	2 360 124
VP 2 - ikke vent	55,1	2 857 674
VP 1,1 - vent	87,4	2 077 794
VP 2 - vent	65,0	2 625 977
Oppgradert		
VP 1,1 - ikke vent	75,7	1 890 066
VP 2 - ikke vent	55,4	2 382 541
VP 1,1 - vent	86,9	1 603 227
VP 2 - vent	65,4	2 148 504
1980 - 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	71,1	901 045
VP 2 - ikke vent	52,8	1 389 963
VP 1,1 - vent	82,7	610 873
VP 2 - vent	62,5	1 145 482
Etter 1999		
Original		
VP 1,1 - ikke vent	102,0	410 520
VP 2 - ikke vent	73,8	1 140 850
VP 1,1 - vent	90,2	699 345
VP 2 - vent	67,1	1 291 088