

Systemanalyse og utbedring av en katalogbolig for å oppnå høyere energieffektivitet

Alterations and improvements of an existing building design to increase energy efficiency

Trondheim Mai 2022

Maja Kaarby Rygge
Sigrid Hogstad

Intern veileder:
Bozena Dorota Hrynyszyn

Ekstern veileder:
Snorre Bjørkum v/Norgeshus

Prosjektnummer:
2022 - 20

Rapporten er:
Åpen



Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Prosjektbeskrivelse

Det skal i dette prosjektet undersøkes hvilke tiltak som er lønnsomt å iverksette, for å oppnå en mer energieffektiv standard for et spesifikt utvalg av Norgeshus sin standardmodell. Det skal vurderes tiltak etter energieffektivitet og kostnad samt drøfte kort om den praktiske gjennomføringen.

Tiltak sammenlignes i energi-simulerende program og standardiserte verdier benyttes der det ikke beregnes spesifikt. Det blir eventuelt brukt eksisterende verdier fra produsent av husmodellen.

Prosjektets mål vil være å berike Norgeshus Midt-Norge med ytterligere kunnskap om hvilke muligheter som finnes rundt energieffektivitet. Dette vil gi Norgeshus et fortrinn med tanke på hva de kan tilby sine kunder og forhåpentligvis også gi bedre grunnlag for å kunne håndtere nyere forskrifter mer effektivt. Noen av tiltakene som undersøkes i denne oppgaven vil ha stor overføringsverdi, og kan mest sannsynlig også implementeres i andre eksisterende katalogboliger.

Resultatmål

- Vurderinger og beregninger av bygningsdeler og materialene sine egenskaper. Herunder vurderinger av U-verdi, kuldebroverdi og varmetapstall.
- Overslag av tekniske anlegg sin energiproduksjon veid opp mot vurderinger knyttet opp mot lønnsomhet.
- Simuleringer i PHPP og Simien der opprinnelig utgangspunkt blir sammenlignet med prosjekteringsforslagenes utbedringer.

Stikkord

Energieffektivitet

Nullenergi

Passivhus

Plusshus

Lønnsomhet

Miljø og klima

Utvikling av byggebransjen

Keywords

Energy efficiency

Zero energy

Passive house

Plus house

Profitability

Environment and climate

Development of the construction industry

Forord

Denne bacheloren er skrevet i 2022 for å fullføre vår byggingeniørgrad innen fordypningen Husbyggingsteknikk. Oppgaven utgjør 20 studiepoeng ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet i Trondheim.

Oppgaven er gjort i samarbeid med Norgeshus Midt-Norge. Motivasjonen for oppgaven har vært at en fordypning i temaet vil gi oss studenter en bredere forståelse for en framtidsrettet og viktig del av bransjen. Vi har begge en mening om at energieffektivitet og utbedring av bygninger er essensielt, og burde være bedre implementert i byggebransjen.

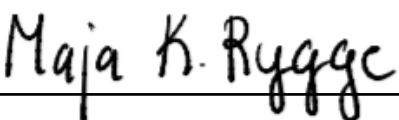
Dersom Norge skal kunne forbedre sine metoder og prosjekteringer til å bli mer miljøvennlige og energieffektive, i takt med klimaendringens aggressivitet, må standarder og krav utbedres. Et viktig bidrag til å øke bevissthet i bransjen rundt miljø- og økonomigevinster, er å sørge for at kunnskap er lett tilgjengelig for allmennheten.

Ønsker å rette en stor takk til Snorre Bjørkum, og alle de andre ved Norgeshus. Deres bidrag, veiledning og kompetanse har vært sentralt for vår utforming og utvikling av oppgaven.

Tusen takk også til vår fantastiske interne veileder Bozena Dorota Hrynyszyn for all god hjelp, støtte og faglig ekspertise.

Vi ønsker også å gi en takk til alle som har bidratt for å gjøre bacheloroppgaven best mulig. Særlig en oppmerksomhet til de som har blitt intervjuet, samt delt informasjon og materiell. Takk til Magnus Berg fra Inaventa Solar, for din genuine interesse, beregninger og formidling av kunnskap om solfangere. Takk til Charly Berthod fra Greenstat Energy AS, for at du tok deg tid til oss og ga innsiktsfull informasjon vedrørende solceller. Vi ønsker også rette en takk til Henning Herfjord fra Autobolig AS og Kristian Stensrud fra Heimdal bolig for innsikt og erfaringsdeling.

Trondheim, 20. mai 2022



Maja K. Rygge



Sigrid Hogstad

Sammendrag

Denne bacheloroppgavens formål er å undersøke forskjellige utbedringer for å oppnå definerte nivåer av energieffektivitet. Disse utbedringene vil legge grunnlaget for å sammenligne nivåenes hensiktsmessighet i sammenheng med kostnad og klimagass. I oppgaven vil det bli tatt utgangspunkt i en katalogbolig fra Norgeshus, med navn Dråpen Moderne. Byggets estetikk og generelle fysikk skal beholdes, og bli tilnærmet den opprinnelige modellen.

Forskjellige programvarer vil bli benyttet for å studere en rekke tiltak og scenarier, og disse resultatene vil bli presentert og kommentert i løpet av oppgaven. Disse scenariene vil danne grunnlaget for konklusjonen, som vil ende i tre omprosjekteringsforslag; med hvert sitt nivå av energieffektivitet. For å oppnå dette vil forskjellige bygningskomponenter bli vurdert, sammen med en betraktning av tekniske anlegg og deres energiproduksjon.

Det er optimalt å beholde dimensjoner og designet for den opprinnelige modellen, og det vil dermed ikke gjøres endringer på dette med mindre det er absolutt nødvendig. Dette vil føre til at omprosjekteringsforslagene i teorien skal bli enkle å implementere, enten ved å innføre spesifikke tiltak eller forslaget i sin helhet. Med denne tilnærmingen vil hvert scenario effektivitet avdekkes, og resultatene for hvert scenario vil presenteres i oppgaven. Dette er gjort med et mål om å synliggjøre fordelene tilknyttet disse utbedringene og hva de betyr for energieffektiviteten, som gir mulighet for å håndplukke de beste tiltakene.

De ulike analysene resulterte i et klart foretrukket nivå av energieffektivitet; Nullenergibygg. Omprosjekteringen til nullenergibygget hadde ikke bare lavt klimagassavtrykk, men også en kort nedbetalingstid for den økonomiske investeringen. Den vil også ha en årlig besparelse på hele 18 268 kr sammenlignet med den opprinnelige modellen. Dette er som følge av kombinasjonen av et redusert oppvarmingsbehov samt implementeringen av tekniske anlegg.

Passivhuset og plusshuset viste andre kvaliteter. Passivhuset halverte oppvarmingsbehovet til den opprinnelige modellen, og ble brukt som en base for de to andre omprosjekteringsforslagene. Dette var også den billigste investeringen rent økonomisk, med den korteste nedbetalingstiden. Plusshuset på sin side var den dyreste av alle forslagene, men kompenserer for klimagassutslippene gjennom hele sitt livsløp, med mer. I tillegg til å kompensere for seg selv så sparer plusshuset miljøet for 50 267 CO₂-ekvivalenter. Plusshuset sin produksjon av overskuddsenergi medfølger også salg av strøm, som vil kunne gi en årlig inntjening og besparelse på 20 488 kr.

Abstract

This thesis is aiming to find different ways of accomplishing energy efficiency to reach the various classifications. The results will be used to assess the different classifications to find which solution will be the most applicable regarding productivity and cost. To execute this project the model house Dråpen Moderne will be used as a base. This model is produced by Norgeshus, and it is desirable that the design will mainly remain the same as the original model.

With the use of various software to examine different measures and scenarios, the results are presented and compared during this thesis. To achieve the different classifications some scenarios will be analyzed. These scenarios will create the framework conditions for the thesis, together with measures that will be considered. This leads to three different proposals suggested, which each one will fulfill different classifications of energy efficiency. To achieve this, several values of different building components will be considered, together with the use of technical installations and their energy production.

It is optimal if the design and general dimensions for the model is kept intact, hence it will be avoided to make changes to this unless completely necessary. This will contribute to making it easier to implement the different project proposal presented in this thesis, either as a complete design or apply some specific components of the proposal. With this approach each scenario will show the benefits isolated for that calculation only. This is aimed to showcase the benefits of different measures for making the building more energy efficient and gives the opportunity to apply the most efficient changes.

The different analyses results in a definite preferred level of energy efficiency; The Zero Energy Building proposal. The Zero Energy building had not only a low impact on climate, but also a short payback period for the economical investment made. It will also after the payback period have a yearly profit of 18 268 NOK compared to the original model. This is due to the combination of implemented energy production and the reduction of energy demand, compared to the original model.

For the Passive house and Plus house proposals both showed other qualities. The passive house was used as a base for the other two proposals and gave a big reduction in the energy demand. This was initially the cheapest investment to begin with, in addition to having the shortest payback period. The plus house on the other hand is more expensive but compensates for all the greenhouse gasses it releases during its lifetime, plus more. In addition, it atones for 50 267 CO₂-equivalents. That corresponds to 26 roundtrip flights from Oslo to New York.

Innhold

Forord.....	I
Sammendrag	II
Abstract.....	III
Figurer.....	VIII
Tabeller	IX
Ordforklaring, forkortelser og definisjoner.....	XI
1 Innledning	1
1.1 Oppgaven	1
1.1.1 Problemdefinering.....	1
1.1.2 Avgrensning og omfang.....	1
1.2 Modellen	2
2 Litteratursøk.....	4
3 Bakgrunnsmateriale	5
3.1 Energieffektivitet	5
3.1.1 Generelt.....	5
3.1.2 PE- og PER-verdier.....	6
3.1.3 Passivhus.....	7
3.1.4 Nullenergibygg	8
3.1.5 Nullutslippsbygg	8
3.1.6 Nullhus.....	9
3.1.7 Plusshus.....	9
3.2 Livsløpsanalyse.....	9
3.2.1 Generelt.....	9
3.2.2 EPD	9
3.3 Økonomi	10
3.3.1 Tilbakebetalingstid.....	10
3.3.2 LCC.....	10
3.3.3 Strømpriser.....	11

3.4 Energi og energieffektivitet i bygninger	11
3.4.1 Klimaskall	11
3.4.2 U-verdi	12
3.4.3 Kuldebro	12
3.4.4 Lekkasjetall	13
3.4.5 Varmetapstall	14
3.5 Klima & miljø	14
3.5.1 Klimaendringer	14
3.5.2 Klimaet i Norge	15
3.5.3 Klimatilpasset bygging	16
3.5.4 Inneklima	16
3.5.5 Sol og dagslys	16
3.5.6 Potensielle miljøbesparelser	17
3.5.7 Etikk klimaendringer	17
3.6 Byggtekniske løsninger	18
3.6.1 Isolasjon	18
3.6.2 Vindu	19
3.7 Tekniske anlegg	19
3.7.1 Vannbåren varme	19
3.7.2 Varmepumpe	20
3.7.3 Solfanger	21
3.7.4 Solceller	22
3.7.5 Balansert ventilasjon	23
3.7.6 Smart-hus	23
4 Programvare	25
4.1 Simien	25
4.2 PHPP	25
5 Metode	26
5.1 Fremgangsmåte	26
5.2 Avgrensninger	27
5.3 Utgangspunkt for simuleringer	27
5.3.1 Passivhuskrav for modellen	27
5.3.2 Tiltak	27
5.3.3 Evaluering og vurderinger for inngangsdata	28

5.3.4 Inngangsdata	30
5.4 Scenarier	31
5.4.1 Rotasjon	33
5.4.2 Isolasjon tak og gulv	33
5.4.3 Isolasjon vegg	34
5.4.4 Vindu.....	35
5.4.5 Energiforsyning.....	37
5.4.6 Energiproduksjon.....	38
5.5 Kostnadsanalyse.....	39
5.5.1 Nye bygningsdeler	39
5.5.2 Tekniske installasjoner.....	40
5.5.3 Strømpris.....	41
5.5.4 Enovatilskudd	42
5.6 Livsløpsanalyse.....	43
5.7 Samlet vurdering og forslag til omprosjektering	44
6 Resultat	45
6.1 Utgangspunkt	45
6.2 Tiltak.....	45
6.3 Scenario.....	46
6.3.1 Rotasjon	46
6.3.2 Isolasjon tak og gulv	46
6.3.3 Isolasjon vegg	47
6.3.4 Vindu.....	47
6.3.5 Energiforsyning.....	49
6.3.6 Energiproduksjon.....	53
6.4 Forslag til omprosjektering	55
6.4.1 Passivhus.....	55
6.4.2 Nullenergibygg	57
6.4.3 Plusshus.....	58
6.5 Kostnadsanalyse.....	60
6.5.1 Passivhus.....	60
6.5.2 Nullenergibygg	61
6.5.3 Plusshus.....	62
6.6 Klimagassregnskap	62

6.6.1	Passivhus.....	63
6.6.2	Nullenergibygg	64
6.6.3	Plusshus.....	65
7	Diskusjon	66
7.1	Scenarioresultat.....	66
7.1.1	Tiltak	66
7.1.2	Rotasjon	67
7.1.3	Isolasjon	67
7.1.4	Vindu.....	68
7.1.5	Varmepumpe.....	71
7.1.6	Solfanger	72
7.1.7	Solceller	72
7.2	PER- og PE-verdier.....	72
7.3	Passivhus.....	74
7.3.1	Internasjonal standard	75
7.4	Nullenergibygg	77
7.5	Plusshus.....	79
7.6	Kostnadsanalyse.....	79
7.6.1	Passivhus.....	81
7.6.2	Nullenergibygg	81
7.6.3	Plusshus.....	81
7.7	Livsløpsanalyse.....	82
7.7.1	Passivhus.....	83
7.7.2	Nullenergibygg	84
7.7.3	Plusshus.....	84
7.8	Feilkilder	84
8	Håndtering av overskuddsenergi.....	87
9	Oppsummering.....	88
9.1	Passivhus.....	89
9.2	Nullenergibygg	91
9.3	Plusshus.....	92
10	Konklusjon.....	94

Referanser	95
Vedlegg	105

Figurer

Figur 1 – Dråpen moderne (Norgeshus, 2021)	2
Figur 2 – Varmebehov, figur 1 fra NS3700 (Standard Norge, 2013)	8
Figur 3 – Vannbåren varme prinsippskisse (Enova, 2022)	20
Figur 4 – Varmepumpens prinsippskisse (EcoSmart ATW Controller, 2022)	20
Figur 5 – Eksempel på systemskisse (Inaventa Solar, 2022)	22
Figur 6 – Solcellens virkemåte (Mjønerud, 2019)	23
Figur 7 – Balansert ventilasjon (Zehnder, 2015)	23
Figur 8 – Fremgangsmåte	32
Figur 9 – Dråpen moderne 1. etasje, vindusreduksjon	37
Figur 10 – Dråpen moderne 2. etasje, vindusreduksjon	37
Figur 11 – Solfangerproduksjon Oslo 10 m ² , graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)	56
Figur 12 – Solfangerproduksjon Trondheim 14 m ² , graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)	59
Figur 13 – Solfangerproduksjon Oslo 13 m ² , graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)	59
Figur 14 – Opprinnelig husmodell sammenlignet med omprosjekteringsforslag til passivhus ..	74
Figur 15 – Energibehov passivhusstandarder	75
Figur 16 – Passivhus internasjonal standard, forslag	76
Figur 17 – Omprosjekteringsforslag passivhus etter NS 3700 sammenlignet med standarden fra Passive House Institute	77
Figur 18 – Opprinnelig husmodell med 20 solcellepanel sammenlignet med omprosjekteringsforslaget til nullenergibygget	78
Figur 19 – Passipedias figurer for energi i bygg (Passipedia, 2022)	78
Figur 20 – Opprinnelig husmodell med 24 solcellepanel sammenlignet med omprosjekteringsforslaget til plusshus	79
Figur 21 – Klimagassregnskap for alle omprosjekteringsforslag	83
Figur 22 – Oppsummering fremgangsmåte og resultat	88
Figur 23 – Klimagass for alle omprosjekteringsforslag	93

Tabeller

Tabell 1 – TEK 17 – Paragraf §14-2, §14-3 og §14-4 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)	5
Tabell 2 – TEK 17 – Energiltak §14-2 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).....	6
Tabell 3 – Passivhus boligbygning krav (Standard Norge, 2013)	7
Tabell 4 – Passivhus boligbygning – krav til høyeste beregnede netto energibehov til oppvarming (Standard Norge, 2013).....	8
Tabell 5 – U-verdi bygningsdeler i henhold til TEK 17 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017) .	18
Tabell 6 – Energiltak bygningsdel (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)	19
Tabell 7 – Typiske passivhusverdier bygningsdeler (Standard Norge, 2013).....	19
Tabell 8 – Inngangsdata simuleringer.....	30
Tabell 9 – Scenario	31
Tabell 10 – Kuldebroer vindu med isolert karm verdier (Byggforsk, 2015).....	36
Tabell 11 – Økonomisk utgangspunkt	40
Tabell 12 – Prisestimat for tekniske anlegg.....	41
Tabell 13 – Midt-Norge; Historiske spotpriser og strømpriser.....	41
Tabell 14 – Enovatilskudd	42
Tabell 15 – Klimagassregnskap utgangspunkt	43
Tabell 16 – Resultat utgangspunkt.....	45
Tabell 17 – Resultat tiltak	45
Tabell 18 – Resultat rotasjon	46
Tabell 19 – Resultat isolering av gulv og tak	46
Tabell 20 – Resultat isolering av fasade	47
Tabell 21 – Resultat vindusinnsetting.....	47
Tabell 22 – Resultat vindusinnsetting, inntrukken foring.....	48
Tabell 23 – Resultat vindusreduksjon.....	48
Tabell 24 – Resultat utgangspunkt.....	49
Tabell 25 – Resultat varmepumpe Trondheim.....	49
Tabell 26 – Resultat varmepumpe Oslo.....	50
Tabell 27 – Resultat varmepumpe	50
Tabell 28 – Inventas solfangertilbud Trondheim	51
Tabell 29 – Inventas solfangertilbud Oslo	51
Tabell 30 – Resultat solfanger Trondheim.....	51
Tabell 31 – Resultat solfanger Oslo.....	52
Tabell 32 – Andel fornybar og ikke-fornybar energi solfanger	52

Tabell 33 – Bidrag varmepumpe og solfanger Trondheim.....	52
Tabell 34 – Resultat varmepumpe og solfanger Trondheim.....	52
Tabell 35 – Bidrag varmepumpe og solfanger Oslo	53
Tabell 36 – Resultat varmepumpe og solfanger Oslo.....	53
Tabell 37 – Solceller produksjon	53
Tabell 38 – Energibalanse.....	54
Tabell 39 – Omprosjektering Passivhus	55
Tabell 40 – Omprosjektering Nullenergibygge	57
Tabell 41 – Omprosjektering Plusshus	58
Tabell 42 – Passivhusets merkostnad og nedbetalingstid.....	60
Tabell 43 – Nullenergibyggets merkostnad og nedbetalingstid.....	61
Tabell 44 – Plusshusets merkostnad og nedbetalingstid.....	62
Tabell 45 – Klimagassavtrykk Passivhus	63
Tabell 46 – Klimagassavtrykk Nullenergibygge	64
Tabell 47 – Klimagassavtrykk Plusshus	65
Tabell 48 – korrigerte oppvarmingsbehov	69
Tabell 49 – PE- og PER-verdier Trondheim.....	72
Tabell 50 – Resultat med 50 mm Kooltherm K12.....	75
Tabell 51 – Kostnader oppsummering	80
Tabell 52 – Klimagassregnskap oppsummering	83
Tabell 53 – Passivhus energiregnskap	90
Tabell 54 – Nullenergibygge energiregnskap.....	91
Tabell 55 – Plusshus energiregnskap	92

Ordforklaring, forkortelser og definisjoner

BRA	Bruksareal, arealet innenfor omsluttende vegger [m ²]
BYA	Bebygd areal, bygningens fotavtrykk på tomta
CO ₂ -ekvivalent	Effekten av gitt mengde klimautslipp har på global oppvarming omgjort til en felles faktor, regnet etter Global Warming Potential, GWP
EPD	Environmental Product Declaration Miljødeklarasjon som angir et produkts miljøprofil
ISO-standard	Internasjonale standarder utgitt fra <i>International Organization for Standardization</i> Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen
Lekkasjetall	Angir hvor mange ganger bygningens luftvolum skiftes ut i timen ved et trykk på 50 Pa. [h ⁻¹]
LCA	Life Cycle Assessment Livssyklusanalyse
Netto energibehov	Energibehovet til et bygg, ikke tatt hensyn til tap i energikjeden og virkningsgrad på systemet
Normalisert kuldebroverdi	Summen av varmetap fra alle kuldebroer delt på oppvarmet BRA ψ [W/(m ² K)]
NS 3700	Norsk standard med kriterier for passiv- og lavenergihus på boligbygninger
PE-verdi	Dimensjonerende behov for ikke-fornybar energiproduksjon som inkluderer tap i definerte energiforsyningsmetoder.
PER-verdi	Dimensjonerende behov for fornybar energiproduksjon som inkluderer tap i definerte energiforsyningsmetoder.
PCR	Product Category Rules Produktkategoriregler
PHPP	Passive House Planning Package Program for simulering av energibehov, inneklime og kontroll opp mot passivhusstandard
SFP-faktor	Specific fan power Spesifikk vifteeffekt, beskriver effekten [kW] som er nødvendig for å flytte en kubikkmeter luft i sekundet [kW/(m ³ /s)]
Simien	Programvare for simulering av energibehov, inneklime og kontroll opp mot Norske standarder

TEK	Byggteknisk forskrift
U-verdi	Angir bygningsdelens varmegjennomgang og isolerende evne [W/(m ² K)]
Varmekonduktivitet	Beskriver materialegenskaper for varmeledning Symbol λ [W/(mK)]
Varmetapstall	Angir mengde varmetap gjennom ventilasjonen, luftlekkasjer, tak, vegger, gulv, vinduer og dører [W/(m ² K)]
ZEB	Zero Energy Building Nullenergibygg, samme forkortelse brukes også for <i>Zero Emission Building</i>
Årsmiddeltemperatur	Angir gjennomsnittet av månedsmiddeltemperaturene for ett gitt sted Symbol θ_{ym} [°C]

1 Innledning

I dette kapittelet introduseres oppgavens formål og problemdefinering. Benyttet standard-modell for analysen samt avgrensinger og omfang presenteres.

1.1 Oppgaven

Hensikten med oppgaven er å bidra til morgendagens løsninger. Det er ønskelig å se på hvor lønnsomt det er å strekke seg etter bedre energieffektivitet i småhus, samt inspirere andre i bransjen til å undersøke de samme mulighetene. I samarbeid med Norgeshus Midt-Norge skal effekten av ulike energibesparende tiltak analyseres gjennom en omprosjektering av Dråpen Moderne, et av Norgeshus sine standard husmodeller. Tiltakene skal også vurderes opp imot økonomisk lønnsomhet og følgende klimaavtrykk.

Prosjektets mål vil være å berike Norgeshus Midt-Norge med ytterligere kunnskap om hvilke muligheter som finnes. Dette vil gi Norgeshus et fortrinn med tanke på hva de kan tilby sine kunder, og forhåpentligvis gi bedre grunnlag for å kunne håndtere nyere forskrifter mer effektivt. Noen av våre tiltak vil ha stor overføringsverdi og kan mest sannsynlig også implementeres i andre eksisterende katalogboliger.

Programvarene PHPP, SIMIEN og Excel benyttes til simulering og undersøkelse av de forskjellige tiltakene og scenarioene. Resultatene fremlegges i oppgaven og sammenliknes fortløpende. Videre kalkulasjoner baseres på den fortløpende sammenlikningen, noe som vil ende i tre ulike forslag til omprosjektering som skal oppfylle tre ulike nivåer av energieffektivitet.

1.1.1 Problemdefinering

Hvor hensiktsmessig er det å bygge småhus som passivhus, nullenergibygge og/eller plusshus?

1.1.2 Avgrensning og omfang

I denne bacheloroppgaven er det noen begrensninger, som setter rammene for oppgavens omfang og detaljorientering. Den største og mest begrensende faktoren er tilgjengelig tid. Oppgavens omfang og kompleksitet begrenses stort da datainnhenting, drøfting og konklusjon tar en stor del av tiden tilgjengelig. Dette gjør at bacheloren må begrenses til et gjennomførbart prosjekt.

Oppgaven tar økonomiske og miljømessige hensyn i beslutningsprosessen, mens de ulike løsningsforslagene utelates for omstendelig hensyn til brannsikkerhet, fukttransport, samt andre arkitektoniske hensyn. Så langt det lar seg gjøre skal bygningskroppen beholde bygningsfysikk lik som standardmodellen.

Det er ingen økonomiske midler til disposisjon, og det mottas ingen godtgjørelse fra Norgeshus. Av utstyr til rådighet er det personlige datamaskiner med tilgang til de programmene som NTNU-studenter har tilgang til, samt relevante lærebøker fra bachelorens inkluderte programfag.

Oppgavens analysegrunnlag avgrenses til kun én standardmodell for omprosjektering, selv om det for maksimal effekt ville vært hensiktsmessig å sammenlikne to eller flere ulike standardmodeller fra Norgeshus. Analysen begrenses til tre ulike nivåer for energieffektive bygninger; passivhus, nullenergibygge og plussus. Passivhus og nullenergibygge er nivåer med allerede definerte energikrav, mens hva som defineres som et plussus finnes det ingen standard eller felles enighet om i bransjen. Plussus i oppgaven skal defineres i følgende kapitler med energikrav i likhet med de andre nivåene.

1.2 Modellen



Figur 1 – Dråpen moderne (Norgeshus, 2021)

Som grunnlag for analysene og utbedringene vil det bli tatt for seg modellen med navn Dråpen Moderne, som er en av Norgeshus sine funkisboliger. Som de fleste funkishus, har også Dråpen kjennetegn som store vindusflater og et moderne flatt tak.

Bygget har en grunnflate på 12 m i lengden og 8,4 m i bredden. Den har ett bruksareal på 140 m², fordelt på to etasjer. Det kompakte taket består av 350mm isolasjon, og taket på balkongen har 300 mm med isolasjon. Ytterveggene er bygd opp av 36 mm x 148 mm stenderverk med 200

mm isolasjon og asfaltplater. Fundamentet består av ringmurselement med gulv på grunn som har 350 mm isolasjon og 80 mm betong.

Boligens 3 soverom er plassert i andre etasje, sammen med ett bad samt en ekstra stue med utgang til terrasse. Resten av oppholdsrommene er på grunnplan. Der er det også balkongdør som fører ut til platting.

2 Litteratursøk

Til bruk i oppgaven har litteraturen i all hovedsak vært basert på Byggforsk (SINTEF), nettsøk, samt annen informasjonsinnhenting. Annen litteratur og tidligere bachelor- og masteroppgaver er også benyttet.

Direktoratet for byggkvalitet sin byggt teknisk forskrift (TEK17) og Norsk standard er brukt for å levere bygg som tilfredsstillende norske krav innunder de standardene som er ønsket. Det er også benyttet krav og veiledninger fra Passive House Institute, da det er vurdert å kunne være positivt for oppgaven. Passive House Institute sin sertifisering og programvare vil kunne ha en fremtidig verdi for Norgeshus, siden dette vil kunne være en veiledning mot fremtidige krav. De tilbyr også sertifisering, noe som potensielt lager omdømme og kundebase.

Kommunikasjonen med Norgeshus og informasjonsinnhenting av deres materiell har i hovedsak vært basert på fysiske og digitale møter, e-post korrespondanse, samt deling av filer over google drive. Deres samarbeidspartnere og leverandører har også bidratt med konkrete priser, beregninger og kunnskap via e-post og møter.

3 Bakgrunnsmateriale

Grunnleggende info og teori som er relevant for oppgaven presenteres i dette kapittelet.

3.1 Energieffektivitet

3.1.1 Generelt

I bygg er det viktig å utnytte levert energi, og minimere unødvendig tap. Dette innebærer å bruke mindre energi på oppvarming og kjøling, samt minimere varmetap i bygningskroppen. Dette gjelder bygningens samlede energibehov, som vil si gjennom hele livsløpet, fra produksjon av materialer, transport og helt frem til bygget rives. Ut over dette bør fornybare energikilder etterstrebes.

På global basis har en analyse fra IEA, Det Internasjonale Energibyrådet, vist at byggebransjen står for en stor andel utslipp av CO₂. Denne analysen ble gjort i 2017, og tallene viser at bransjen står for hele 39% av utslippene, der dette tallet inkluderer alt fra produksjon, transport, og byggenes livsløp (International Energy Agency, 2017).

Basert på de globale tallene er det ingen tvil om at byggebransjen burde ta større miljøansvar og stramme inn krav til blant annet energieffektivitet. Den dag i dag er det kun minimumskrav som stilles i Byggeteknisk forskrift TEK 17, basert på energirammer for en rekke kategori bygg, samt energitiltak for boligbygning (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Kravene er som følger:

Tabell 1 – TEK 17 – Paragraf §14-2, §14-3 og §14-4 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Energirammer § 14-2

<i>Småhus, Totalt netto energibehov</i>	100 + 1600/m ² oppvarmet BRA [kWh/m ² oppvarmet BRA per år]
---	--

Minimumskrav § 14-3

<i>U-verdi Yttervegg</i>	≤ 0,22 W/(m ² K)
<i>U-verdi Tak</i>	≤ 0,18 W/(m ² K)
<i>U-verdi Gulv</i>	≤ 0,18 W/(m ² K)
<i>U-verdi Vinduer og dører</i>	≤ 1,20 W/(m ² K)
<i>Lekkasjetall (Ved 50 Pa trykkforskjell)</i>	≤ 1,5

Energiforsyning § 14-4

Ikke tillat å installere varmeinstallasjon for fossilt brensel.

Boenhet i småhus skal oppføres med skorstein. Kravet gjelder ikke dersom boenheten oppføres med vannbåren varme, eller

årlig netto energibehov til oppvarming ikke overstiger kravet til passivhus, beregnet etter Norsk Standard NS 3700:2013 Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger.

I paragraf §14-2 er det samtidig noen punkter med tiltak som kan følges som resulterer i at kravene til energieffektivitet blir oppfylt. Dersom varmetapstallet ikke øker og kravene i §14-3 oppfylles kan listen fravikes.

Punktene er som følger:

Tabell 2 – TEK 17 – Energiltak §14-2 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Energiltak § 14-2

<i>U-verdi Yttervegg</i>	$\leq 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
<i>U-verdi Tak</i>	$\leq 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
<i>U-verdi Gulv</i>	$\leq 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
<i>U-verdi Vinduer og dører</i>	$\leq 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
<i>Andel vindus- og dørareal av oppvarmet BRA</i>	$\leq 25\%$
<i>Ventilasjon, varmegjenvinning</i>	$\geq 80\%$
<i>SFP-faktor</i>	$\leq 1,5 \text{ kW}(\text{m}^3/\text{S})$
<i>Lekkasjetall (Ved 50 Pa trykkforskjell)</i>	$\leq 0,6$
<i>Kuldebroverdi</i>	$\leq 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

3.1.2 PE- og PER-verdier

Primærenergibehov, Primary Energy Value, eller PE-verdi, er en verdi som tar høyde for energitap ved energiproduksjon fra ikke-fornybare energikilder. Et netto energibehov blir justert i henhold til hvor mye energi som går tapt i produksjon, transport, lagring og en eventuell omgjøring. Justeringen resulterer i det som kalles en PE-verdi. Disse justeringene gjøres ved såkalte PE-faktorer som varierer ut ifra energikilde og geografisk lokasjon. En PE-faktor på 1,5 betyr for eksempel at en må beregne å produsere 50% mer energi enn det man ønsker å få levert. PE-verdien har som formål å bidra til mindre klimagassutslipp, ved at fullstendig energiforbruk synliggjøres ved bruk av ikke-miljøvennlige energikilder (Passipedia, 2022).

På samme måte fungerer en Primary Energy Renewable Value, eller PER-verdi. En PER-verdi tar i motsetning til PE-verdien høyde for at så mye som mulig av produksjonen skjer ved hjelp av fornybare energikilder. Fornybare energikilder er mye mer effektive og har derfor mye lavere PER-faktorer enn PE-verdien for tilsvarende energikilde. For eksempel vil direkte elektrisitet i Norge ha en PER-faktor på 1,45 og en PE-faktor på 2,6. En solfanger betegnes som helt fornybar og produserer mye mer energi enn den krever, noe som resulterer i en PER-verdi på 0,46 og en PE-faktor på 0. Hvilke energikilder som har hvilke PE- og PER-faktorer finnes det ikke en

offisiell standard for i Norge (Schild, et al., 2010). Ofte brukes derfor det tyske regelverket for energi i bygninger.

Sammen med PE-verdien, kan det vurderes hvor mye fornybar energiproduksjon eller ikke-fornybar energiproduksjon som må til for å møte et energibehov. Internasjonalt betegnes dette behovet ofte som netto oppvarmingsbehov.

PE- og PER-verdier justeres i mange energisimuleringsprogram etter oppvarmingsbehovet og for de ulike energiforsyningskildene. For eksempel vil implementeringen av en energieffektiv forsyning som erstatter andre mindre energieffektive energikilder, være med på å påvirke både PE- og PER-verdiene til bygningen til et lavere nivå. Også et redusert energibehov på grunn av en omprosjektering eller oppgradering av huset vil redusere PE- og PER-verdien.

Energiproduksjon fra for eksempel solceller og solfangere omgjøres gjerne til en egen PER-verdi. Sammen med PE- og PER-verdiene for energiforsyning skal gir dette et helhetlig bilde på hvor mye det totalt trenger å gå med av ekstra energi for å levere eller dekke energibehovet.

3.1.3 Passivhus

Dette konseptet er utviklet i Tyskland, og består av bygninger med lavt energibehov. Navnet kommer fra det faktum at det brukes passive tiltak for å minimere varmetap ved å ha et tett og godt isolert bygningsskall. Dette gjør at byggene trenger mindre bruk av energi til oppvarming, sammenlignet med hus bygd etter TEK 17. For å kunne regnes som et passivhus i Norge må kriteriene i NS 3700 (for boligbygninger) være oppfylt (Standard Norge, 2013).

Kravene fra NS 3700 er som følger:

Tabell 3 – Passivhus boligbygning krav (Standard Norge, 2013)

Varmetapstall	
Hus < 100 m ²	≤ 0,53 W/(m ² K)
Hus mellom 100 og 250 m ²	≤ 0,48 W/(m ² K)
Hus > 250 m ²	≤ 0,43 W/(m ² K)
Oppvarmingsbehov	
<i>Se Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.</i>	
Energiforsyning	
<i>Beregnet mengde levert elektrisk og fossil energi skal være mindre enn totalt netto energibehov fratrukket 50% av netto energibehov til varmtvann.</i>	
Komponenter og bygningsdeler minstekrav	
U-verdi dør og vindu	≤ 0,80 W/(m ² K)
Kuldebroverdi	≤ 0,03 W/(m ² K)
Lekkasjetall (Ved 50 Pa)	≤ 0,6

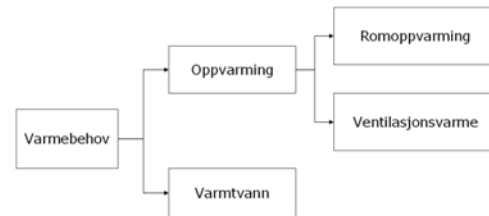
Ventilasjon

Varmegjenvinning
SFP-faktor

≥ 80%

≤ 1,5 kW(m³/S)

Varmebehov defineres som en felles energipost for oppvarming og varmtvann i passivhusstandarden NS3700:2013 (Standard Norge, 2013). En illustrerende skisse fra passivhusstandarden er gjengitt som Figur 2.



Figur 2 – Varmebehov, figur 1 fra NS3700 (Standard Norge, 2013)

Tabell 4 – Passivhus boligbygning – krav til høyeste beregnede netto energibehov til oppvarming (Standard Norge, 2013)

Årsmiddeltemperatur θ_{ym}	Høyeste beregnede netto energibehov til oppvarming kWh/(m ² år)	
	Boligbygning der $A < 250 \text{ m}^2$	Boligbygning der $A \geq 250 \text{ m}^2$
≥ 6.3 °C	$15 + 5,4 * \frac{(250 - A)}{100}$	15
≤ 6.3 °C	$15 + 5,4 \frac{(250 - A)}{100} + \left(2,1 + 0,59 * \frac{(250 - A)}{100} \right) (6,3 - \theta_{ym})$	$15 + 2,1 (6,3 - \theta_{ym})$

3.1.4 Nullenergibygg

For nullenergibygg skal bygningen kunne produsere nok fornybar energi til å overskride eller nøytralisere sitt årlige energibehov. Per dags dato er det ingen standarder for denne typen bygg, og begrepet dekker både netto nullenergibygg og nesten nullenergibygg. På engelsk er forkortelsen ZEB veldig utbredt, og denne dekker både nullenergibygg (Zero Energy Building) og nullutslippsbygg (Zero Emission Building). I denne oppgaven er det valgt å definere Nullenergibygg til at det skal produsere nok fornybar energi til å dekke årlig netto energibehov (Byggforsk, 2022).

3.1.5 Nullutslippsbygg

For dette begrepet er bygningen nødt til å kompensere for alt utslippet som blir gjort gjennom hele byggets livsløp. Det finnes ingen standarder for nullutslippsbygg i Norge, men ZEB

forskningscenter har delt inn forskjellige nivå, som defineres av hvilke av byggets faser som inngår i beregningene. Her er det også flere ambisjonsnivåer. Det laveste nivået er (ZEB-O), og innebærer at den fornybare energiproduksjonen kompenserer for byggets energi i bruksfasen (Byggforsk, 2022). Siden ett nullutslippsbygg produserer nok fornybar energi for å dekke eget utslipp, vil med andre ord et nullutslippsbygg regnes som ett plusshus. I denne oppgaven er det valgt å definere Nullutslippsbygg til at det skal produsere nok fornybar energi for å kompensere for klimagassutslipp.

3.1.6 Nullhus

Nullhus er når bygget er både et netto nullenergibygg og et netto nullutslippsbygg.

3.1.7 Plusshus

For denne kategorien av bygninger skal energien brukt ved hele byggets levetid kompenseres for med produksjon av fornybar energi. Altså all energibruk ved produksjon av materialer, transport, drift og rivning. denne oppgaven er det valgt å gjøre en forenkling ved å definere plusshus til at det skal produsere nok energi til å overskride energibehovet netto årlig.

3.2 Livsløpsanalyse

3.2.1 Generelt

For å finne de mest miljøvennlige alternativene må de ulike produktene sammenlignes. Basert på målbare miljøbelastninger, kategorisert på en hensiktsmessig og lettfattelig måte, skal en veldokumentert avgjørelse tas. Slike velbegrunnede avgjørelser vil bli viktigere i fremtiden, i takt med strengere krav og bedre forskning.

Å måle miljøbelastningene til et enkelt produkt er en omfattende prosess, og for mer sammensatte produkter, blir målingen desto mer kompleks. Dette er fordi gode sammenlignbare beregninger må bestå av miljøbelastningene i hele livsløpet til alle produktets komponenter. En slik analyse, som tar for seg miljømessige konsekvenser i hele produktets levetid, fra uttak av råmaterialer til kassering og resirkulering ved endt levetid, kalles en livsløpsanalyse. En slik analyse er et viktig verktøy i veien videre med å begrense miljømessige konsekvenser ned til et minimalt nivå.

3.2.2 EPD

En enkel måte å vurdere miljøprestasjonen til produktet for en tredjepart på, er gjennom en EPD (Environmental Product Declaration). En EPD er et standardisert, verifisert og registrert dokument som har som hensikt å presentere resultatene fra LCA-analysen på en kortfattet,

sammenlignbar og transparent måte (The Norwegian EPD Foundation, 2022). Hvilke variabelkategorier som fremkommer på en EPD er bestemt gjennom produktgruppens regler, PCR (Product Category Rules). En PCR er basert på internasjonale standarder og definerer kravene til en EPD. På den måten oppsummeres miljøprofilen i en EDP på en relevant måte og sikrer at viktige variabler kommer tydelig frem. Et standardisert dokumentoppsett vil også gjøre det lett å orientere seg i dokumentet. En produktprodusents EPD sendes i Norge inn til EPD Norge, der de uavhengig verifiserer dokumentet og publiserer på sine nettsider. Tredjeparter vil dermed kunne være sikker på at EPD-dokumentet holder en viss kvalitet.

3.3 Økonomi

3.3.1 Tilbakebetalingstid

Tilbakebetalingstid er et mål på hvor lang tid det tar før en har tjent inn investeringen. Tilbakebetalingstiden vil være et interessant evalueringspunkt for relativt like investeringsalternativer, og kan beskrives ved følgende formel

$$N_0 = \frac{k_0}{B} [\text{år}]$$

der:

N_0 = tilbakebetalingstid [år]

B = årlig inntjening [kr]

k_0 = investeringskostnad, grunninvestering [kr]

3.3.2 LCC

Livssyklus kostnader, eller LCC, er et begrep med tett tilknytning til kostnadsanalyser for bygg. Livssyklus kostnader oppgis som årskostnader og betegnes som summen av kapital- og såkalte FDVU-kostnader per år. FDVU-kostnader står for årskostnader som trengs til forvaltninger, drift, vedlikehold og utvikling. Forholdet mellom livssyklus kostnader, årlige kostnader, levetidskostnad og årskostnader beskrives i standarden for livssyklus kostnader for bygg, NS 3454. LCC-standardens inneholder prinsipper og klassifikasjoner som danner utgangspunktet for beregningen av byggets livssyklus kostnader.

Resultatet av en LCC-analyse kan brukes til å vurdere alternative investeringer og er for offentlige byggeiere og byggherrer et pålagt vurderingsgrunnlag ved anskaffelser (Anskaffelser.no, 2019).

3.3.3 Strømpriser

Strømprisen for husholdninger i Norge varierer stort. Dette kommer av at mengden kraft som produseres påvirker kraftprisen. Den totale strømprisen er summen av kraftprisen, netteiers nettleie og politisk bestemte avgifter.

Norge er delt inn i fem strømregioner, og Midt- og Nord-Norge har vanligvis lavere strømpriser. Det siste året har den gjennomsnittlige strømprisen økt kraftig. Sammenlignet med fjoråret har strømprisen i strømregionene i Sør-Norge en gjennomsnittlig økning på 297%. Midt-Norge har en økning på 266% mens Nord-Norge har gjennomsnittlig 7% billigere strømpris enn i fjor (VG, 2022).

Energi Norge peker på fire viktige grunner for at prisene ble så mye høyere i 2021 sammenlignet med 2020. I 2021 ble det i Norge uvanlig lite nedbør, en kald vinter og opprettet to nye kabler til Europa. På kontinentet var det i tillegg ekstreme energipriser. Alle disse faktorene presset strømprisen til rekordhøye nivåer, men det menes likevel at prisøkningen kun er en midlertidig priskrise (Energi Norge, 2022). Regjeringen omtaler også situasjonen som en strømkrise, og kom i desember 2021 med en støtteordning som skulle hjelpe husholdninger med strømregningen (Regjeringen.no, 2021). Nettavisen Økonomi mener, basert på en ny prognose fra Gudbrandsdal Energi, at en likevel må regne med spotpriser over 70 øre ut året, noe som vil føre til en strømpris på over 1,5 kr/kWh i lang tid fremover (Blaker, 2022).

Det er utfordrende å forutsi strømprisen de kommende årene. Direktør for Norges vassdrags- og energidirektorat skriver i en kronikk for Aftenposten at strømprisene i Norge vil opprettholdes på dagens høye nivå så lenge gass- og CO₂-prisene forblir høye. Det er gode argumenter i klimapolitikken for at fossile energikilder skal forbli dyre.

3.4 Energi og energieffektivitet i bygninger

3.4.1 Klimaskall

Et klimaskall, eller en klimaskjerm er enkelt forklart en beskrivelse av den passive og kontinuerlige overgangen mellom inneklima og uteklima i en bygning. Klimaskallets hovedformål er å beskytte de bærende konstruksjonene for ytre påvirkninger, men hvor effektivt klimaskallet er har mye å si for inneklimaet og tilpasningene i henhold til dette. Dersom denne overgangen, sammen med andre tekniske løsningene for bygget, gir nåværende og fremtidig tilfredsstillende inneklima, kan en si at en har oppnådd et vellykket og fungerende klimaskall.

Klimaskallet strekker seg som regel kontinuerlig gjennom alle vegger, tak og gulv mot grunn eller kald kjeller som en ikke ønsker å dimensjonere for ytre påvirkninger. Ofte er dampsperre og vindsperre karakteristiske deler av klimaskallet, men klimaskallet kan bestå av ulike materialer med unike egenskaper som imøtekommer en tilstrekkelig effektivitet. Desto bedre passiv effektivitet et klimaskall har, desto lettere og billigere vil det være å oppnå et godt inneklima. Viktige indikatorer for klimaskallets effektivitet er gitt ved standardiserte mål slik som U-verdi, normert kuldebroverdi og lekkasjetall.

3.4.2 U-verdi

Et mål på hvor lett en bygningsdel slipper gjennom varme er en standardisert koeffisient kalt varmegjennomgangskoeffisient eller U-verdi. U-verdien sier noe om bygningsdelens varmeisolerende evne og er en av de mest brukte koeffisientene i byggeindustrien. U-verdi gir et tall på hvor mye varme som går gjennom per m² bygningsdel per tidsenhet og per grad temperaturforskjell mellom hver side av bygningsdelen. Ulike bygningsdeler har ulike beregningsmetoder og minimumskrav beskrevet i ulike standarder. Dersom det eventuelt er nødvendig, blir normale uregelmessigheter tatt hensyn til ved hjelp av et påslag. Følgende matematisk formel benyttes

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} + \Delta U \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

der:

R_{tot} er det totale varmetapet per m² bygningsdel per tidsenhet og per grad temperaturforskjell mellom hver side av bygningsdelen.

ΔU er det korrigerende påslaget.

Ofte brukes standardiserte U-verdier for beregning av energibehov, noe som i mange tilfeller vil være lønnsomt, men som i et klimavariabelt land som Norge, etterlater dette et stort forbedringspotensial i energi-optimalisering.

3.4.3 Kuldebro

Områder på en bygning som er dårligere varmeisolert enn resten av bygningen fører til ekstra varmetap og kalde overflater. Slike områder kalles kuldebroer og er et ugunstig element i en bygning av mange årsaker.

Kuldebroer oppstår ofte der forskjellige bygningselementer med ulik isoleringsevne er ugunstig plassert i forhold til hverandre eller har et uheldig tykkelsesforhold i en eller flere bygningsdeler.

Å finne en verdi for det varmetapet som oppstår grunnet kuldebroer er en viktig del av energikartleggingen av en bygning. For å sammenligne og optimalisere slike varmetap benyttes en standardisert metode som gir en såkalt normalisert kuldebroverdi. Den normaliserte kuldebroverdien beregnes ved å dele summen av det totale varmetapet som skyldes kuldebroer, på bygningens oppvarmede gulvareal. Det totale varmetapet betegnes matematisk som summen av varmetapet fra to ulike typer kuldebroer – den lineære kuldebroen og punktkuldebroer. Lineær kuldebro er den formen for kuldebro som oppstår i klimaskallet der to ulike bygningsdeler møtes, eller der klimaskallet brytes fullstendig eller delvis. Denne formen for kuldebro står som regel for den største andelen av varmetapet ettersom lengden av kuldebroene er en viktig faktor for kuldebroverdien av disse bidragene. Punktkuldebroer defineres til alle kuldebroer der en bygningsdel bryter klimaskallet i liten utstrekning og til tredimensjonale hjørner der tre bygningsdeler møtes i klimaskjermen. Den lille utstrekningen gjør betydningen av kuldebroenes lengde intetsigende.

Den normaliserte kuldebroen uttrykkes derfor følgende matematisk

$$\Psi = \frac{\sum_i \Psi_i * L_i + \sum_j X_j}{A_{fl}} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

der:

Ψ_i er lineær kuldebroverdi [W/(mK)]

X_j er punktkuldebroverdi [W/K]

L_i er lengden på kuldebro [m]

A_{fl} er oppvarmet bruksareal for bygningen [m²]

Kravene for kuldebroer er:

TEK 17 $\leq 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$

NS3700 $\leq 0,03 \text{ W/m}^2\text{K}$

3.4.4 Lekkasjetall

Dersom det oppstår en forskjell i lufttrykket mellom innsiden og utsiden av bygget vil en luftstrøm passere gjennom utettheter i klimaskallet. Ved undertrykk i bygget vil luft strømme utenfra og inn i bygget, mens luften vil strømme ut ved overtrykk. Trykkforskjellen defineres Δp og følger proporsjonalt med temperaturforskjellen mellom inne og ute samt høydeforskjellen fra nøytralsonen. Trykkforskjellen beregnes ved formelen

$$\Delta p = 0,04 * (\theta_i - \theta_u) * \Delta h \text{ [Pa]}$$

der:

θ_i er temperatur innendørs [$^{\circ}\text{K}/^{\circ}\text{C}$]

θ_u er temperatur utendørs [$^{\circ}\text{K}/^{\circ}\text{C}$]

Δh er høydeforskjellen fra nøytralsonen [m]

Denne luftstrømmen er ikke gunstig med tanke på energieffektivitet da mye energi kan forsvinne ut gjennom utettheter når det er større forskjell på temperatur ute og inne, slik det ofte er på vinterne her i Norge.

Ifølge TEK 17 stilles det krav om lufttetthet, og et lekkasjetall på maks $1,5 \text{ h}^{-1}$. Lekkasjetallet beregnes ut ifra antall luftvekslinger per time målt ved en trykkforskjell på 50 Pa, og betegnes ofte som n_{50} i beregninger.

3.4.5 Varmetapstall

Varmetapstallet, H'' , er definert som varmetransportkoeffisienten, H , dividert på oppvarmet BRA (m^2). Varmetransportkoeffisienten er summen av varmetap på grunn av transmisjon, infiltrasjon og ventilasjon og kan beregnes ved følgende formel

$$H = H_D + H_U + H_g + H_v + H_{inf} \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

der:

H_D er direkte transmisjonsvarmetap til det fri

H_U er transmisjonsvarmetap til uoppvarmede soner

H_g er varmetap mot grunnen

H_v er ventilasjonsvarmetap

H_{inf} er infiltrasjonsvarmetap

Følgende kan varmetapstallet beskrives ved følgende formel

$$H'' = \frac{H}{A_{fl}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Varmetapstallet må være $0,48 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ for passivhus.

3.5 Klima & miljø

3.5.1 Klimaendringer

Gjennomsnittstemperaturen på jorda stiger, havet stiger og blir surere og mer ekstremvær er i vente. Det er ikke lenger noen tvil om at klimaet er i endring fordi menneskelig utslipp bidrar til en høyere klimagass-konsentrasjon i atmosfæren enn naturlig (FN-sambandet, 2021). I 2020 var

det rekordår i temperatur, da var den 2,4 grader over normalen mellom 1961-1990 (Miljødirektoratet, 2021).

Klimaendringer vil fortsette i årene som kommer, og det er kun et spørsmål om tid før klimaendringene blir umulige å håndtere dersom utslippene ikke kommer under kontroll (United Nations, 2019). I internasjonale klimaforhandlinger og Parisavtalen er det definert konkrete mål som skal bidra til at dette ikke skjer. Selv om formuleringen har fått kritikk, ble det for første gang i november inkludert i avtalen fra FNs klimatoppmøte at land burde fase ned fossilindustriens subsidier. Dersom det på nasjonalt plan ønskes å bli et lavutslippssamfunn innen 2050 må energikrav til nye og eksisterende bygninger stå i samsvar. Gjeldende forskrifter har store forbedringspotensialer når det kommer til omfang og konkretisering av energikrav. I tillegg så finnes det enda lite forskning på miljøbesparende tiltak. Likevel peker FNs klimapanel på forbedringer i bygninger og infrastruktur som én av tre store konkrete tiltak for å kutte klimagassutslipp (FN, 2021).

3.5.2 Klimaet i Norge

Klimavariasjonene i Norge er store, både årlig og geografisk. Fastlandet i Norge har generelt sett temperert klima, men i fjellet og langs kysten av Finnmark og på Svalbard er det polart klima. Innenfor det tempererte klimaet i Norge skilles det også på varm- og kaldtempererte vintre etter Köppens klimaklassifikasjon, C- og D-klima (Dannevig & Harstveit, 2021). Langs hele kysten fra Oslofjorden til Troms, der det er milde vintre (C-klima), ligger temperaturen i årets kaldeste måned mellom +18°C og -3°C. Innlandet, som har et kaldtemperert klima (D-klima), har en temperatur i årets kaldeste måned på under -3°C og over +10°C i den varmeste måneden (Mamen, 2021).

På en måte er Norge heldige med klimaet sitt. Generelt er fastlands-Norge mildere enn den nordlige beliggenheten skulle tilsi. Østlandet og Finnmarksvidda har også et klima med langt mer kontinentale preg enn det avstanden til kysten skulle tilsi. Dette skyldes i hovedsak geografiske årsaker som at Norge ligger gunstig til når det kommer til varmetransporterende havstrømmer og vind samt at høye fjell beskytter ellers utsatte områder (Dannevig & Harstveit, 2021).

Det har mye å si hvilket klima som er aktuelt for plassen huset skal bygges. Det vil blant annet ha betydning for bygningens orientering, material-bruk, utforming, tekniske løsninger og klimatilpasning. For et klimavariert land som Norge, vil altså løsningene bli mange og varierte. God kunnskap om byggets nåværende og fremtidige klimautfordringer er essensielt for at løsningene skal tåle tidens tann.

3.5.3 Klimatilpasset bygging

Klimatilpassing av bygg går ut på at materialvalg, byggemåte og vedlikehold skal være vær- og klimatilpasset byggestedet. I dag er det stort fokus på slik klimatilpassing, hovedsakelig på grunn av det økende omfanget av byggeskader. Det meste av byggeskadene skjer i klimaskallet, noe som tyder på at skadene hovedsakelig kommer av at byggverk ikke er tilstrekkelig tilpasset for byggestedets ytre påvirkninger (SINTEF, 2021).

Lokale klimaforhold er tidligere blitt kategorisert til upresise beskrivelser slik som for eksempel «værhardt klima» og «tørre innlandsstrøk». Å beskrive de geografiske variasjonene i Norge med observasjoner og meteorologiske parametere istedenfor de tidligere upresise beskrivelsene, gir et mye bedre grunnlag for klimatilpassingen (Thue, 2016).

Byggverk som optimaliseres et sted i Norge, er ikke nødvendigvis funksjonsdyktig et annet område. I søken etter kostnadseffektive standardløsninger har mye tradisjonskunnskap gått i glemmeboken og med fremtidige klimaendringer i opptog er en økende oppmerksomhet på klimatilpassing en uunngåelig nødvendighet (Thue, 2016).

3.5.4 Inneklima

En undersøkelse av Statistisk sentralbyrå (SSB) gjennomført i 2010, viste at nordmenn tilbringer i gjennomsnitt 21,5 av døgnetts 24 timer innendørs (SSB, 2012). Det vil si at mennesket i løpet av en hel livstid er 90% innendørs, og naturligvis er man opptatt av komfort inne.

Det skal være god ventilasjon og en behagelig innetemperatur for at mennesker skal trives. For å kunne opprettholde et tilstrekkelig nivå av velvære og produktivitet finnes det en rekke slike faktorer som beskriver hvordan et såkalt innemiljø oppleves. De aller fleste av disse er det definert en rekke lover og forskrifter for. Inneklima, en underkategori av innemiljø, er definert som et paraplybegrep for samspill mellom termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø.

3.5.5 Sol og dagslys

Et viktig funksjonskrav i bygninger er solklimaet. Det er mange grunner til at man ønsker å benytte dagslys som lyskilde. For det første har naturlig lys bedre fargegjengivning og det hevdes at den naturlige variasjonen har gunstig innvirkning på fysisk og psykisk helse (Byggforskserien, 2001). Behovet for kunstig belysning reduseres ved god tilrettelegging for utnyttelse av dagslyset, og vil kunne gi gode energibesparelser (Lyskultur, 2022).

Dagslys har to underkategorier; himmellys og direkte sollys (UiO, 2011). Det er himmellyset som er av størst relevans for belyningsformål generelt, mens det direkte sollyset er spesielt viktig å ha kjennskap til for å kunne forhindre blant annet blanding og overoppheting (Thue, 2016).

For best utnyttelse av dagslyset er lokale dagslysdata helt nødvendig å kartlegge for å kunne ta godt veide valg. Solposisjon, solskinnstid, himmelluminans og omgivelsenes skjermings- og lysrefleksjonshold er viktig grunnlagskunnskap for viktige avgjørelser som for eksempel bygningsorientering, vindusutforming og byggehøyder.

3.5.6 Potensielle miljøbesparelser

Som nevnt står byggeindustrien globalt for hele 39% av de totale klimagassutslippene, og bransjen har dermed et stort forbedringspotensial. Energieffektive bygg kan være et utgangspunkt i veien mot en mer miljøvennlig bransje, da slike bygg minker behovet for energitilførsel. Mange rapporter viser til gode resultater av et bredt spekter av miljøbesparende tiltak. Likevel er det manglende data på grunn av Norges store variasjoner i klimaforhold, på nettopp hvor besparende de ulike tiltakene er for miljø eller kostnad på generell basis. Dette fører til at når nye boliger skal bygges, baseres valgmulighetene i stor grad på lokale erfaringer og rapporter. Uten god dokumentasjon og analyse får erfaringer fra boligbygg generell liten nasjonal overføringsverdi, noe som gjør erfaringsdeling til en omfattende prosess i Norge.

Derimot kan det med tall fra Passive House Institute vurderes slik at passivhus har en energibesparelse på over 75% sammenlignet med et gjennomsnittlig nytt hus (Passive House Institute, 2015). Dette selv om et passivhus i gjennomsnitt vil koste 10% mer å bygge enn et hus som møter minimumskravene (Conserve Energy Future, 2022). Ser man på hele passivhusets levetid kan det vise seg å være en lønnsom investering etter relativt få år. En amerikansk studie hevder at det å implementere energieffektiv teknologi i eksisterende hus kan føre til en reduksjon av driftskostnader tilsvarende 5-30% (EnergySage, 2021).

Med andre ord er det ikke godt å si nøyaktig hvor lønnsomt det kan være å bygge mer energieffektivt eller klimavennlig i Norge. Uansett vil det i årene som kommer bli viktigere å se etter nyere løsninger, uansett om det er fordi det kommer til å bli mer økonomisk lønnsomt, fordi nyere krav vil sette høyere standarder eller for at en bedrift skal kunne fortsette å konkurrere med kommersielle aktører.

3.5.7 Etikk klimaendringer

Kostnader er et stort tema, som ikke bare gjelder de økonomiske aspektene. De kostnadene som gjelder miljø og klima er vel så mye under diskusjon i vår tid. Den største utfordringen som

finnes er vel nettopp balansen mellom det økonomiske og konsekvenser for klima. Spørsmålet er hvem er ansvarlig for et skifte, og som skal ta de nødvendige økonomiske kostnadene?

Å utvikle ny teknologi er både tidkrevende og kostbart, og for mange firma og kunder er økonomi et viktig insentiv. Derimot vil et produkt kunne forberedes på mange måter, også i forhold til kostbarhet dersom det blir nok brukt. For å skape det grønne skiftet som er nødvendig for fremtiden til byggebransjen er det ikke bare firma og entreprenører som skal bli stilt til ansvar; ingeniører har en mulighet til å skape store endringer, noe som gjør at også de burde være moralsk forpliktet til å bidra.

3.6 Byggtekniske løsninger

3.6.1 Isolasjon

Passivhus er kjent for å være godt isolerte bygninger med gode vinduer og minimalt med luftlekkasjer. Derfor er det mange som ser på passivhusene som bygg med tykke vegger og derav et mindre utnyttet areal på tomten. Nye løsninger gjør det på en annen side mulig å endre dette. Nye isolasjonstyper og bygningskomponenter har mye bedre egenskaper og er stadig under utbedring til gode for både kostnader og klima. Siden det i NS 3700 kun er krav til totalt varmetapstall, er det ikke krav til de enkelte bygningsdelene. Dette gjør at man kan kompensere for manglende veggtykkelse ved å overdimensjonere andre bygningsdeler. Dette kan føre til at omprosjekteringen enten har høyere eller lavere U-verdier enn typiske passivhusverdier som er oppgitt i Tabell 7.

Selv om det i passivhusstandarden ikke er krav til de enkelte bygningsdelene, må de likevel tilfredsstille minimumskravene i TEK 17. Disse er listet i Tabell 5 – U-verdi bygningsdeler i henhold til TEK 17 Tabell 5. Det kan også være en god pekepinn mot det å produsere et lavenergibygge eller passivhus ved å holde seg innenfor energiltakene listet i §14-4 i TEK 17. Selv om det ikke er krav til bygningsdelene har NS 3700 listet typiske verdier for bygningsdelene, disse er vist i Tabell 7.

Tabell 5 – U-verdi bygningsdeler i henhold til TEK 17 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Krav til bygningsdeler	W/(m²K)
<i>Tak</i>	≤ 0,18
<i>Gulv</i>	≤ 0,18
<i>Yttervegg</i>	≤ 0,22

Tabell 6 – Energiltak bygningsdel (Direktoratet for byggkvalitet, 2017)

Energiltak	W/(m²K)
Tak	≤ 0,13
Gulv	≤ 0,10
Yttervegg	≤ 0,18

Tabell 7 – Typiske passivhusverdier bygningsdeler (Standard Norge, 2013)

Typiske passivhusverdier	W/(m²K)
Tak	0,08 – 0,09
Gulv	0,08
Yttervegg	0,1 – 0,12

3.6.2 Vindu

For å begrense varmetap er vindu en viktig faktor. Vinduer med større areal isolerer bedre, men selv med store vinduer vil veggen ha bedre verdier i seg selv, uten vindu. Dette gjør at ved å begrense mengde og ha store vindu vil man få den best optimaliserte løsningen. Om man også velger en type som er mer gunstig for Norsk klima, slik som 3-lags vindu vil man også her oppleve store fordeler; for energikostnad, komfort og et generelt bedre innklima. Ved å velge løsninger med god isolering vil innetemperaturen være jevnere, men ved tette løsninger er det samtidig viktig å sikre god lufttilgang. Dette kan løses ved bruk av ventiler eller bruk av balansert ventilasjon, for å sikre tilstrekkelig mengde med frisk luft inn til boligen (Direktoratet for byggkvalitet, 2018).

3.7 Tekniske anlegg

3.7.1 Vannbåren varme

Et vannbårent varmeanlegg er en oppvarmingsmetode som enkelt forklart går ut på å sende varmtvann rundt i rør, radiatorer eller viftekonvektorer. Varmen fra vannet går med til å varme opp huset og er et egnet oppvarmingssystem for både eksisterende og nybygg.

En vannbåren varmeløsning i gulvet kan gå ut på å støpe inn rør i en såkalt støpt løsning, men kan også legges i varmfordelingsplater (Byggforsk, 2020). En raskere oppvarming gir radiatorer og viftekonvektorer, som også er en del av det vannbårne systemet, og som kan kombineres med hverandre og gulvvarmen (Larsen, 2021).

Et vannbårent system egner seg godt, ifølge Enova, til de som ønsker god bokomfort, jevn varmfordeling, er sensitiv for støv i luften, skal foreta en større oppgradering eller vurderer å bytte til en fornybar varmekilde (Enova, 2022). Det er en stabil varmekilde, som holder seg stødig uavhengig av klima.

Et vannbårent varmesystem har mange muligheter når det kommer til varmekilde. Systemet kan for eksempel driftes med varmepumper, bio-kjeler, ovn med vannkappe, solfangere, solceller, eller direkte fra elektrisitet (Larsen, 2021).



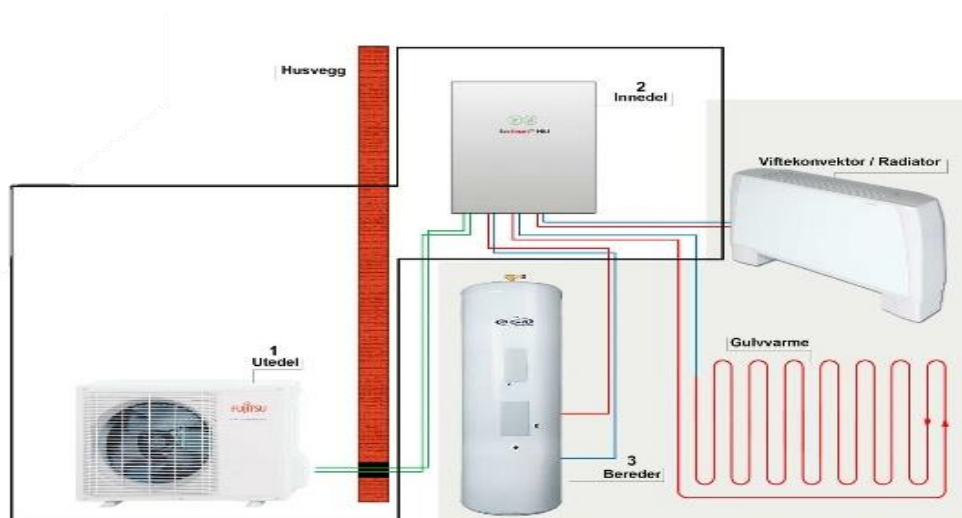
Figur 3 – Vannbåren varme prinsippkisse (Enova, 2022)

3.7.2 Varmepumpe

En varmepumpe er et temperaturregulerende verktøy som er svært energieffektivt da den overfører energi med minimal bruk av elektrisitet (Energy Saver, 2022). En varmepumpe har høy virkningsgrad og kan føre til store elektrisitetsbesparelser.

Det finnes mange forskjellige typer varmepumper. Varmepumper for luftbåren varme, ofte kalt luft-til-luft-varmepumpe, er den vanligste varmepumpen i Norge. En varmepumpe til vannbåren varme kan hente varme fra berg, jord, sjø, ute- eller inneluft og kan kategoriseres i tre ulike typer - væske-til-vann-, luft-til-vann- og avtrekksvarmepumpe.

En luft-til-vann-varmepumpe fungerer på samme måte som en vanlig luft-til-luft-pumpe, men istedenfor å avgi produsert varme til inneluften, kobles kondensatoren til et varmtvannsanlegg. En slik varmepumpe vil produsere 2,5 til 3,5 ganger så mye energi som strøm benyttet til



Figur 4 – Varmepumpens prinsippkisse (EcoSmart ATW Controller, 2022)

produksjonen (Gulbrandsen, 2022). En væske-til-vann-varmepumpe omgjør energi fra fjell, jord eller sjø mens en avtrekksvarmepumpe gjenvinner eksisterende varme fra avtrekksluften til for eksempel baderom og kjøkken. En avtrekksvarmepumpe har en lav investeringskostnad i forhold til en væske-til-luft-varmepumpe som har en veldig høy investeringskostnad. En luft-til-vann-varmepumpe har også en ganske høy investeringskostnad, mens luft-til-luft-varmepumpe er rimeligere (Enova, 2022).

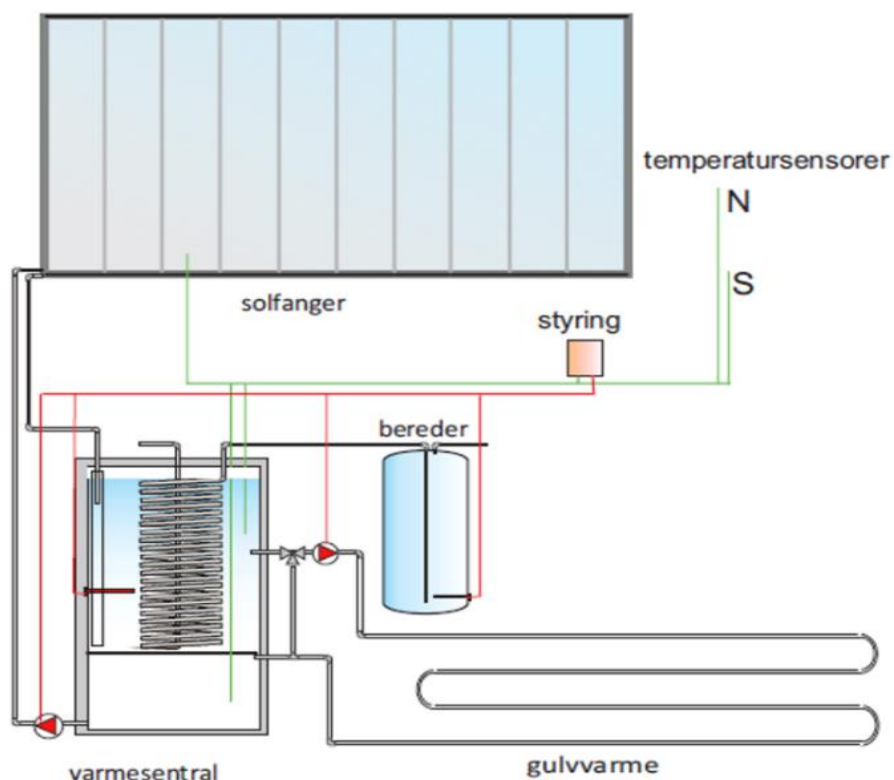
3.7.3 Solfanger

En måte å utnytte solenergi på, er å installere et solfangeranlegg. Et slikt anlegg absorberer varmen fra solen, og bruker denne til å varme opp vann. Dette vil si at solfangeren ikke lager elektrisk energi på samme måte som en solcelle gjør, men derimot termisk energi som kan transporteres rundt i huset. Denne energien kan brukes enten til romoppvarming, oppvarming av tappevann, eller en kombinasjon. Det er dermed også behov for et varmelager slik som en akkumulatortank.

Kombianlegg bruker den termiske produserte energien fra solfangerne til både romoppvarming og til å varme opp tappevann. Dette gir en løsning som sammen med bruk av vannbåren varme gir en jevn fordeling av varme i boligen, samt et energiutbytte som fører til økonomiske besparelser.

For nybygg er det generelt best å ha kombianlegg og dermed vannbåren varme i huset. Her kan man også kombinere solfangeranlegget med for eksempel varmepumpe, eller kanskje enda bedre, vedovn med vannkappe (spiral på røykrøret) (Berg, 2022). Anleggene kan dimensjoneres slik at solenergi dekker mer enn 40 % av det totale oppvarmingsbehovet, og dermed oppfyller kravene til fornybarandel som gjelder for å oppnå lavenergi- og passivhusstandard.

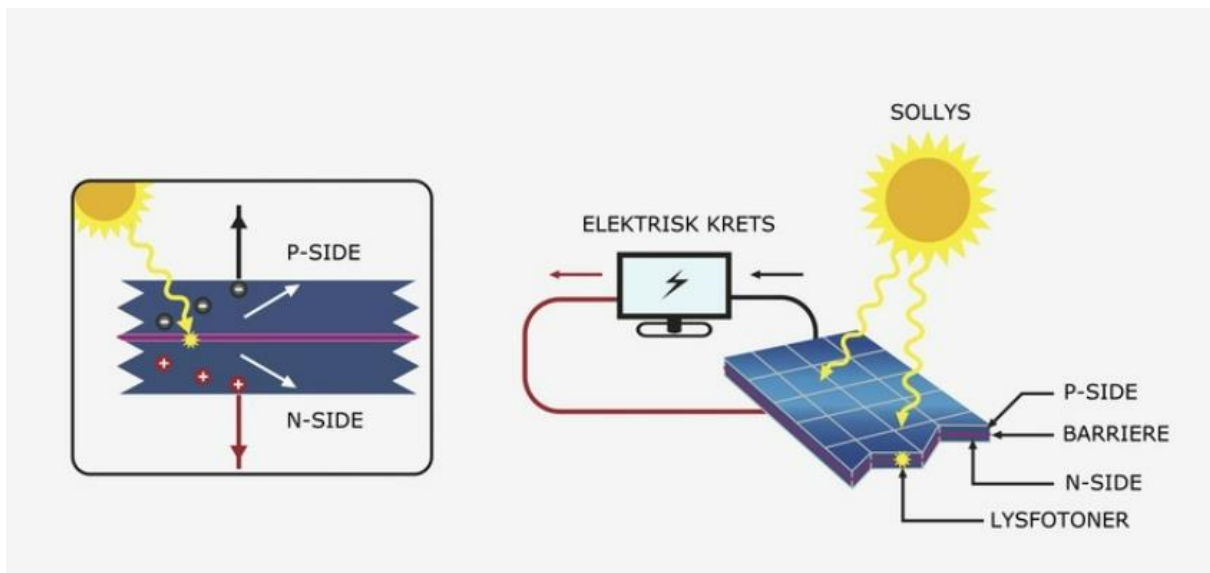
Optimal vinkel på slike anlegg ligger mellom 30° og 75°. Typiske produksjonsverdier ligger mellom 300 – 500 kWh/(m²år). For husholdninger er det estimert at om lag 78 % av energibruken går til oppvarming av bygg og til varmtvann (Olje- og energidepartementet, 2021). For å nå kravet til energikilde for passivhus må solfangeren dekke minimum litt over 50% av varmtvannsbehovet. Deretter kan resten av energibehovet dekkes med elektrisitet.



Figur 5 – Eksempel på systemskisse (Inaventa Solar, 2022)

3.7.4 Solceller

En solcelle bruker den fotovoltaiske effekten til å lage strøm. Den fotovoltaiske effekten er egenskapen som sollyset, eller mer korrekt lysfotonene, har til å slå løs elektroner fra atomer og skape strøm eller spenning i et materiale. Solceller består i hovedsak av to lag med silisium av ulik elektronsammensetning. Silisium med ledige elektronplasser er på den ene siden, p-siden, mens silisium med overskudd på elektroner plasseres på den andre, n-siden (Mjønerud, 2019). Ettersom disse lagene ligger inntil hverandre, vil overskuddselektronene fra n-siden fylle ledige elektronplasser på p-siden og danne en barriere av atomer med fullt elektronskall. Når flere lysfotoner slår løs flere elektroner fra n-siden tvinger barrieren elektronene til å bevege seg rundt i et ledningsnett. Det er denne elektronstrømmen som hentes ut fra solcellene gjennom i den elektriske kretsen og kalles strøm. En prinsippskisse av solcellepanel er gjengitt i Figur 6.

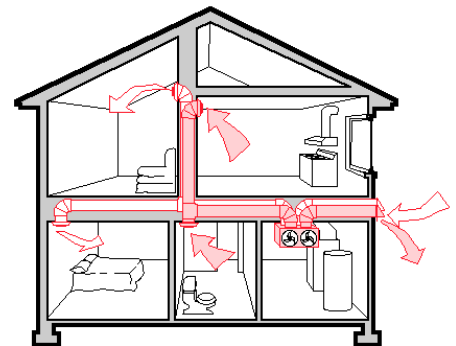


Figur 6 – Solcellens virkemåte (Mjønerud, 2019)

Virkningsgraden til silisiumsolceller er i praksis mellom 15 og 24% (Mæhlum, 2020). Hvor mye strøm som produseres avhenger av systemets effektivitet, plassering, helningsvinkel og geografisk tilpasning (Norsk Solenergiforening, 2022). I Norge kan et solcelleanlegg produsere mellom 650 og 1000 kWh i året, noe som vil dekke minst 25% av en standard bolig sitt strømforbruk (NVE, 2022).

3.7.5 Balansert ventilasjon

En balansert ventilasjon sørger for rikelig tilstrømning av frisk luft til boligen, uten unødvendig varmetap. Et balansert ventilasjonssystem filtrerer den friske luften og gjenvinner 70-90% av varmen fra den gamle luften til oppvarming av den nye luften (Enova, 2016). Ny, ren, tørr og temperert luft fordeles jevnt i boligen og bidrar til en minimal risiko for fuktskader og konsens.



Figur 7 – Balansert ventilasjon (Zehnder, 2015)

Et slikt balansert ventilasjonssystem, vil i sammenligning med manuell lufting eller mekanisk avtrekksventilasjon gi store energi- og økonomiske besparelser i løpet av et år. Andre fordeler med et slikt ventilasjonssystem er at en eventuell radonkonsentrasjon reduseres og at energiutgiftene blir mer forutsigbare (Enova, 2016).

3.7.6 Smart-hus

Et smart-hus er et lite definert begrep, men brukes i størst grad om optimalisering av en eller flere av husets teknologier eller funksjoner. Sikkerhetsløsninger, brukervennlighet, komfort og strøm-

og energiforbruk er eksempler på funksjoner og teknologier som en i et smart-hus ønsker å optimalisere og automatisere. Desto flere teknologier som samhandler, desto smartere hus er det snakk om.

Smart-hus er kanskje for folk flest assosiert med teknologi som gjør det mulig å styre lys fra smart-telefonen og sette på musikk ved hjelp av enkle muntlige kommandoer. Selv om disse teknologiene er praktiske fra dag til dag, har smarthusteknologien et mye større bruksområde. Et smarthussystem kan for eksempel varme opp boligens tappevann når strømprisen er på døgnetts laveste og koordinere innnetemperatur, ventilasjon og solskjerming. Flere store eller små installasjoner kan gjøre smart-telefonen til et multifunksjonelt kontrollpanel for hele huset.

I mangel av gode dokumenterte effekter på energi- og kostnadsbesparelser er det enda ikke enighet i lønnsomhet av å installere et energibesparende smart-anlegg. Likevel er det rimelig å anta at en praktisk samhandling mellom tekniske installasjoner som ikke går på bekostning av innekomfort nødvendigvis vil gi besparelser. I tiden fremover er det rimelig å anta at markedet for en slik installasjon av smart-systemer vil øke, og investeringskostnaden vil synke i takt med markedskonkurransen. Sammen med en effektiviserende teknologiutvikling og strømprisutviklingen er det mye som tilsier at slike systemer vil bli mer lønnsomt med tiden. En kan dermed argumentere for at et smart-hus i fremtiden kanskje blir et standard integrert system i de alle fleste nybygg.

4 Programvare

I dette kapittelet presenteres de forskjellige programvarene benyttet i denne oppgaven og bruksområdene for disse.

4.1 Simien

For å beregne diverse energiaspekter ved bygg vil det i denne oppgaven bli brukt Simien. Denne programvaren er et energisimuleringsprogram, og gir muligheter for å beregne hvilke endringer i bygningsegenskapene som vil lønne seg. Det er også mulighet for å legge inn egne tall for U-verdier. Programvaren sjekker verdiene opp mot krav i TEK 17, men kan også validere resultat opp mot NS-EN 15265, NS 3031 og NS 3700 (Simenergi, 2018)

4.2 PHPP

The Passive House Planning Package (PHPP), levert av Passive House Institute er et verktøy for beregning av energieffektivitet i bygninger. Dette verktøyet vil bli brukt sammen med Simien for å kunne gjøre mer nøyaktige og kontrollerte beregninger for hvert scenario. Simulering i PHPP vil sjekke viktige verdier opp mot den internasjonale standarden for passivhus, slik som oppvarming- og energibehov (Passive House Institute, 2015). Programmet også gir nøyaktige resultat for kjølingsbehov, frekvens for overoppheting, behov for fornybar- og ikkefornybar energiforsyning samt årlig energiproduksjon. Noen av kalkulasjonene i programmet baseres på tyske standardverdier når annet ikke oppgis, mens andre beregninger er tilpasset klimaet som velges for simulasjonen. PHPP har en overlegen detaljeringsgrad, så hovedvekten av beregningene vil utføres i dette programmet.

PHPP er stadig under utvikling, selv om nøyaktigheten til programmets resultater allerede er høy. Programmet er basert på et ordinært Excel format og kan samhandle med andre simuleringsprogram som for eksempel 3D programmet designPH.

5 Metode

Innunder denne delen av prosjektet beskrives den valgte prosedyren for å løse oppgavens problemdefinisjon. Deretter beskrives oppgavens avgrensninger, og bakgrunn for valg av oppvarmingsystem og tekniske installasjoner presenteres. Metoden for de ulike analysene legges frem sammen med bakgrunn for sammenlikning og vurderinger som gjennomføres i påfølgende deler av oppgaven.

5.1 Fremgangsmåte

Det skal i denne oppgaven undersøkes muligheter for å oppnå tre ulike nivåer av energieffektive bygninger. De tre nivåene defineres til passivhus, nullenergibygg og plussus.

For å finne beste passivhusløsning skal størst mulig effekt av de energieffektiviserende forslagene veies opp mot praktisk gjennomførbarhet. Det gjennomførbare krysningspunktet blir utgangspunktet for videre løsningsforslag, der det undersøkes muligheten for å oppnå et nullenergibygg og et plussus ved hjelp av tekniske installasjoner. Scenarioene undersøkes i programmet Passive House Planning Package (PHPP) og resultatene danner utgangspunktet for forslag til omprosjektering.

Hensyn til de ulike scenarioenes klimaavtrykk utelates i simuleringen. Basert på en overslagsberegning av CO₂-ekvivalenter av omprosjekteringsforslagene skal forbedringspotensialet kommenteres. Til slutt vil de økonomiske konsekvensene ved omprosjekteringsforslagene presenteres, selv om det i simuleringens beslutningene ikke tas hensyn til de økonomiske aspektene.

Scenarioene skal undersøke effekten av en potensiell optimalisering av husets orientering, isolasjonsegenskaper, vindusareal og vindusplassering. Tekniske anlegg skal implementeres med hensyn til de ulike behovene som de forskjellige nivåene trenger å oppnå. Basert på oppvarmingsbehov og tappevannsbehov skal det undersøkes for tre ulike energiforsyningsmetoder som skal oppfylle krav for passivhus og nullenergibygg. Plusshuset og nullenergibyggets løsninger for energiforsyning baseres på passivhusets energibehov. For å oppfylle oppgavens kriterier satt for plussus skal det undersøkes løsninger for energiproduksjon som overgår byggets totale energibehov i størst mulig grad, med løsningsforslaget for nullenergibygg som base.

En sammenfattet konklusjon baseres på resultatene av de ulike scenariene og danner grunnlaget for tre omprosjekteringsforslag. Dette for å optimalisere energieffektiviteten til de definerte nivåene, også med tanke på økonomi og miljø.

5.2 Avgrensninger

For å møte Norgeshus Midt-Norges ønsker er det valgt en rekke avgrensninger som skal bidra til å gi størst mulig nytteverdi for dem. Det skal gjøres simuleringer for to ulike byer i Norge, Oslo og Trondheim.

Skyggefrie forhold, vegetasjon, nærliggende bygninger og hindringer uteblir fra simuleringene.

Med unntak av rotasjon, isolasjon og plassering av vinduer skal det ikke legges til grunn for andre endringer på de byggtekniske løsningene. Det vil med andre ord legges vekt på å finne løsninger som likner standardmodellen, men med komponenter med endrede tekniske egenskaper, materialeegenskaper og/eller tykkelse.

Vi begrenser rotasjonsvariasjonene ved å utelate variasjoner der inngangsdøren på huset vender mot sør, da disse tilsynelatende kan vurderes til lite hensiktsmessige alternativer grunnet husets utforming.

5.3 Utgangspunkt for simuleringer

5.3.1 Passivhuskrav for modellen

Formelen i Tabell 4, for en årsmiddeltemperatur for Trondheim på 5,8 (Byggforsk, 2018), gir et netto oppvarmingsbehov på 23,36 kWh/(m²år). For Oslo, med en årsmiddeltemperatur på 6,1 får man på modellen et oppvarmingsbehov på 23,17 kWh/(m²år).

Tappevannsbehovet beregnes etter standardverdier fra SN-NSPEK 3031:2021 tabell A.2 i tillegg A og resulterer i et behov for 25,1 kWh/(m²år) for et småhus. Tappevann trenger etter punkt 4.4 i den samme standarden å dekkes av minst 50% fornybar energi (Standard Norge, 2021) for å kunne klassifiseres som et passivhus. Beregnet ut fra dette har Dråpen moderne ett behov på oppvarming av tappevann på totalt 3514 kWh/år.

5.3.2 Tiltak

For å møte gjeldene krav fra TEK 17 for energieffektivitet samt passivhuskrav er det nødvendig å iverksette en rekke tiltak. Disse tiltakene danner grunnlaget for den videre forbedringen av husets energieffektivitet.

Det er i et nybygg fornuftig å velge et vannbårent varmeanlegg som oppvarmingskilde. Det gir en stabil og jevn varmfordeling i huset og gir behagelige gulv å gå på. Det gir dessuten mange valgmuligheter for energiforsyning. Denne oppgaven vil i utgangspunktet kun undersøke ulike fornybare forsyningsmetoder i energisimuleringene, selv om det er en like stor mulighet å drifte

anlegget kun ved hjelp av elektrisitet. På bakgrunn av dette velges det å ta utgangspunkt i at nye modeller prosjekteres med vannbårent varmeanlegg som et tiltak for å bedre inneklima og tilgjengeliggjøre mer energieffektive og fornybare alternativer.

Ettersom boliger av passivhusstandard ikke trenger å prosjekteres med mulighet for skorstein (Direktoratet for byggkvalitet, 2017), tas det i denne oppgaven utgangspunkt i dette som et reelt tiltak for å redusere varmetap og frigjøre plass til solceller på taket.

Et annet energibesparende tiltak som antas for fremtidens prosjektering av Dråpen Moderne er implementeringen av smarthusteknologi. Det antas her at den mekanisk balanserte ventilasjonen for eksempel samhandler med automatisk romoppvarming, belysning, tappevannsoppvarming og solskjerming.

Disse tiltakene ansees ved videre beregninger som et minimum for utbedring av standardmodellen og det tas dermed ikke hensyn til de økonomiske aspektene ved implementeringen av disse. Unntaket er for vannbåren varme, da det gjøres et estimat som er med i kostnadsberegningene.

5.3.3 Evaluering og vurderinger for inngangsdata

Ventilasjonsanlegget på standardmodellen er med en varmegjenvinning på 80% innenfor passivhuskravet. Dette anses som tilstrekkelig og ventilasjonen vil derfor ikke utbedres i denne oppgaven. Dører og vinduer er også innenfor krav og blir derfor ikke skiftet ut.

Dråpen moderne er oppgitt med en normalisert kuldebroverdi på $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. For å møte kravene til passivhus må denne reduseres til $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dersom Dråpen Moderne skal kunne sertifiseres som et passivhus, må altså kuldebroverdien forbedres. Det er flere måter å sørge for en forbedret kuldebroverdi, blant annet ved å trekke vinduene lenger inn i veggen og benytte bedre isolerte karmløsninger. Kontinuerlige isolasjonssjikt samt å sørge for gode løsninger der utsatte områder har en form for kuldebrobryter, gir god effekt. Dersom det i det totale omprosjekteringsforslaget utelates å prosjektere for skorstein, kan en regne med å ha spart seg for en betydningsfull kuldebro. Basert på at det skal brukes typiske passivhusverdier for størstedelen av bygningskomponentene er det rimelig å anta at kuldebroverdien er innenfor kravet på $0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ i omprosjekteringsforslaget. Kuldebroverdien vil ha en betydning for det totale varmetapstallet.

Lekkasjetallet er antatt til $1,0 \text{ h}^{-1}$, og er innenfor minimumskravet i TEK 17 på $1,5 \text{ h}^{-1}$ for småhus. Likevel er det for passivhus satt et krav på $0,6 \text{ h}^{-1}$, noe som betyr at bygget må bli tettere enn det Norgeshus antar i sin standardmodell. Fjerner en skorsteinsmulighet, som skaper et mulig utsatt

punkt i klimaskallet, vil en kunne regne med at lekkasjetallet også reduseres. Ved ferdig konstruert bygning, må bygget gjennom en trykktest, og det er viktig at bygget består denne for at dyre korreksjonskostnader ikke skal forekomme i ettertid. For å unngå dyre korreksjonskostnader anbefales det å ta en veiledende trykktest før innvendig kledning er montert. Kunnskap om betydningen av riktig installering av utsatte bygningsdeler er derfor veldig viktig, og kan ha mye å si for bygningens tetthet.

5.3.4 Inngangsdata

Tabell 8 – Inngangsdata simuleringer

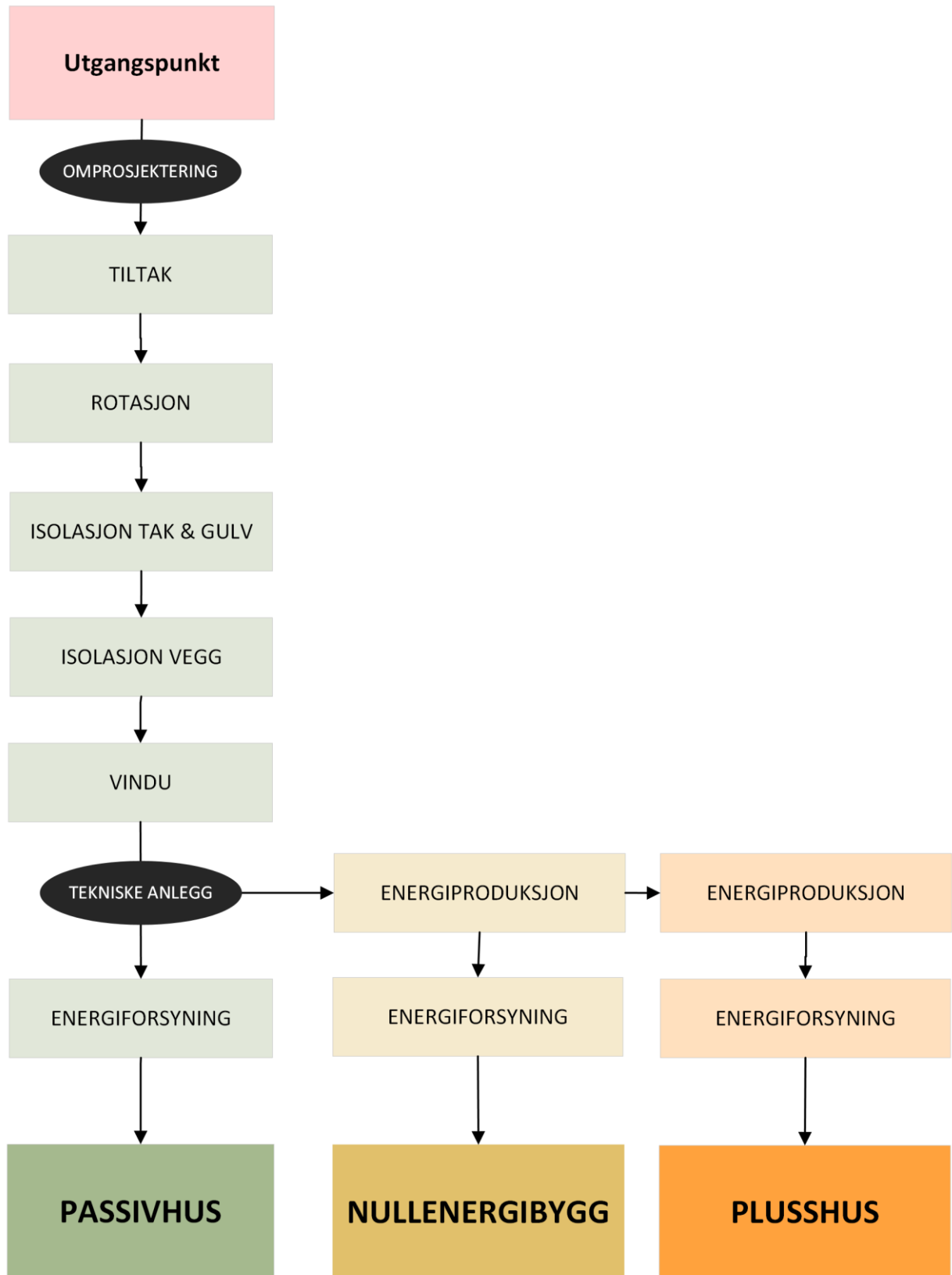
Beskrivelse	Verdi	Enhet	Kommentar
Areal tak	64,7	m ²	
Areal balkongtak	10,5	m ²	
Areal yttervegg	135,9	m ²	
Areal vinduer og ytterdører	56,1	m ²	
Areal gulv	75,2	m ²	
Oppvarmet bruksareal	139,9	m ²	
Oppvarmet luftvolum	336	m ³	
U-verdi tak	0,11	W/m ² K	
U-verdi balkongtak	0,13	W/m ² K	
U-verdi yttervegg	0,198	W/m ² K	
U-verdi vinduer og ytterdører	0,8	W/m ² K	Gjennomsnittlig
U-verdi gulv	0,094	W/m ² K	
Normalisert kuldebroverdi	0,05	W/m ² K	
Normalisert kuldebroverdi	0,03	W/m ² K	Evaluering, minstekrav
Normalisert varmekapasitet	32	Wh/m ² K	
Lekkasjetall	1	h ⁻¹	Antatt, n ₅₀
Lekkasjetall	0,6	h ⁻²	Evaluering, minstekrav, n ₅₀
Ventilasjon	Mekanisk balansert		
Spesifikk vifteeffekt	1,5	kW/m ³ /s	
Luftmengde i driftstid	1,2	(m ³ /h)/m ²	168 m ³ /h
Virkningsgrad	80	%	Varmegjennvinning
Kjøling	Vinduslufting		
Arealandel vindu m/lufting	60	%	
Systemvirkningsgrad	74	%	Oppvarmingsanlegg, årsgjennomsnittlig
varmebatteri	43,5	W/m ²	Med nattsenkning
Settpunktstemperatur for romoppv. (natt)	21 (19)	°C	
Driftstid oppvarming	16	h	
Driftstid ventilasjon	24	h	
Driftstid belysning	16	h	
Driftstid utstyr	16	h	
Oppholdstid personer	24	h	
Effektbehov utstyr i driftstiden	3	W/m ²	j.fr. NS 3031 Tillegg A
Varmetilskudd utstyr i driftstiden	1,8	W/m ²	j.fr. NS 3031 Tillegg A
Effektbehov varmtvann på driftsdager	5,1	W/m ²	j.fr. NS 3031 Tillegg A
Varmetilskudd personer i oppholdstiden	1,5	W/m ²	j.fr. NS 3031 Tillegg A
Varmetilskudd belysning i driftstiden	1,95	W/m ²	j.fr. NS 3031 Tillegg A
Total solfaktor for vindu og solskjerming	0,11	W/m ²	g _T
Gjennomsnittlig karmfaktor	0,2		F _F

5.4 Scenarier

Oppgaven avgrenses til syv hovedscenarier med noen variasjoner der dette er naturlig å undersøke. Hver scenario-simulering vil gi resultater som neste scenario bygger på. På den måten optimaliseres hvert scenario basert på det foregående. Dette vil ikke nødvendigvis gi de beste løsningene isolert sett, men forhåpentligvis gi totalløsninger som er praktisk gjennomførbare. De ulike scenariene og variasjonene det skal simuleres for, vises i Tabell 9. Forholdet mellom fremgangsmåten og scenarioene er illustrert i Figur 8.– Fremgangsmåte

Tabell 9 – Scenario

<i>Scenario</i>	<i>Type</i>	<i>Variasjon</i>
1	Tomterotasjon	
1.1	Rotasjon	135° N
1.2	Rotasjon	180° N
1.3	Rotasjon	225° N
1.4	Rotasjon	270° N
2	Isolasjon tak og gulv	Bytte ut bedre kvalitet, lik størrelse
3	Isolasjon vegg	Supplere med 48 mm kontinuerlig isolasjon
4	Vindu	
4.1	Vinduets inntrekning Avstand	Utvendig karm til utside vindsperre 0 mm, 20 mm og 40 mm
4.2	Plassering og mengde	Redusere antall, sørvendte vinduer
6	Energiforsyning	
6.1	Varmepumpe	
6.2	Solfanger	10 m ² tappevannsannlegg og 13/14 m ² kombianlegg
6.3	Kombinasjon solfanger og varmpumpe	
6.4	Kombinasjon solfanger og ovn	
7	Energiproduksjon	20 og 24 solcellepanel



Figur 8 – Fremgangsmåte

5.4.1 Rotasjon

Grunnet de mange alternativene for byggets rotasjon er det valgt å begrense simuleringene til 4 variasjoner, i tillegg til utgangspunktet. Variasjonene er valgt med tanke på hensiktsmessighet i forhold til planløsning, samt med så stor endring i vinklingen at resultatene har en essensiell differanse. Dette blir gjort uten å endre bygningsfysikken i huset, og resultatene er ikke reelle dersom vinduer og planløsning blir endret. Dersom huset blir justert med hensyn på plassering og utforming av bygget er det rimelig å anta at resultatet blir annerledes.

5.4.2 Isolasjon tak og gulv

Da ønsket er å endre minst mulig av bygningsfysikken, sees det på løsninger med isolasjonstyper som har andre egenskaper enn isolasjonen opprinnelig benyttet. Siden det er et ønske om å øke veggtykkelsen minimalt, er det derfor valgt å se på muligheten for å overdimensjonere tak og gulv. Dette gjør at de opprinnelige tykkelsene på bygningsdelene beholdes, noe som forenkler omprosjekteringsprosessen. Samtlige av de opprinnelige komponentene er beholdt, og det er kun skiftet ut isolasjonssjikt. Det er samtidig anbefalt å sikre høy kvalitet på utførelsen av prosjekterende entreprenør, og redusere kuldebroer.

Som alternativ isolasjonstype skal det undersøkes for isolasjon fra Kingspan®. Kingspan sine produkter har en lav varmekonduktivitet og vekt. Dette gir også fordeler i forhold til klimagassregnskapet, da disse materialene er mer gunstig når det kommer til transport. På deres nettsider står isolasjonen beskrevet slik; «Med Kingspan's høyeffektive isolasjonsløsninger er det enkelt å spare verdifullt areal. Vi tilbyr noen av markedets ledende isolasjonsprodukter med meget lave lambdaverdier, bra brannegenskaper og med lang levetid.» (Kingspan, 2022).

Tak

I taket er det opprinnelig 350 mm med isolasjon med en varmekonduktivitet på 0,038 W/(mK). Det er også fall 1:40 på kortsidene, og 1:60 på langs av taket. Balkongtaket har en mindre tykkelse på 300 mm av samme isolasjonsklasse. Dette gir bygningsdelene en U-verdi på henholdsvis 0,110 W/(m²K) for taket og 0,130 W/(m²K) for taket på balkongen.

På omprosjekteringsforslaget er det valgt å benytte produktene Therma TR26 og Therma fallisolasjon TT46. Disse har en varmekonduktivitet på 0,022 W/(mK).

Omprosjekteringsforslag tak
0,069 W/(m²K)

Typisk passivhus verdi tak
0,08 – 0,09 W/(m²K)

Balkongtaket får en U-verdi på 0,076 W/(m²K).

Alle verdier er tatt fra Kingspan's produktbrosjyrer (Kingspan, 2022).

Gulv

I gulvet er det opprinnelig benyttet isolasjon med samme varmekonduktivitet på 0,038 W/(mK), og også her er isolasjonstykkelsen 350 mm. Dette gir en U-verdi på 0,112 W/(m²K) for hele gulvkonstruksjonen. Dette er høyere enn hva som er opplyst av Norgeshus, og er basert på brosjyre fra leverandøren deres. Dette utdypes nærmere i kapittel 7.8 Feilkilder på side 84. I omprosjekteringsforslaget vil de øverste 50 mm erstattes med Kingspan sin isolasjon Kooltherm K3. Dette er en gulvisolasjon med varmeledningsevne på 0,020 W/(mK) når dens tykkelse er på mellom 45-120 mm. Resterende 300 mm blir som opprinnelig valgt isolasjon.

Omprosjekteringsforslag gulv

0,097 W/(m²K)

Typisk passivhus verdi gulv

0,08 W/(m²K)

Alle verdier er tatt fra Kingspan's produktbrosjyrer (Kingspan, 2022).

5.4.3 Isolasjon vegg

Det har vært ønskelig å holde veggtykkelsen på modellen til et minimum, siden det å ha tykkere vegger gjør at bygget trenger mer flate og areal på tomten. Dermed blir det her vurdert en variasjon med minst mulig økning i isolasjonstykkelse. U-verdien vil ligge under typisk verdi for passivhus, noe som må kompenseres. Dette gjøres ved å overdimensjonere takets isolasjon i omprosjekteringsforslaget. Veggen har i opprinnelig prosjektert løsning en isolasjonstykkelse på 200 mm, med en varmekonduktivitet på 0,034 W/(mK). Dette gir en total U-verdi på bygningsdelen på 0,198 W/(m²K).

Forslag til omprosjektering vil baseres på å legge til 50 mm med kontinuerlig isolasjon på utvendig side av den eksisterende isolasjonen. I dette kontinuerlige isolasjonslaget skal det benyttes veggplater med en varmekonduktivitet på 0,031 W/(mK). Denne løsningen minsker kuldebroverdien, ved å bryte stenderverkets umiddelbare nærhet til ikke-isolerende bygningsmaterialer. Samtidig gjør dette at det blir gjort få endringer på eksisterende løsning. Stenderverket gjøres det ingen endring på. En slik løsning med tynne yttervegger gjør også minst inngrep i det estetiske, da det ikke blir behov for tykke dørkarmer og vindusforinger.

Omprosjekteringsforslag vegg0,146 W/(m²K)**Typisk passivhus verdi vegg**0,1 – 0,12 W/(m²K)

Vindusspesifikasjonene på kuldebroverdi endres ved en slik løsning grunnet endret veggtykkelse. I byggforskblad 472.801 er det oppgitt at kuldebroverdi går fra å være 0,04 W/(mK) ved 200 mm vegg av bindingsverk, til 0,046 W/(mK) ved 250 mm vegg av bindingsverk (Byggforsk, 2015).

Et annet alternativ til omprosjektering er å bruke en isolasjon med enda bedre varmekonduktivitet. Dette kan være aktuelt dersom huset skal prosjekteres i byer med lavere årsmiddeltemperatur, eller eventuelt dersom det er ønskelig å prosjektere etter den internasjonale passivhusstandarden. Her ligger også verdiene innenfor de typiske verdiene i NS 3700. Dette er ved bruk av Kingspan sin Kooltherm K12, som har en varmekonduktivitet på 0,02 W/(mK).

Kingspan omprosjekteringsforslag vegg0,113 W/(m²K)**Typisk passivhus verdi vegg**0,1 – 0,12 W/(m²K)

Alle verdier er tatt fra Kingspan's produktbrosjyrer (Kingspan, 2022).

5.4.4 Vindu

Her skal det vurderes for to varianter for vindusoptimalisering og nytten av disse. Den første variasjonen skal ta for seg effekten av vinduets innsetting i veggen. Det skal undersøkes for hvordan ulik inntrekning i bygningskroppen vil påvirke husets totale oppvarmingsbehov. I opprinnelig prosjektert løsning er utsiden av vinduets karm trukket ut fra utsiden av vindsperran og kan se ut til å ligge omtrent 40 mm fra utkant vindsperre til utside karm. Å endre på vinduets plassering i veggen slik at karmen ligger på innsiden av vindsperre kan teoretisk utgjøre en betydningsfull forskjell på oppvarmingsbehovet. Dette grunnet lavere kuldebroverdier og derav også et redusert varmetap.

Disse variasjonene har også en rekke konsekvenser eller fordeler sett bort i fra selve kuldebroverdien. En slik inntrukket løsning har behov for fuktsikring, siden komponenter i veggen er mer eksponert. Inntrekningen måles fra vindsperre til utvendig karm. Dette gir vinduet større solskjerming, noe som er ypperlig for bygninger som trenger et redusert oppvarmings- og kjølingsbehov. Skjermingen fører også til at faren for utvendig kondens minker, vinduet får bedre skjerming mot nedbør og det blir varmere, noe som også gir en noe lavere kondensfare på glassets

innside. Ulempene omhandler i stor grad selve arbeidet med innsettingen da denne blir mer komplisert og trangere. Dersom monteringen gjøres feil gir det stor fare for fuktskader i veggen, noe som oppstår dersom membranen under vinduet ikke er tett eller mangler. Så lenge membranen er utført riktig og tettesjiktene er ført helt inn til vinduskarmen skal det derimot ikke finnes flere negative konsekvenser. Det er også en mulighet å installere en inntrukket fôring rundt vinduene. Kuldebroverdiene for en slik løsning er omtrent halvparten så stor som en normalt isolert karm, og effekten av dette skal derfor undersøkes. Resultatene skal måles opp mot hverandre, og dersom effekten er stor nok skal det simuleres videre for en løsning som inkluderer inntrukket fôring.

Tabell 10 – Kuldebroer vindu med isolert karm verdier (Byggforsk, 2015)

Kuldebroverdi 250mm vegg	Normal fôring	Inntrukket fôring
-40 mm	0,046	0,031
0 mm	0,019	0,010
20 mm	0,014	0,007
40 mm	0,013	0,006

Den andre scenariovariasjonen omhandler vinduenes plassering og størrelse. I utgangspunktet har Dråpen Moderne vindu som tilsvarende 32,1% areal av BRA. Inklusive dører er dette arealet på hele 40%. I TEK 17 sine energiltak er det definert at vindu og dørarealet bør være under 25%. For å gjøre forslaget til omprosjektering enkelt å utføre er det valgt å ikke endre type og størrelse på vinduene, kun antall og plassering.

Figur 9 og Figur 10 illustrerer forslaget det skal simuleres for i scenario 4 om vinduer. Forslaget går ut på å fjerne 2 vinduer på nord-fasaden i 1.etasje og ett vindu på vest-fasaden i både 1. og 2.etasje. Et annet vindu på nord-fasaden i 2.etasje flyttes også til vest. Vinduene som fjernes er merket med et rødt kryss, mens det flyttede vinduet er tegnet på vest-fasaden i grønt og markert i rødt der det er flyttet fra.

For dører og vinduer er det beregnet at 35 m² er anbefalt mengde basert på TEK17. I utgangspunktet har Dråpen moderne et vindusareal på 42,48 m². I omprosjekteringsforslaget vil nytt vindusareal være på 36,33 m².



Figur 9 – Dråpen moderne 1. etasje, vindusreduksjon



Figur 10 – Dråpen moderne 2. etasje, vindusreduksjon

5.4.5 Energiforsyning

Gjennom scenariosimuleringer skal det undersøkes hvordan fire ulike alternativer til energiforsyning kan dekke deler av, eller hele oppvarmings- og tappevannsbehovet til passivhuset. Alternativene er valgt basert på hvilke samarbeidspartnere Norgeshus allerede er i kontakt med og hvilke alternativer det kan tenkes at Norgeshus sine private kunder realistisk sett vil være interessert i. Det var dermed naturlig å velge noen alternativer som ikke har en stor investeringskostnad, som har vist seg å ha god effektivitet i liknende boliger og som kan kombineres med det vannbårne gulvanlegget.

Det kan se ut til at en luft-til-vann-varmepumpe, vegghengte solfangere, eller en kombinasjon av disse er attraktive alternativer til energiforsyning for Dråpen Moderne.

Hvilket av energiforsyningsalternativene som er mest hensiktsmessig å benytte seg av i omprosjekteringsforslagene kan variere. Beste isolerte løsning for passivhuset er ikke nødvendigvis den beste løsningen for plusshuset. Dette kommer av at fokus på energieffektivisering kan gjøre en løsning mest hensiktsmessig, mens det med en høyere merkostnad tilknyttet tekniske anlegg kan være mest gunstig å velge et annet. Det samme gjelder for variasjonene innenfor de forskjellige energiforsyningsalternativene også.

En kan spare opptil 8800 kWh per år med en luft-til-vann-varmepumpe. Med dette som utgangspunkt skal det undersøkes for forskjellige dekningsbidrag for oppvarming og tappevann som gir en besparelse på omtrent det samme. For å møte passivhuskrav kan ikke tappevannsbidraget være lavere enn 50%. Det skal presenteres tre ulike løsninger der energibidraget er likt fordelt, der tappevannsbidrag er prioritert og omvendt. I første delvariasjon settes varmepumpens dekningsbidrag av oppvarming til 100% og pumpens bidrag til tappevann til 50%. Videre justeres tappevannsdekningen til nærmeste tier prosent som ikke overskrider en årlig energiproduksjon på 8800 kWh. På samme måte undersøkes det etter maksimalt

dekningsbidrag til oppvarming, forutsatt en 100% dekning av tappevannsbehovet. Det skal også undersøkes for høyeste like dekningsprosent som ikke overskrider en standard varmepumpes kapasitet.

Solfangeranlegget det skal undersøkes produksjonseffekten av for er basert på et mottatt tilbud fra Inaventa Solar i tilknytningen av denne oppgaven. Magnus Berg, salgssingeniør hos Inaventa Solar, har simulert og komponert et tilbud tilpasset denne oppgavens omprosjekteringsforslag av standardmodellen for både Trondheim og Oslo. Inaventa Solars sin egen polymerfanger med høy ytelse er lagt til grunn for Magnus sin beregning. Resultatene fra disse simuleringene og tilbudskostnaden av dette tilbudet presenteres i kapittel 6.3.5

PER- og PE-verdier skal også presenteres og tas stilling til da dette si noe om effektivitetsgraden til de ulike tekniske anleggene.

5.4.6 Energiproduksjon

For å finne potensiell energiproduksjon i Oslo og Trondheim skal programvaren PHPP benyttes. Her undersøkes det for den paneltypen som Norgeshus sin samarbeidspartner, Greenstat, anbefaler for denne modellen. Charly Berthod, prosjektleder innen solenergi for Greenstat, kommer i et digitalt møte med anbefalinger for Dråpen Moderne. Han anbefaler paneltypen kalt RSM40-8-390MB fra Risen Energy på 390 Wp og en moduleffekt på 20,3% (Risen Solar Technology, 2021). Han sier også at det å utnytte hele takets areal vil øke lønnsomheten til investeringen. Utnyttes hele taket, blir det ifølge Charly plass til 24 solcellepanel, noe som gir et solcelleareal på 46,1 m². Optimal helningsvinkel for panelene i Oslo og Trondheim varierer imidlertid noe, men det skal undersøkes for en helningsvinkel på 10 grader av arkitektoniske årsaker.

For undersøkelsene av energiproduksjon ved hjelp av solceller, brukes også et reelt tilbud som Greenstat har prosjektert tidligere for husmodellen på 20 panel i Oslo. Det opprinnelige tilbudet gitt til Norgeshus var for et tak med skorstein, noe som førte til en mindre mengde panel.

Basert på den samme panelteknologien, har PHPP beregnet produksjonsverdier for 20 og 24 panel for både Oslo og Trondheim. Resultatene fra Greenstat skal benyttes for å kontrollere produksjonsresultatene til PHPP. Resultatene fra begge produksjons-simuleringer presenteres som resultater og drøftes i diskusjonskapitlet. Investeringsanalysen bruker imidlertid Greenstat sine kostnadsoverslag som beregningsgrunnlag.

Solcellene alene påvirker ikke PE- og PER-verdiene som det ellers skal bli vist til i scenariosimuleringen. Derfor er ikke disse verdiene heller av interesse og blir dermed utelatt fra resultatfremstillingen og beslutningstaking.

5.5 Kostnadsanalyse

Parallelt med denne oppgaven skriver Sigurd Hagerup Kristensen og Emil Godtland Røe også om Dråpen Moderne for Norgeshus. I deres oppgave skal det undersøkes muligheter for å redusere klimagassutslipp på modellen (Kristensen & Røe, 2022). De mest relevante funnene deres skal presenteres i en forenklet versjon og sees i sammenheng med simuleringresultatene i denne oppgaven.

I undersøkelsen om omprosjekteringsforslagene er gjennomførbare er det nødvendig å se på de økonomiske aspektene ved omgjøringen av modellen. Hvor lønnsomt omprosjekteringen kan bli skal fremstilles gjennom parametere som merkostnad og tilbakebetalingstid for de tre omprosjekteringsforslagene. Disse parameterne danner utgangspunktet for sammenligningen. Totalkostnadene, kalkulasjonsrente og nåverdi utelattes fra kostnadsanalysen. Dermed kan kostnadsanalysen kun fungere som en enkel indikasjon på lønnsomhet, og det tas forbehold om feil eller mangler.

Kostnadsanalysen gjøres for kun Trondheim, og alle kostnader oppgis i norsk valuta, NOK. Alle verdier oppgitt i kostnadsanalysen er inkludert meravgift.

5.5.1 Nye bygningsdeler

I samarbeidet med Norgeshus fremkommer det i et møte at de vurderer et samarbeid med isolasjonsleverandøren Kingspan. Derfor er det valgt å bruke deres isolasjon for å kunne ha lettere og tynnere isolasjonssjikt, og dermed slippe å ha massive bygningsdeler.

Den økonomiske forskjellen på utgangspunktet og passivhuset sine bygningsdeler er regnet ut av Sigurd og Emil i deres oppgave (Kristensen & Røe, 2022). Økonomidelen baseres på deres tall for prisforskjellene i bygningsdeler, og i denne oppgaven legges de tekniske anleggene til i regnskapet.

Originalmodellen fikk i henhold til Tabell 11 følgende økonomiske egenskaper:

Tabell 11 – Økonomisk utgangspunkt

DRÅPEN MODERNE ORIGINALMODELL			
Kostnad	Størrelse	Benevning	Kommentar
TOTALT	3 825 636	kr	(Kristensen & Røe, 2022)
Oppvarmingsbehov	43	kWh/(m ² år)	
Energibehov	87	kWh/(m ² år)	
Totalt energibehov	12 177	kWh/år	
Energiproduksjon	-	kWh/år	
Mengde som må kjøpes	12 177	kWh/år	
Strømpris	1,50	kr/kWh	
Total energikostnad	18 265	kr/år	

Tallene mottatt fra Sigurd og Emil er gitt som totalkostnader for byggingen. I oppgavens beregning, brukes disse totalkostnadene kun for å beregne merkostnaden av de ulike omprosjekteringsforslagene. Det velges å se på merkostnader, da det kun skal sammenlignes de ulike alternativene til oppgradering av bygningsegenskaper.

Tiltakene inkluderer å se bort i fra skorsteinsmulighet, så besparelsen av dette må også trekkes fra merkostnadene til alle omprosjekteringsforslagene. Det antas at pipen vil koste 30 000 kr og at en vedovn vil koste omtrent 20 000 kr. Et fratrekk på 50 000 kr for skorsteinsmulighet, inkludert montering, vil gjøre opp for noe av merkostnadene som de supplerende tekniske anleggene vil føre til.

Plusshuset vil produsere mer energi enn huset behøver, og håndteringen av denne overskuddsenergien ville spille inn på lønnsomheten av investeringen. Det forutsettes i kostnadsanalysen for plusshuset at all overskuddsenergi selges tilbake til strømmettet. Det skal benyttes de samme salgsforutsetningene som Greenstat satte for sin kostnadsberegning (Berthod, 2022). De beregnet en salgspris på 0,55 kr per kWh strøm levert til nettet, og på bakgrunn av dette beregnes en omtrentlig fortjeneste av energiproduksjonen.

5.5.2 Tekniske installasjoner

Prisen for de tekniske installasjonene er hovedsakelig basert på tilbud fra Norgeshus sine samarbeidspartnere. Der det i korrespondanse med samarbeidspartnere fremkommer forslag til optimalt anlegg for modellen er prisen av disse dimensjonerende. Der Norgeshus ikke allerede har en samarbeidspartner er gjennomsnittsverdier benyttet.

Tabell 12 – Prisestimat for tekniske anlegg

Installasjon	Pris ink.montering [kr]	Økonomisk levetid [år]	Kilde
Vannbåren gulvvarme	84 000*	80-100	(Norges Astma og Allergiforbundet, 2016)
Solfanger 10 m ² (Oslo)	43 284**	25-30	(Berg, 2022)
Solfanger 13 m ²	57 915**	25-30	(Berg, 2022)
Solfanger 14 m ²	59 915**	25-30	(Berg, 2022)
Solceller 20 panel	132 500***	25-30	(Berthod, 2022)
Solceller 24 panel - estimat	151 600***	25-30	(Berthod, 2022)
Skorstein	50 000****	25-30	Estimat
Luft-til-vann varmepumpe	120 000+	12-15	(Gulbrandsen, 2022)

* Estimert basert på en kvadratmeterpris på 600 kr (Boligsmart, 2022)

** Estimert basert på pristilbud fra Inaventa Solar, frakt inkl.

*** Basert på tilbud fra Geenstat, inklusive frakt. 24 panel er estimert ut fra dette.

**** Estimert etter kapittel 5.5.1

5.5.3 Strømpris

Ettersom Norges hus bygger bolig i hele Norge, er det interessant å kommentere lønnsomheten av de energieffektiviserende tiltakene i flere områder i Norge. Store variasjoner gjør gjennomsnittskostnader for hele landet lite hensiktsmessig å ta utgangspunkt i. Likevel begrenses kostnadsanalysen til Trondheim slik at månedlige gjennomsnittsstrømpriser til Midt-Norge (NO3) er naturlig å benytte som referanse til valgt gjennomsnittspris.

Gjennomsnittlig spot-pris for Midt-Norge gjengis i tabellen nedenfor. Alle verdier er gitt i øre/kWh.

Tabell 13 – Midt-Norge; Historiske spotpriser og strømpriser

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Gjennomsnitt:	Strømpris
Jan.	38,34	34,46	34,04	33,98	33,97	38,97	64,12	29,12	56,87	40,43	108,04
Feb	36,63	31,77	30,59	23,23	36,32	47,54	55,17	17,43	55,10	37,09	103,86
Mar	41,63	28,23	27,35	25,48	35,38	53,80	49,97	12,53	31,75	34,01	100,02
Apr	43,63	28,55	27,39	26,11	34,24	47,12	49,70	6,61	34,70	33,12	98,90
Mai	34,95	35,16	24,90	27,37	34,73	40,65	47,26	12,00	46,10	33,68	99,60
Jun	33,00	31,58	16,04	35,88	29,39	53,57	31,66	4,22	44,60	31,10	96,38
Jul	33,53	31,10	10,12	34,49	29,42	62,02	41,57	3,40	59,26	33,88	99,85
Aug	35,93	34,25	15,79	34,52	32,25	61,80	45,63	8,49	74,49	38,13	105,16
Sep	43,14	37,26	23,63	32,56	38,54	58,77	41,38	13,38	67,39	39,56	106,95
Okt	42,15	33,72	25,81	40,76	33,63	50,88	46,25	16,36	30,88	35,60	102,01
Nov	38,19	33,70	27,65	47,85	38,38	56,97	52,22	7,04	52,15	39,35	106,69
Des	34,10	35,44	22,04	36,44	37,11	62,70	44,69	18,88	75,96	40,82	108,52

Gjennomsnittlig nettleie settes for enkelhets skyld til 30 øre/kWh basert på SSB sin temaside om elektrisitetspriser (Statistisk Sentralbyrå, 2022). Enova-avgift er på 1 øre/kWh og elavgiften settes til 15 øre/kWh basert på Energi Norges tall for historiske elavgifter (Energi Norge, 2022).

I tillegg må det tillegges en meravgift på 25%. Strømprisen havner på bakgrunn av dette på omtrent 1 kr per kWh, slik Tabell 13 viser.

Dette gjennomsnittet vil likevel ikke bli helt representativt for fremtidens strømpriser, selv om disse ikke er lett å anslå hva blir. Det er derfor i kostnadsanalysen ikke valgt å ta utgangspunkt i gjennomsnittskostnader for strøm.

Årets strømpriser ansees som representative for i alle fall ut året 2022, og det er sannsynlig at disse prisene vil vedvare en god stund fremover (Brekke, 2018). Norgesenergi har registrert laveste spotpris i år på litt over 1,5 kr per kWh strøm (Norges Energi, 2022), men det antas at disse vil innta et lavere og mer stabilt nivå så snart den såkalte strømkrisen er over som beskrevet i Kapittel 3.3.3. Den totale strømprisen vil derfor i denne oppgavens kostnadsanalyse settes til 1,5 kr per kWh. Dette kan ansees som en litt for høy pris å ta utgangspunktet i, sett i sammenheng med de historiske prisene. Den årlige kostnadsbesparelsen vil i så fall bli noe lavere, og tilbakebetalingstiden noe høyere. Likevel kan det argumenteres for at det å ta utgangspunkt i historiske strømpriser vil gi et urealistisk bilde på fremtidens lønnsomhet, noe denne oppgaven har særlig interesse av å undersøke.

5.5.4 Enovatilskudd

Enova tilbyr en statlig støtteordning som skal bedre lønnsomheten av implementeringen av fornybare energikilder og energieffektiv oppgradering av eksisterende boliger. En kan få et støttebeløp på en viss prosentandel av totalkostnadene gjennom ulike støtteordninger som skal gjøre oppvarming av hus mer miljøvennlig. Nedenfor presenteres de ulike energitiltakene som skal undersøkes i denne oppgaven som også kvalifiserer til støtte fra Enova. Tabellen viser støttesats, maksimalt støttebeløp samt hvor stor andel av installasjonsutgiftene man kan få i støtte.

Tabell 14 – Enovatilskudd

<i>Energiltak</i>	Støttesats	Maksimalt støttebeløp [NOK]	% av installasjonsutgifter som kan støttes
<i>Smart strømstyring for boliger</i>	Fast	10 000	35
<i>Solcelleanlegg</i>	7500kr + 2000kr/kW Opptil 20 kW	47 500	35
<i>Solfanger</i>	5000 kr + 200 kr / m ² Opptil 25 m ²	10 000	25
<i>Vannbåren varme</i>	Fast	10 000	25

I kostnadsanalysen tas det hensyn til at en får innvilget Enovatilskudd der det er mulig. Dersom en rekke av disse tiltakene inngår som standard for Norgeshus sine modeller, er det ikke sikkert at en kvalifiserer til Evovastøtte. Dette er fordi Enovastøtte i hovedsak er ment som et tiltak for å engasjere privatpersoner til å velge mer miljøvennlige energikilder, og engasjementet må derfor komme fra privatpersoner også.

5.6 Livsløpsanalyse

Når klimagassavtrykket skal beregnes legges Sigurd og Emil sine verdier for produksjonsfasen, bruksfasen og avhendingen til grunn for videre beregninger. Livsløpsanalysen blir altså begrenset til tre faser. Deres resultater for bruksfasen er ikke inkludert det årlige klimagassavtrykket som energiforbruket medfører. Dermed må deres verdier tillegges et klimagassavtrykk tilsvarende de ulike omprosjekteringsforslagenes behov for energi. Dette klimagassavtrykket som følge av energiproduksjon er basert på PHPP og deres verdier for CO₂-ekvivalenter. Disse verdiene er gjeldende for Tyskland, da programmet ikke tilbyr Norske eller oppdaterte verdier. Derfor er tallene for klimagass som følge av energi med forbehold om feil. Mer om dette i kapittel 7.8 Feilkilder.

Deres verdier for produksjonsfasen må også tillegges klimagassavtrykk for produksjonen av de ulike tekniske installasjonene som implementeres på de ulike omprosjekteringsforslagene. Livsløpsanalysen gjøres også kun for Trondheims klima og alle verdier er oppgis som CO₂-ekvivalenter.

Utgangspunktet for sammenligning av de ulike omprosjekteringsforslagene baseres på følgende verdier for Dråpen Moderne:

Tabell 15 – Klimagassregnskap utgangspunkt

UTGANGSPUNKT				
Fase	Beskrivelse	Størrelse	Benevning	Kommentar
Produksjon	Bygging	22 125	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Omprosjekteringsdifferanse	-		
Bruk	Vedlikehold/Oppussing	5 659	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Oppfylle energibehov	6 482	kg/år	
	Gjennomsnittlig CO₂-balanse	6 576	kg/år	
	I bruksfase	394 588	kg	
Avhending	Avhending	3 558	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
TOTALT		420 271	kg	

Det antas at solfangeren vil gjøre opp for sitt eget klimaavtrykk fra produksjonen etter 6 måneder i drift, slik Inaventa Solar hevder på sine nettsider (Inaventa Solar, 2022). Solcellene og varmepumpen antas å ha produsert like mye fornybar energi etter 2 år til å ha kompensert for klimagassavtrykket fra sin egen produksjon (Fjordkraft, 2022).

Det antas også at den fremtidige effektiviseringen av de tekniske anleggene, i tillegg til prisreduksjonen vil kompensere for unnlåtelsen av å beregne for at bygget behøver to sett med tekniske anlegg gjennom sin levetid, som antas å være 60 år.

5.7 Samlet vurdering og forslag til omprosjektering

Undersøkelsene av de ulike scenarienes effektivitet bunner ned til tre omprosjekteringsforslag, en for hver energiklasse. Den samlede vurderingen av omprosjekteringsforslagene som fremkommer av simuleringresultatene skal vurderes opp imot kostnadsanalysens resultater og sees i sammenheng med grove indikasjoner for klimagassutslipp. Den samlede vurderingen gir en god pekepinn på hvilket nivå av energieffektive bygg det lønner seg å bygge.

6 Resultat

I dette kapittelet presenteres resultater fra egne energisimuleringer, livsløpsanalysen og kostnadsberegningene. Tilsendte resultater fra Norgeshus sine samarbeidspartnere presenteres også i dette kapittelet. Resultatene belyses underveis i simuleringprosessen og eventuelle valg som tas kommenteres.

6.1 Utgangspunkt

Tabell 16 – Resultat utgangspunkt

Utgangspunkts-verdier	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	42,54	43,09
<i>PE-verdi</i>	226	229
<i>PER-verdi</i>	107	114
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	0	0
	Trondheim [%]	Oslo [%]
<i>Årlig overoppheting</i>	0	2

6.2 Tiltak

Følgende tiltak undersøkes:

- Lekkasjetallet reduseres fra 1 h⁻¹ til 0,6 h⁻¹.
- Normalisert kuldebroverdi reduseres fra 0,05 W/mK til 0,03 W/mK.
- Mulighet til skorstein fjernes.
- Vannbåren gulvvarme installeres.

Tabell 17 – Resultat tiltak

Data etter tiltak	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	38,52	39,50
<i>PE-verdi</i>	216	221
<i>PER-verdi</i>	102	109
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	0	0
	Trondheim [%]	Oslo [%]
<i>Årlig overoppheting</i>	0	2

I Tabell 17 ser man at ved å innføre tiltak som beskrevet over tabellen, blir det årlige oppvarmingsbehovet redusert med henholdsvis 4,0 kWh/(m²år) og 3,6 kWh/(m²år) for Trondheim og Oslo.

6.3 Scenario

6.3.1 Rotasjon

Det undersøkes her hvordan husets oppvarmingsbehov blir påvirket som følge av rotasjon.

Tabell 18 – Resultat rotasjon

<i>Rotasjon</i>	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Utgangspunkt 0°</i>	38,52	39,50
<i>135°</i>	45,84	46,30
<i>180°</i>	43,64	44,22
<i>225°</i>	42,27	43,01
<i>270°</i>	40,97	41,84

Basert på simuleringresultatene fra tabellen over, ser man at opprinnelig rotasjon gir lavest oppvarmingsbehov for både Trondheim og Oslo. Denne rotasjonen benyttes dermed for videre simuleringer.

6.3.2 Isolasjon tak og gulv

Følgende endringer i isolasjon undersøkes:

- **Isolasjon tak** endres fra 350 mm kl.38 til 150 mm kl.38, 120 mm Therma TR26 og 80 mm gjennomsnittlig fallisolasjon av typen Therma TT46.
- **Isolasjon gulv** endres fra 350 mm kl.38 til 300 mm kl.38 med et påslag av et 50 mm lag med Koolterm K3.

Tabell 19 – Resultat isolering av gulv og tak

<i>Isolasjon</i>	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Utgangspunkt etter rotasjon</i>	38,52	39,50
<i>Tak</i>	36,03	36,99
<i>Gulv</i>	37,92	38,99
<i>Tak + Gulv</i>	35,45	36,48

Forbedringen av isolasjonsegenskapene til taket og gulvet gir en sammenlagt besparelse på rundt 3 kWh/(m²år) for både Trondheim og Oslo, slik tabellen viser. Det illustreres imidlertid også at

det er endringen i takisolasjonen som står for over 2/3 av denne besparelsen. Gulvets og takets omprosjekteringsforslag tas begge med som utgangspunkt for videre beregninger.

6.3.3 Isolasjon vegg

Følgende endringer undersøkes:

- **Isolasjon vegg** endres fra 200 mm kl.34 til 200 mm av kl.34 med et 50 mm kontinuerlig isolasjonslag av kl.31.
- **Vindusspesifikasjoner** endres grunnet økt veggtykkelse. Dette fører til en endret kuldebroverdi på vinduets innsetting fra 0,04 W/(mK) til 0,046 W/(mK).

Tabell 20 – Resultat isolering av fasade

Isolasjon	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Utgangspunkt etter tak + gulv</i>	35,45	36,48
<i>Vegg + 50 mm</i>	29,81	31,12

Tabell 20 viser at med å forbedre isolasjonstykkelse og egenskaper i veggen reduseres oppvarmingsbehovet med 5,64 kWh/(m²år) i Trondheim og 5,35 kWh/(m²år) i Oslo.

6.3.4 Vindu

Følgende endringer undersøkes:

- **Inntrekning** 0 mm, 20 mm & 40 mm.
- **Kuldebroverdi** endres i henhold til Tabell 10. Dette gjelder også for normal og inntrukken fôring av karm.
- **Redusert vindusareal** fra 42,48 m² til 36,33 m².

Tabell 21 – Resultat vindusinnsetting

Inntrekning i 250mm vegg Normal fôring	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>- 40mm (utgangspunkt)</i>	29,81	31,12
<i>0 mm</i>	23,59	25,21
20 mm	23,40	25,02
<i>40 mm</i>	23,46	25,08

Flyttes vinduene lenger inn i fasaden viser simuleringresultatene at en kan få besparelser i oppvarmingsbehovet. Optimal plassering av vinduene ser ut til å befinne seg 20 mm fra vindspærre til utvendig karm og sammenlignet med utgangspunktet får man med en slik

plassering besparelser tilsvarende 6,35 kWh/(m²år) i Trondheim og 6,04 kWh/(m²år) i Oslo. Oppvarmingsbehovet vil, som tabellen illustrerer, øke dersom vinduene flyttes ytterligere 20 mm inn fra vindsperren. Videre simulering baseres dermed på en vindusplassering 20 mm inn fra vindsperren.

Tabell 22 – Resultat vindusinnsetting, inntrukken foring

Inntrukken fôring	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
- 40mm (utgangspunkt)	29,81	31,12
0 mm	23,03	24,64
20 mm	22,96	24,58
40 mm	23,02	24,63

Dersom vinduene installeres med en inntrukken fôring viser resultatene i tabellen ovenfor at det sammenlignet med normal fôring, vist i Tabell 21, kan oppnås en ytterligere besparelse på 0,44 kWh/(m²år) for både Trondheim og Oslo. For enkelhets skyld velges det likevel å simulere videre for vinduer med normal fôring.

Tabell 23 – Resultat vindusreduksjon

Vindu	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
Utgangspunkt 20 mm	23,40	25,02
Reduksjon av vindusareal	21,16	22,69

Reduseres vinduene i henhold til forslag beskrevet i kapittel 5.4.4 illustrert i Figur 9 og Figur 10 ser en ut ifra tabellen ovenfor at oppvarmingsbehovet reduseres henholdsvis 2,24 kWh/(m²år) og 2,43 kWh/(m²år) for Trondheim og Oslo. Oppvarmingsbehovet for Trondheim og Oslo havner begge etter reduksjonen av vindusarealet under kravet til passivhus.

Status oppvarmingsbehov etter utført scenario 1 til 4

Følgende løsninger er dermed valgt som felles løsning for passivhuset, nullenergibygget og plusshuset. Ulike tekniske installasjoner vil alene skille de ulike energieffektivitetsklassene.

- **Rotasjonen beholdes** som opprinnelig prosjektert.
- **Isolasjon tak** endres fra 350 mm kl.38 til 150 mm kl.38, 120 mm Therma TR26 og 80 mm gjennomsnittlig fallisolasjon av typen Therma TT46.
- **Isolasjon gulv** endres fra 350 mm kl.38 til 300 mm kl.38 med et påslag av et 50 mm lag med Koolterm K3.

- **Isolasjon vegg** endres fra 200 mm kl.34 til 200 mm av kl.34 med et 50 mm kontinuerlig isolasjonslag av kl.31.
- **Vinduene** har isolert karm med normal fôring inntrukket 20mm fra vindspærren
- **Redusert** mengde med 4 vindu, samt endret plassering på 1.

Etter scenario 1-4 er utført, er det disse verdiene i Tabell 24 som er utgangspunkt for videre beregninger.

Tabell 24 – Resultat utgangspunkt

<i>Verdier etter scenario 1-4</i>	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,16	22,69
<i>PE-verdi</i>	171	177
<i>PER-verdi</i>	78	85
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	0	0
	Trondheim [%]	Oslo [%]
<i>Årlig overoppheting</i>	0	2

6.3.5 Energiforsyning

Følgende tekniske anlegg undersøkes:

- **Varmepumpe** med en bidragsfordeling til tappevann og oppvarming på 50% og 100%, 80% og 80% og for en fordeling på 100% og 60%.
- **Solfangeranlegg** i to forskjellige størrelser der det største også fungerer som et kombianlegg og de begge har et minstebidrag til tappevannsbehovet på over 50%
- **Samvirkende varmpumpe og solfangeranlegg** basert på beste effekt fra simuleringen av kun varmpumpe og solfangeranlegg.

Varmepumpe

Tabell 25 – Resultat varmpumpe Trondheim

<i>Varmepumpe Trondheim % bidragsfordeling Tappevann / oppvarming</i>	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
50/100	7,34	15,07	22,41
80/80	11,75	11,66	23,41
100/60	14,68	8,38	23,06

Tabell 26 – Resultat varmepumpe Oslo

Varmepumpe Oslo % bidragsfordeling Tappevann / oppvarming	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
50/100	7,08	16,23	23,31
80/80	11,32	12,56	23,88
100/60	14,15	9,03	23,18

Tabellene over viser at en 80/80 fordeling vil gi det største totale bidraget til tappevann- og oppvarmingsbehovet for både Trondheim og Oslo.

Tabell 27 – Resultat varmepumpe

Varmepumpe % bidragsfordeling	PER-verdi [kWh/(m²år)]		PE-verdi [kWh/(m²år)]	
	Trondheim	Oslo	Trondheim	Oslo
50/100	64,09	68,95	141,49	145,59
80/80	61,61	66,26	135,50	139,31
100/60	60,50	65,10	132,55	136,23

I Tabell 27 ser en likevel at en 100/60 fordeling totalt sett gir de laveste PER- og PE-verdiene. Dette indikerer at dette alternativet er både mer miljøvennlig og energieffektiv enn de andre alternativene. Sammenlignet med PER- og PE-verdiene kan en se at varmepumpen reduserer PER-verdien med 17,5 kWh/(m²år) og PE-verdien med 38,5 kWh/(m²år) i Trondheim.

Solfanger

Inaventa Solar sitt solfangertilbud

Tilbudet mottatt av Inaventa Solar i anledning denne oppgaven er presentert i Tabell 28 og Tabell 29. Tilbudet er optimalisert opp imot passivhuskravet om fornybar energiforsyning. Det betyr at anleggene er dimensjonert slik at energibidraget til oppvarming av tappevann i Trondheim og Oslo havner så nærme 50% som mulig, noe som i praksis oppfylder energiforsyningskrav i passivhusstandarden (Standard Norge, 2013). Grunnet ulike oppvarmingsbehov i Trondheim og Oslo får anleggene ulik dimensjon.

Tabell 28 – Inaventas solfangertilbud Trondheim

Solfanger Trondheim	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
10 m ² Tappevann	- Ingen data -	- Ingen data -	- Ingen data -
14 m ² Kombinasjon	12,05	7,63	19,76

Tabell 29 – Inaventas solfangertilbud Oslo

Solfanger Oslo	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
10 m ² Tappevann	15,49	-	15,49
13 m ² Kombinasjon	13,30	8,17	21,58

Slik Tabell 28 indikerer gir Inaventas tilbudsforslag på et 14 m² kombianlegg en 48% dekning av oppvarmingsbehovet til tappevannet på 25,1 kWh/(m²år) og en dekning på 36% av resterende oppvarmingsbehov på 21,2 kWh/(m²år) i Trondheim. Totalt resulterer det i et anlegg som dekker 43% av energibehovet til oppvarming og tappevann i Trondheim.

I Oslo gir et 10 m² anlegg som kun bidrar til oppvarming av varmtvann en 61,7% dekning av behovet, vist i Tabell 29. Tabellen viser også at et 13 m² kombianlegg i Oslo dekker 53% av energibehovet til tappevann og 36% av oppvarmingsbehovet. Totalt for både tappevann og oppvarming dekker kombianlegget i Oslo også 43% av energibehovet.

PHPP-simulasjon

Egne simuleringer i PHPP er basert på Inaventa Solar sitt tilbud når det kommer til størrelse og teknologi. Et 10 m² solfangersystem i Trondheim er basert på Inaventa Solar sine produksjonsverdier for det samme anlegget i Oslo. PHPP har omregnet solfangeranleggets produksjon i Oslo til forventet produksjon i Trondheim basert på andre klimadata. Simuleringsresultatene vises i Tabell 30 og Tabell 31 nedenfor.

Tabell 30 – Resultat solfanger Trondheim

Solfanger Trondheim	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
10 m ² Tappevann	16,25	-	16,25
14 m ² Kombinasjon	15,18	4,62	19,80

Tabell 31 – Resultat solfanger Oslo

Solfanger Oslo	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
10 m ² Tappevann	15,50	-	15,50
13 m ² Kombinasjon	15,96	5,64	21,60

Tabell 30 og Tabell 31 viser, i likhet med Inaventa Solar sine beregninger, at i Trondheim og Oslo gir et 13 m² og 14 m² kombinasjonsanlegg det største totale bidraget på 21,60 kWh/(m²år) og 19,80 kWh/(m²år). Merk at fordelingen av det totale årlige bidraget ikke er representativt for Inaventas teoretiske verdier, men at det totale energibidraget stemmer overens.

Tabell 32 – Andel fornybar og ikke-fornybar energi solfanger

Solfanger	PER-verdi [kWh/(m²år)]		PE-verdi [kWh/(m²år)]	
	Trondheim	Oslo	Trondheim	Oslo
10 m ² Tappevann	67,74	73,97	129,93	137,63
14 m ² / 13 m ² Kombinasjon	65,39	66,96	120,70	121,78

Resultatet i tabellen er basert på energifordelingen i Tabell 30 og Tabell 31. Ettersom disse verdiene er basert på en ukorrekt fordeling av oppvarmingsbidrag er det ikke hensiktsmessig å sammenligne disse resultatene med andre tekniske anlegg. Likevel kan en anse de lavere PER- og PE-verdiene for kombinasjonsanlegget som en indikasjon på at et større årlig energibidrag gjør energiforsyningen mer effektiv og miljøvennlig.

Kombinasjon varmpumpe og solfanger

Trondheim

Tabell 33 – Bidrag varmpumpe og solfanger Trondheim

Kombinasjon Trondheim	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(år)]
14 m ² & 100/100	17,68	13,56	31,24

Tabell 34 – Resultat varmpumpe og solfanger Trondheim

Kombinasjon Trondheim	PER-verdi [kWh/(m²år)]	PE-verdi [kWh/(m²år)]
14 m ² & 100/100	46,57	81,60

Oslo

Tabell 35 – Bidrag varmepumpe og solfanger Oslo

Kombinasjon Oslo	Tappevann [kWh/(m²år)]	Oppvarming [kWh/(m²år)]	Totalt årlig [kWh/(m²år)]
13 m ² & 100/100	18,11	14,52	32,63

Tabell 36 – Resultat varmepumpe og solfanger Oslo

Kombinasjon Oslo	PER-verdi [kWh/(m²år)]	PE-verdi [kWh/(m²år)]
13 m ² & 100/100	46,70	82,30

Basert på forestående resultat vurderes det som mest hensiktsmessig med en varmepumpe med et 100% bidrag til tappevannsoppvarmingen og 60% til resterende oppvarming. I kombinasjon med et 14 m² solfangeranlegg i Trondheim og et 13 m² anlegg i Oslo viser likevel simuleringer i PHPP at selv ved et varmepumpebidrag på 100% til både tappevann og oppvarming, er det ikke nødvendig med en varmepumpe som kan produsere mer enn litt over 4000 kWh/år for å dekke hele husets energibehov. Dette tilsvarer omtrent halvparten av hva en vanlig luft-til-vann varmepumpe kan produsere. Tabell 33 og Tabell 35 viser derfor simuleringsresultatene for kombinasjonene med et varmepumpebidrag satt til 100% til både tappevann og oppvarming.

Denne kombinasjonen av tekniske anlegg resulterer i, ifølge Tabell 34 og Tabell 36, de laveste PER- og PE-verdiene av foregående simuleringsresultater. Grunnet skjevheten i bidragsfordelingen med solfangeranlegget, vil også disse PER- og PE-verdiene ikke kunne gi noe mer enn svært grove indikasjoner for fornybar energiandel og effektivitet.

6.3.6 Energiproduksjon

Solceller

Tabell 37 – Solceller produksjon

Solceller produksjon	Trondheim [kWh/år]	Oslo [kWh/år]
20 panel beregnet Greenstat	-	7059
20 panel beregnet PHPP	6888	7059
24 panel beregnet PHPP	8266	8471

Produksjonsresultatet for 20 paneler er beregnet av Greenstat for Norgeshus og gjengitt i Tabell 37. Produksjonsresultatet i PHPP for 24 paneler er simulert ut ifra tilgjengelig produktinformasjon på solcellepanelene som Greenstat leverer og vises for både Trondheim og Oslo i tabellen. Tabellen viser at det i Oslo er forventet at solcellepanelene produserer 211 kWh/år mer enn i Trondheim.

Energibalanse

I søken etter beste løsning for nullenergibygget og plusshuset er det nødvendig å se på forholdet mellom husets energibehov og energiproduksjon. Begge energiklasser er avhengige av en energiproduksjon for å møte definerte kriterier for energinivåene, og i henhold til fremgangsplanen, brukes energiproduksjonen av 20 og 24 solcellepanel som utgangspunkt for videre valg av tekniske anlegg for å forsyne huset med resterende energibehov.

Simuleringene i Tabell 38 tar utgangspunkt i det samme kombinasjons-solfangeranlegget det er simulert for i tidligere scenarier på henholdsvis 13 m² i Oslo og 14 m² i Trondheim. Varmepumpens bidrag til oppvarming og tappevann er justert slik at den i kombinasjon med andre tekniske anlegg ikke overskriver en vanlig luft-til-vann-varmepumpes kapasitet for energileveranse. Dette resulterte i et bidrag på 80% til tappevann og oppvarming for kombinasjonen med bare solceller, mens et 100% dekningsbidrag til tappevann og oppvarming i kombinasjon med både solceller og solfanger.

For alle solfangere er simuleringene kjørt med kombianlegg på henholdsvis 14 m² for Trondheim og 13 m² for Oslo. Negative verdier i tabellen illustrerer når det må suppleres med kjøpt energi, mens positive verdier er da det blir overskuddsenergi produsert.

Tabell 38 – Energibalanse

Energibalanse	Trondheim [kWh/år]	Oslo [kWh/år]
<i>20 panel</i>	- 2315,3	- 2453,2
<i>20 panel & varmepumpe</i>	- 408,8	- 441,6
<i>20 panel & solfanger</i>	+ 388,8	+ 502,3
<i>24 panel</i>	- 937,6	- 1041,4
<i>24 panel & solfanger & varmepumpe</i>	+ 3875,4	+ 4042,0

En kan se ut ifra Tabell 38 at solcellene alene ikke kan forsyne passivhusets totale energibehov. I kombinasjon med både solfanger og varmepumpe er husets energibalanse aller mest i overskudd, mens i kombinasjon med kun en varmepumpe er energibalansen nærmest null. Dette gjelder for både Trondheim og Oslo.

6.4 Forslag til omprosjektering

6.4.1 Passivhus

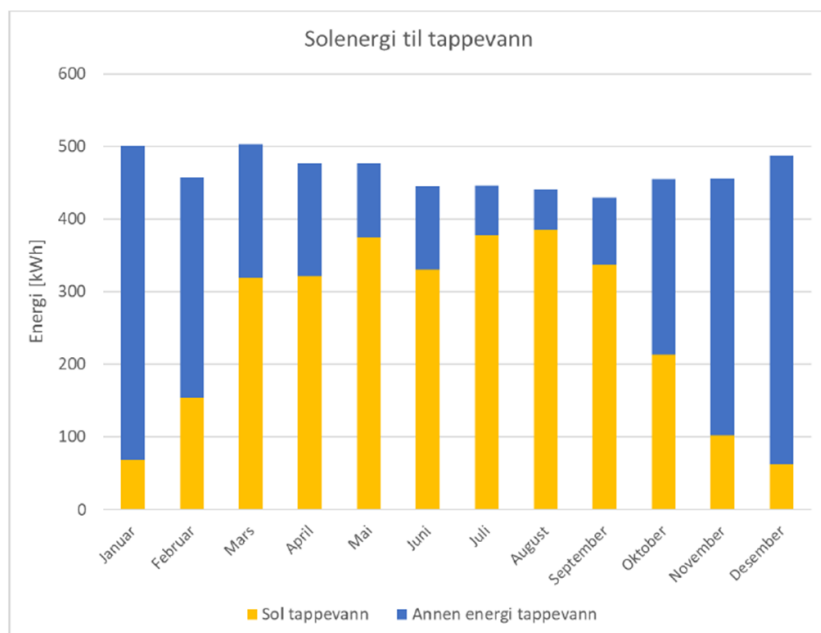
Basert på simuleringsresultater foreslås det følgende forslaget til omprosjektering til passivhusstandard:

- Hus-modellen beholder opprinnelig prosjektert rotasjon
- Isolasjon tak endres fra 350 mm kl.38 til 150 mm kl.38, 120 mm Therma TR26 og 80 mm gjennomsnittlig fallisolasjon av typen Therma TT46.
- Isolasjon gulv endres fra 350 mm kl.38 til 300 mm kl.38 med et påslag av et 50 mm lag med Koolterm K3.
- Isolasjon vegg endres fra 200 mm kl.34 til 200 mm av kl.34 med et 50 mm kontinuerlig isolasjonslag av kl.31.
- Vinduer prosjekteres med en avstand inn i veggen på 20 mm inn fra vindsperre
- Vindusareal reduseres. Fjerner 2 vinduer på nord-fasaden i 1.etg, og flytter et annet vindu fra 2.etasje i nord til vest. Fjerner et vindu på vest-fasaden i 1.etg.
- Installere et 10 m² solfangeranlegg liknende det Inaventa Solar kan tilby, som forsyner over 50% av behovet for tappevannsoppvarming

Omprosjekteringsforslaget som oppfyller passivhusstandard får følgende egenskaper:

Tabell 39 – Omprosjektering Passivhus

Omprosjektering Passiv	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,75
<i>PE-verdi</i>	130	138
<i>PER-verdi</i>	68	74
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	16,24	15,49



Figur 11 – Solfangerproduksjon Oslo 10 m², graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)

Høyeste beregnede oppvarmingsbehov fra NS 3700 er beregnet til 23,36 kWh/(m²år) for Trondheim, for Oslo er dette 23,17 kWh/(m²år), noe som sammenlignet med verdiene i omprosjekteringsforslaget gir dette resultat:

Trondheim

$$21,22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 23,36 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år})$$

Oslo

$$22,75 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 23,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år})$$

Dette viser at kravet er dekket for begge byer.

For å være innenfor kravene i NS 3700 til energiforsyning er beregnet mengde levert elektrisk og fossil energi mindre enn totalt netto energibehov trukket fra halve netto energibehov til tappevann (Standard Norge, 2013). Med utgangspunkt i Trondheim og verdiene fra PHPP er elektrisk og fossil energi beregnet til å være 2788 kWh/år. Det totale netto energibehovet er på 9272 kWh/år, og energibehovet på tappevann på 3514 kWh/år. Altså når halve tappevannsbehovet trekkes fra årlig totalt netto energibehov blir regnestykket som følger: 7648 – 1757 = 5891 kWh/år

$$2788 \text{ kWh}/\text{år} < 9272 \text{ kWh}/\text{år}$$

Det vil si at omprosjekteringsforslaget er innenfor kravet til energiforsyning. I følge Tekna er også kravet i praksis tilfredsstilt ved at over halvparten av oppvarmingsbehovet til tappevann dekkes av en fornybar energikilde (Tekna, 2021). I denne oppgavens simulerte løsning er det

prosjektert for vannbåren varme med et 10 m² Inaventa Solar varmtvannsannlegg (solfanger) som gir en fornybar oppvarmingsandel på **61,7%** av tappevannet. Direkte elektrisitet dekker resterende andel av tappevannet samt hele oppvarmingsbehovet.

6.4.2 Nullenergibygg

Basert på simuleringsresultat foreslås det følgende omprosjekteringsforslag til nullenergi-standard:

- Prosjektere passivhus etter omprosjekteringsforslaget til passivhusstandard, med unntak av installasjon av solfangeranlegg.
- Installere 13 m² solfanger kombianlegg i Oslo, 14 m² i Trondheim.
- Installere 20 solcellepanel på taket, liknende det Greenstat kan tilby.

Omprosjekteringsforslaget til nullenergibygg får dermed følgende egenskaper:

Tabell 40 – Omprosjektering Nullenergibygg

Omprosjektering Null	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,69
<i>PE-verdi</i>	121	122
<i>PER-verdi</i>	65	67
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	69,01	72,02

Tabell 40 viser at den fornybare energiproduksjonen som solcellene gir er på henholdsvis 69,01 kWh/(m²år) for Trondheim og 72,02 kWh/(m²år) for Oslo. Det totale netto energibehovet til dette omprosjekteringsforslaget er for Trondheim på 52,08 kWh/(m²år) og Oslo 68,43 kWh/(m²år). Verdiene er dermed som følger:

$$\begin{array}{cc}
 \textbf{Trondheim} & \textbf{Oslo} \\
 66,23 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 69,01 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) & 68,43 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 72,02 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år})
 \end{array}$$

Dette vil si at for begge byer er produksjonen større enn behovet, og bygget regnes derfor som et netto nullenergibygg. Verdiene gir også rom for feilmarginer i det totale energibehovet og de tekniske anleggene.

6.4.3 Plusshus

Basert på simuleringsresultat foreslås det følgende omprosjekteringsforslag til plusshus:

- Prosjekttere passivhus etter omprosjekteringforslaget til passivhus, men istedenfor solfangeranlegget på 10 m² installere et kombi-solfangeranlegg på 13 m² i Oslo og 14 m² i Trondheim, liknende det Inaventa Solar kan tilby.
- Installere 24 solcellepanel på taket, liknende det Greenstat kan tilby.
- Installere en luft-til-vann-varmepumpe som gir et årlig bidrag på litt over 4000 kWh.

Omprosjekteringsforslag til plusshus får følgende egenskaper:

Tabell 41 – Omprosjektering Plusshus

Omprosjektering Pluss	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,75
<i>PE-verdi</i>	82	82
<i>PER-verdi</i>	47	47
<i>Fornybar energiproduksjon</i>	78,85	82,10

Netto energibehov på denne løsningen er også her på 51,15 for Trondheim og 53,22 for Oslo.

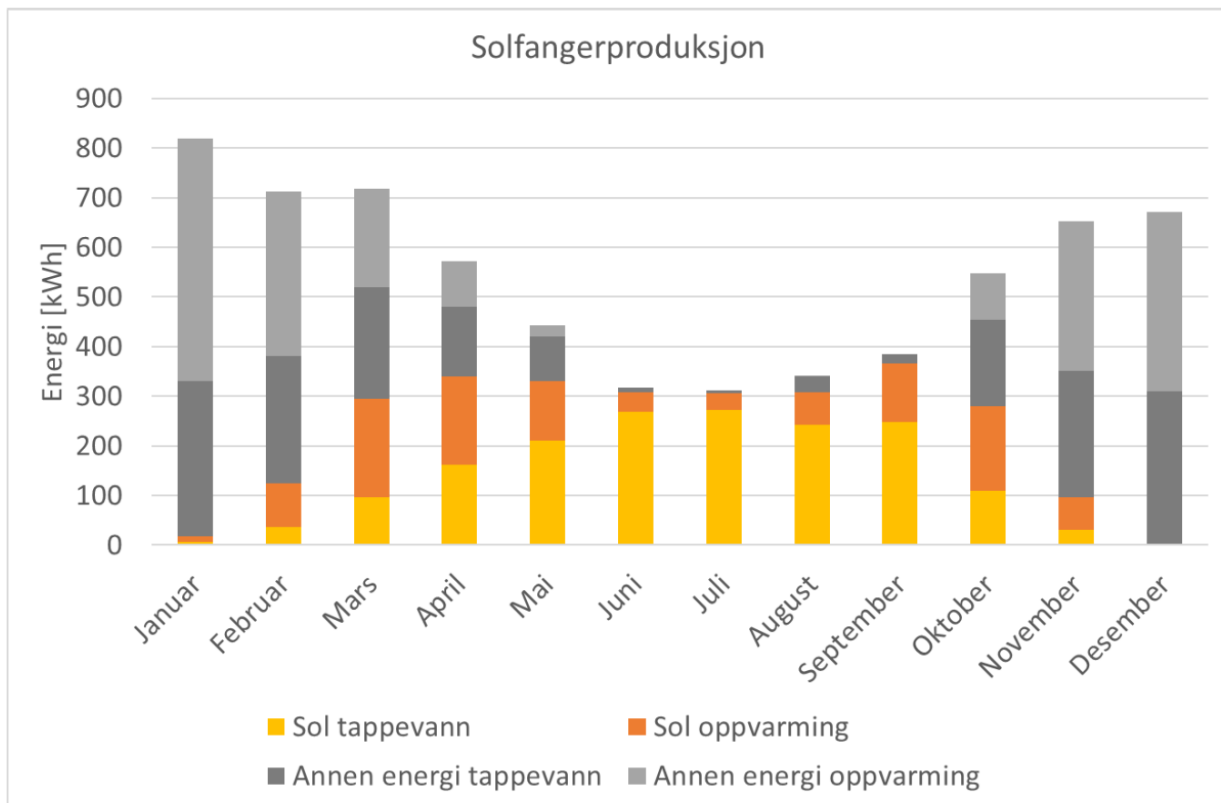
Energibalansen i plusshuset blir etter omprosjektering som følger:

$$\begin{aligned} & \mathbf{Trondheim} \\ & 78,85 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) - 51,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) \\ & = 27,68 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) \\ & = \mathbf{3875 \text{ kWh/år}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{Oslo} \\ & 82,10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) - 53,23 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) \\ & = 28,87 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) \\ & = \mathbf{4042 \text{ kWh/år}} \end{aligned}$$

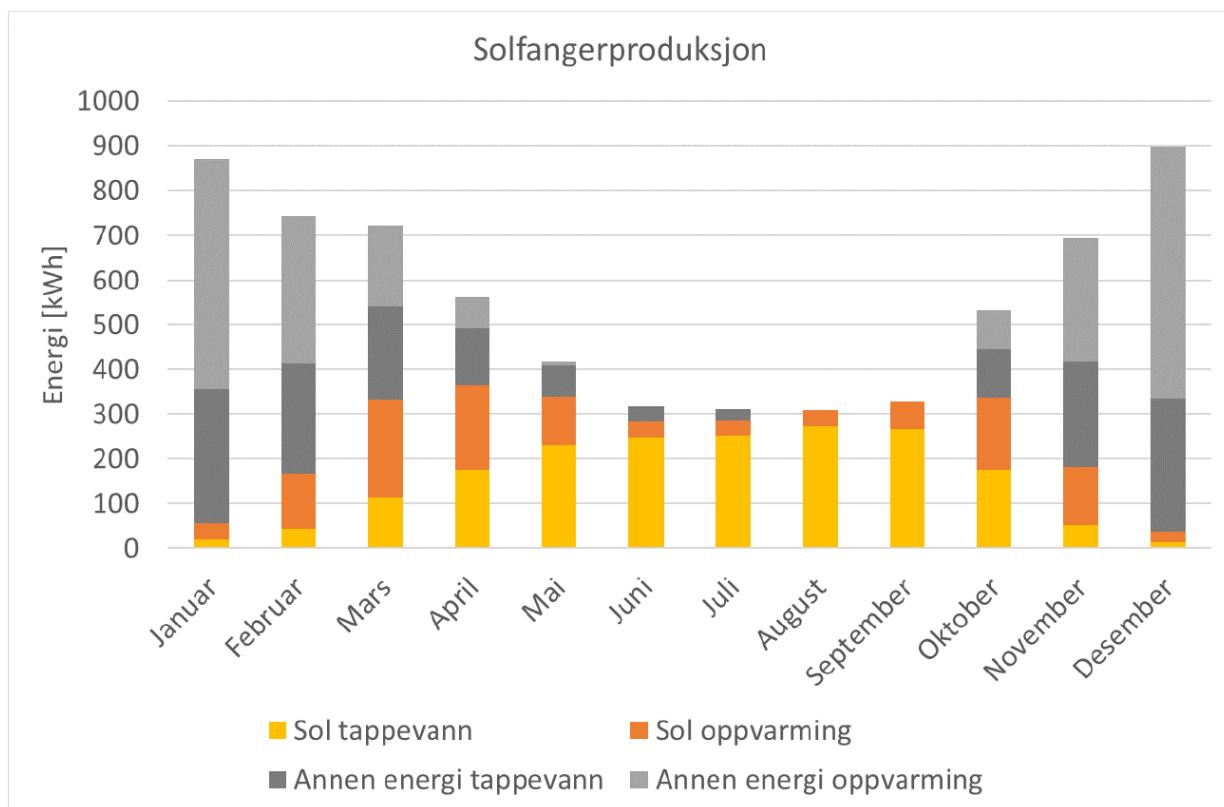
Resultatet representerer den årlige overskuddsproduksjonen for plusshuset, prosjektert i Trondheim og Oslo. Figur 12 og Figur 13 viser den månedlige fordelingen av produksjonen på de valgte solfangeranleggene for omprosjekteringen i løpet av året.

Trondheim



Figur 12 – Solfangerproduksjon Trondheim 14 m², graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)

Oslo



Figur 13 – Solfangerproduksjon Oslo 13 m², graf fra Inaventa Solar (Berg, 2022)

6.5 Kostnadsanalyse

Som nevnt tidligere baseres også prisforskjellen på omprosjekteringen på Sigurd og Emil sin bacheloroppgave skrevet parallelt med denne (Kristensen & Røe, 2022). Totalkostnaden for den originale modellen og passivhuset uten de tekniske installasjonene er gjengitt nedenfor

Utgangspunkt	Passivhus (u. tekniske installasjoner)
3 825 636 kr	3 842 659 kr

Endringene i bygningsdelene resulterte altså i deres oppgave på en merkostnad på 17 023 kr.

6.5.1 Passivhus

Merkostnaden til det resulterende omprosjekteringsforslaget som oppnår passivhusstandarden, altså inkludert tekniske anlegg, er forsøkt å estimeres basert på både gjennomsnittspriser og konkrete tilbudspriser gitt av Norges hus sine samarbeidspartnere.

Enkle overslagsberegninger etter metoden beskrevet i kapittel 5.5 ga følgende resultater:

Tabell 42 – Passivhusets merkostnad og nedbetalingstid

DRÅPEN MODERNE PASSIVHUS			
Kostnad	Størrelse	Benevning	Kommentar
Bygging	3 842 659	kr	(Kristensen & Røe, 2022)
Solfanger	43 284	kr	Estimat
Enovatilskudd solfang.	- 7 000	kr	
Vannbåren varme	84 000	kr	Estimat
Enovatilskudd vannbåren	- 10 000	kr	
Frakt solfanger	3 900	kr	
Fjerne skorstein	- 50 000	kr	Estimat
TOTALT	3 906 843	kr	
Merkostnad	81 207	kr	
Oppvarmingsbehov	21	kWh/(m ² år)	
Energibehov	66	kWh/(m ² år)	
Totalt energibehov	9 266	kWh/år	
Energiproduksjon	2 273	kWh/år	
Mengde energi som må kjøpes	6 993	kWh/år	
Pris per kWh	1,5	kr/kWh	
Total energikostnad	10 489	kr/år	
Økonomisk besparelse	7 776	kr/år	
Nedbetalingstid	10,44	år	

Tabell 42 viser den enkle beregningen av merkostnad og nedbetalingstiden til omprosjekteringsforslaget som oppnår passivhusstandard. Merkostnaden havner på 81 207 kr, og etter 10,44 år lønner det seg å oppgradere den originale modellen Dråpen Moderne til omprosjekteringsforslaget til passivhusstandard.

6.5.2 Nullenergibygg

Tabell 43 – Nullenergibyggets merkostnad og nedbetalingstid

NULLENERGIBYGG			
Kostnad	Størrelse	Benevning	Kommentar
Bygging	3 842 659	kr	(Kristensen & Røe, 2022)
Solfanger	59 915	kr	
Enovatilskudd solfang.	- 7 800	kr	
Vannbåren varme	84 000	kr	Estimat
Enovatilskudd vannbåren	- 10 000	kr	
Frakt solfanger	3 900	kr	
Solcelle 20 panel	132 500	kr	
Enovastøtte solceller	- 23 100	kr	
Fjerne skorstein	- 50 000	kr	Estimat
TOTALT	4 032 074	kr	
Merkostnad	206 438	kr	
Oppvarmingsbehov	21	kWh/(m ² år)	
Energibruk totalt	66	kWh/(m ² år)	
Energibruk totalt	9 266	kWh/år	
Energiproduksjon	9 660	kWh/år	
Mengde energi som må kjøpes	- 394	kWh/år	
Pris per kWh	1,5	kr/kWh	
Total energikostnad	- 592	kr/år	Antar ingen strømsalg
Økonomisk besparelse	18 265	kr/år	
Nedbetalingstid	11,30	år	

Omprosjekteringsforslaget til nullenergibygg får en merkostnad på 206 438 kr og en tilbakebetalingstid på 11,3 år.

6.5.3 Plusshus

Tabell 44 – Plusshusets merkostnad og nedbetalingstid

PLUSSHUS			
Kostnad	Størrelse	Benevning	Kommentar
Bygging	3 842 659	kr	(Kristensen & Røe, 2022)
Solfanger	59 915	kr	
Enovatilskudd solfang.	- 7 800	kr	
Vannbåren varme	84 000	kr	Estimat
Enovatilskudd vannbåren	- 10 000	kr	
Frakt solfanger	3 900	kr	
Solcelle 24 panel	151 600	kr	Estimat
Enovastøtte solceller	- 26 220	kr	
Varmepumpe	120 000	kr	
Fjerne skorstein	- 50 000	kr	Estimat
TOTALT	4 168 054	kr	
Merkostnad	342 418	kr	
Oppvarmingsbehov	21	kWh/(m ² år)	
Energibruk totalt	53	kWh/(m ² år)	
Energibruk totalt	7 452	kWh/år	
Energiproduksjon	11 495	kWh/år	
Mengde energi som må kjøpes	- 4 042	kWh/år	
Mengde energi som selges	4 042	kWh/år	
Salgspris	0,55	kr/kWh	(Berthod, 2022)
Årlig salgsgevinst	2 223	kr/år	
Økonomisk besparelse	20 488	kr/år	
Nedbetalingstid	16,71	år	

Plusshuset, sammenlignet med standardmodellen for Dråpen Moderne, fikk en merkostnad på 342 418 kr og en tilbakebetalingstid på 16,7 år.

6.6 Klimagassregnskap

Resultatene fra klimagassregnskapet for de tre omprosjekteringsforslagene presenteres her i sin helhet, der alle de vurderte innvirkningene på klimagassavtrykk er nevnt i tabellene. Negative tall er benyttet for klimaavtrykksbesparelser.

For hvert omprosjekteringsforslag er det innunder hver fase av byggets levetid sammenlignet klimagassavtrykket mot originalmodellens tilsvarende fase. Sammenligningen kalles «Omprosjekteringsdifferanse» i tabellene. Til slutt er også den endelige differansen av CO₂-ekvivalenter presentert sammen med det totale beregnede klimagassavtrykket til omprosjekteringsforslaget. «T.A. besparelse» er benyttet som en forkortelse for den besparelsen

i energibehov som de tekniske anleggene kompenserer for. I kapittel **Error! Reference source not found.** er resultatene fra dette kapittelet oppsummert i en lettere sammenlignbar tabell, i Tabell 52, og illustrert grafisk i Figur 23.

6.6.1 Passivhus

Tabell 45 – Klimagassavtrykk Passivhus

PASSIVHUS				
Fase	Beskrivelse	Størrelse	Benevning	Kommentar
Produksjon	Bygging	23 452	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Solfanger installasjon	560	kg	
	I produksjonsfase	24 012	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	1 887	kg	
Bruk	Vedlikehold/Oppussing	4 746	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Oppfylle energibehov	4 041	kg/år	
	T.A. besparelse	- 473	kg/år	
	Gjennomsnittlig CO ₂ -balanse	3 647	kg/år	
	I bruksfase	218 820	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 175 769	kg	
Avhending	I avhendingsfase	3 242	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Omprosjekteringsdifferanse	- 316	kg	
TOTALT	CO ₂ -ekvivalente utslipp	246 074	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 174 198	kg	

Hele passivhusets levetid vil, slik Tabell 45 viser, tilsvare et totalt klimagassavtrykk på 246 074 kg CO₂-ekvivalenter. Til sammenligning ser en at dette er hele 174 198 kg CO₂-ekvivalenter mindre enn den originale husmodellen tilsvare i klimaavtrykk.

6.6.2 Nullenergibygg

Tabell 46 – Klimagassavtrykk Nullenergibygg

NULLENERGIBYGG				
Fase	Beskrivelse	Størrelse	Benevning	Kommentar
Produksjon	Bygging	23 452	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Solcelle installasjon	5 538	kg	Estimat
	Solfanger installasjon	784	kg	
	I produksjonssfase	29 774	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	7 649	kg	
Bruk	Vedlikehold/Oppussing	4 746	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Oppfylle energibehov	3 683	kg/år	
	T.A. besparelse	- 3 346	kg/år	
	Gjennomsnittlig CO ₂ -balanse	416	kg/år	
	I bruksfase	24 966	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 369 622	kg	
Avhending	I avhendingsfase	3 242	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Omprosjekteringsdifferanse	3 242	kg	
TOTALT	CO ₂ -ekvivalente utslipp	52 444	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 358 731	kg	

Som beskrevet i underkapittel 6.4.2 går nullenergibygg i byggets bruksfase nesten i null hvert år. Likevel vil den i hele sin levetid stå for 52 444 kg CO₂-ekvivalenter, ifølge Tabell 46. Dette gir likevel, sammenlignet med utgangspunksmodellens levetid, en besparelse på 358 731 kg CO₂-ekvivalenter.

6.6.3 Plusshus

Tabell 47 – Klimagassavtrykk Plusshus

PLUSSHUS				
Fase	Beskrivelse	Størrelse	Benevning	Kommentar
Produksjon	Bygging	23 452	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Solcelle installasjon	6 646	kg	
	Varmepumpe	2 444	kg	Estimat
	Solfanger installasjon	784	kg	
	I produksjonsfase	33 326	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	11 201	kg	
Bruk	Vedlikehold/Oppussing	4 746	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Oppfylle energibehov	2 461	kg/år	
	T.A. besparelse	- 3 900	kg/år	
	Gjennomsnittlig CO ₂ -balanse	- 1 439	kg/år	
	I bruksfase	- 86 339	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 480 927	kg	
Avhending	I avhendingsfase	3 242	kg	(Kristensen & Røe, 2022)
	Omprosjekteringsdifferanse	- 316	kg	
TOTALT	CO ₂ -ekvivalente utslipp	- 49 771	kg	
	Omprosjekteringsdifferanse	- 470 042	kg	

Tabell 47 viser at plusshuset i hele dets levetid gir i seg selv en klimabesparelse på 49 771 kg CO₂-ekvivalenter. Det betyr i praksis at plusshuset sparer miljøet for klimagass på den måten at energien som produseres erstatter en annen mindre miljøvennlig energiforsyning til strømmettet. Plusshuset er ikke langt i fra å kompensere for klimagassekvivalentene som nullenergibyget står for i sin levetid. Investeringen til en plusshus-standard gir en total miljøbesparelse på 470 042 kg CO₂-ekvivalenter, sammenlignet med originalmodellen.

7 Diskusjon

I dette kapittelet skal resultatene som er presentert og kommentert i foregående kapittel drøftes og det skal diskuteres om resultatene er fornuftige. Hvorvidt valg gjort underveis i simuleringsprosessen er basert på et veloverveid grunnlag skal også kommenteres. Scenarienes effekt samt omprosjekteringsforslagenes styrker og svakheter skal belyses.

7.1 Scenarieresultat

7.1.1 Tiltak

Vannbåren gulvvarme har i sammenlikning med mange andre oppvarmingsmetoder en treg virkningsmåte. I de månedene der temperaturen varierer mye er det i Norge ansett som fornuftig med skorsteinsmulighet, da det er vanskelig å finne en komfortabel balanse mellom stabil innnetemperatur og fornuftig energiforbruk. På den måten vil det kanskje for noen oppleves som utradisjonelt å prosjektere bolig uten mulighet til det mange anser som en luksuriøs og praktisk løsning på det varierende oppvarmingsbehovet. På en annen side er den vannbårne gulvvarmen ikke begrensende for andre tekniske oppvaringsanlegg. Radiatorer og en luft-til-luft-varmepumpe er gode alternativer som vil i likhet med skorstein avgi varme hurtig, og med høy grad av selvbestemmelse. Uansett om omprosjekteringsforslaget hadde belaget seg på skorstein eller ikke, ville det likevel vært rimelig å anta at varmetapet kan reduseres.

Ved at vannbåren gulvvarme blir installert så vil det ifølge TEK 17 sin §14-4 ikke lenger være krav til oppføring av skorstein (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Dette kravet gjelder heller ikke dersom årlig netto energibehov ikke overskrider standarden for passivhus sine verdier. Skorstein er en gjennomføring som bryter isolasjonssjikt, ved å fjerne denne kan det antas at byggets normaliserte kuldebro blir redusert. Ytterveggene er den bygningsdelen med lengst areal mot det fri, og vil derfor ha mye å si for verdiene. Dette inkluderer vinduer og deres areal samt plassering i bygningskroppen. Bygningsdelenes utforming vil ha mye å si for kuldebroverdien, og ved å bruke kontinuerlige isolasjonssjikt samt redusere kuldebroer kan det med rimelighet antas at verdiene reduseres ned til 0,03 W/(mK).

Ved å sikre høy kvalitet på arbeidet vil byggets tetthet forbedres. Ved at detaljer og overganger blir utført korrekt der skjøting av damp- og vindsperre er riktig montert vil dette også kunne gi et redusert lekkasjetall. Derfor kan det være fornuftig at lekkasjetallet får en reduksjon som i denne oppgaven er satt til $0,6 \text{ h}^{-1}$, men det er kun basert på antagelser. Dette tallet blir kontrollert ved en lekkasjetest når det prosjekterte huset er ferdig.

7.1.2 Rotasjon

Ut fra beregningene gir byggets rotasjoner store svingninger i oppvarmingsbehov. Basert på beregningene kan dette utgjøre hele 7 kWh/(m²år) på Dråpen Moderne. Dette er derimot kun gyldig dersom det ikke blir endret i byggets fysikk, planløsning og plassering av vindu. Hvis slike tilpasninger blir gjort vil dette kunne optimalisere energibehovet ytterligere. Ved å plassere vindu på fasader med sollys vil man kunne utnytte varmen. Det kan på en annen side også være et større behov for solskjerming, og da helst automatiske utvendige system for å begrense overoppheting. Solskjermingen kan også i kalde perioder brukes for å redusere varmetap. Ved å endre plasseringen av vindu vil det dermed også kunne være behov for en annen planløsning for å sikre tilstrekkelig daglys til alle oppholdsrom. En gjennomtenkt løsning som også vurderer varmebehov på forskjellige romtyper, kan også gi økt komfort for husets fremtidige beboere. Et eksempel på dette er å plassere soverom på nord/øst fasaden for å forhindre oppvarming av disse på kvelden.

Som utgangspunkt i denne oppgaven skal bygningsfysikk og planløsning være uendret, og rotasjonen er derfor viktig å ta hensyn til. Dette gir også en begrensning i forhold til plassering og reduksjon av vindu på grunn av planløsning og krav til blant annet dagslysfaktor.

7.1.3 Isolasjon

Passivhus er kjent for å være hus med store mengder og tykkelser av isolasjon. Dette fører til en dyrere prosjektering, både med tanke på materialer, men også utnyttelse av tomta. Dette fordi at tykkere vegger gir et større fotavtrykk på huset, og mer areal vil gå til bygningsdeler. Veggene i et bygg har veldig store arealer mot friluft i småhus. Dette fører til at i omprosjekteringsforslaget har så lite som 50 mm tilleggisolasjon ført til en besparelse på hele 5 kWh/(m²år). Denne tykkelsen er økt minimalt for å unngå en reduksjon i BRA eller BYA.

Om det prosjekteres med isolasjon som har andre egenskaper for varmekonduktivitet og vekt vil dette kunne utgjøre mye for varmetapet, uten å endre tykkelser. Dette fører til at omprosjekteringen blir forenklet da man unngår å endre bygningsfysikken. Samtidig har den nye isolasjonens lave vekt mye å si for klimagass, da transporten står for en mindre andel av utslipp.

Ved økt veggtykkelse og en reduksjon av vindusareal er det også nødt til å gjøre beregninger på om dagslysfaktoren er tilstrekkelig, da dette heller ikke blir tatt hensyn til i oppgaven. For referanse er det gjort en analyse på et tilsvarende hus i en artikkel skrevet av Tony-Andreas Arntsen og Bozena Dorota Hrynyszyn «*Optimization of Window Design for Daylight and Thermal Comfort in Cold Climate Conditions*» (Arntsen & Hrynyszyn, 2021).

På en annen side kan dette føre til komplikasjoner rundt den termiske fysikken med forskjellig egenskaper eller tykkelser på isolasjonen. Varmen vil alltid velge letteste vei, og dette kan potensielt gi utfordringer i detaljer og overganger på grunn av geometriske kuldebroer. Kondens kan som følge av dette bli en utfordring. Dette er ikke vurdert i denne oppgaven, og dermed må det gjennomføres tiltak for å vurdere problemer rundt fukt og brannsikkerhet.

Det er valgt å plassere det kontinuerlige isolasjonssjiktet på utvendig side av opprinnelig stenderverk. Dette er valgt for å unngå å endre innvendig areal, eller måtte omprosjektere eksisterende bygningsfysikk. Utvendig kontinuerlig isolasjon har også den fordel at stenderverket vil ha en jevnere varm temperatur. Dette minsker kondensfaren, så det blir færre problemer med fuktskader og råte på treverket.

Effekten av tiltaket førte til en besparelse på 5,64 kWh/(m²år) i Trondheim. Ved bruk av Kingspan blir energibehovet ytterligere redusert, grunnet den ekstremt lave varmekonduktiviteten på isolasjonen. Dette utgjør en total besparelse på 8,57 kWh/(m²år), en forskjell på 2,933 kWh/(m²år) sammenlignet med omprosjekteringsforslaget til passivhus.

7.1.4 Vindu

Simuleringsresultatene viser at ved å installere vinduene lenger inn i bygningskroppen, kan en få stor reduksjon på det totale oppvarmingsbehovet. Dersom vinduene blir installert lenger inn i vegg med en avstand på 20 mm fra utsiden av vindspærren til utsiden av vinduskarmen, kan en få en reduksjon av oppvarmingsbehovet på over 6 kWh/(m²år). Denne justeringen viser seg å være veldig effektiv. Til sammenligning fører overdimensjoneringen av takets og gulvets isolasjon til en reduksjon på under halvparten av vindusjusteringen. Effekten er overaskende god, og det kan stilles spørsmålsteget ved hvor realistisk dette resultatet er.

I mangel på nøyaktige verdier fra leverandør om U-verdier i overgangen til vegg og kuldebroverdier mellom glass og karm, er det som nevnt tidligere gjort antagelser basert på liknende vinduer. Kuldebroverdiene for innsetting som benyttes til simuleringen kan også kritiseres for nøyaktighet, da disse er basert på Byggforsk sine kuldebroverdier for en 250 mm vegg med gjennomgående stenderverk (Byggforsk, 2015). Programmet detaljeringsgrad av vindusinnsetting tilsier likevel at resultatet skal gi representative verdier for valgt løsning.

Selv om kuldebroverdiene for en 20 mm inntrekning i en 250 mm vegg er satt til en høyere verdi enn for en 40 mm inntrekning, i henhold til tabell 511 i Byggforskblad om trevinduer i bindingsverk av tre (Byggforsk, 2015), viser simuleringsresultatene at en oppnår et mindre varmetap dersom vinduene kun trekkes inn 20 mm fra vindspærren. At en ytterligere inntrekning

av vinduene viser seg å være mindre effektiv enn en inntrekning på 20 mm er altså et interessant funn.

Et vindu plassert lenger inn i veggen vil få et mindre årlig lysinnslipp, noe som vil øke oppvarmingsbehovet noe. I tillegg er det kontinuerlige isolasjonslaget på 50 mm også mer energieffektivt enn et tilsvarende isolasjonslag med stenderverk, noe som også kan påvirke resultatene på den måten at det gjør effekten av å plassere den enda lengre inn, mindre.

For å få best mulig resultat ved en liknende undersøkelse, vil det være fordelaktig å undersøke effekten av vinduets plassering i veggen først etter en eventuell vindusreduksjon. Dette i tilfelle endringen av sammensetningen av ulike vinduer med ulik omkrets og utforming kan ha en betydning for hvilken inntrekning som gir det minste varmetapet til slutt.

I retrospekt er det heller ikke praktisk gjennomførbart å sette inn vinduene 20 mm fra vindsperra, ettersom stenderverket befinner seg først på innsiden av de 50 mm med kontinuerlig isolasjon på utsiden av veggen. Beste vindustilpasning som er kompatibel med valgt ytterveggs-løsning vil dermed bli en innsetting 40 mm fra utside vindsperre til utvendig karm. Denne korreksjonen vil ifølge tidligere simuleringers indikasjoner gi et høyere oppvarmingsbehov totalt. Dermed er det interessant å undersøke hvorvidt oppvarmingsbehovet med korrekt vindusinnsetting fremdeles befinner seg innenfor passivhuskravet eller ikke.

Med korrigerende simuleringssdata for en 40 mm inntrekning etter vindusreduksjonen i PHPP, økte det totale oppvarmingsbehovet slik Tabell 48 illustrerer.

Tabell 48 – korrigerende oppvarmingsbehov

Oppvarmingsbehov	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Ugyldig vindusinnsetting</i>	21,16	22,69
Korrekt vindusinnsetting	21,22	22,75

Forholdet mellom det korrigerende oppvarmingsbehovet og passivhuskravene illustreres nedenfor:

$$\begin{array}{cc} \text{Trondheim} & \text{Oslo} \\ 21,22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 23,36 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) & 22,75 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) < 23,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{år}) \end{array}$$

I begge byer viser de nye beregningene av oppvarmingsbehovet, at et omprosjekteringsforslag med en 40 mm innsetningsavstand av vinduene fremdeles er innenfor passivhuskravene. **En vindusinnsetning på 40 mm blir dermed nytt forslag i omprosjekteringsforslagene til**

passivhuset, nullenergibyget og plusshuset. Energibalansen påvirkes også noe av korreksjonen, noe som kommenteres for de ulike energiklassene i oppsummeringskapitlet.

Det ble i Tabell 22 undersøkt for effekten av inntrukken fôring. Her viser resultatene at en kan, sammenlignet med en normal isolert karm, spare opptil 0,44 kWh/(m²år), i tillegg til den besparelsen selve innflyttingen bidrar til. For enkelhets skyld ble det likevel valgt å simulere videre for vinduer med en normal fôring. Denne avgjørelsen ble tatt på bakgrunn av at det er i særlig interesse å oppnå et forenklet omprosjekteringsforslag. Effekten av den inntrukne fôringen ble ikke vurdert som stor nok til å være verdt kompliseringen av løsningsforslaget.

Det er likevel verdt å kommentere at i fremtiden vil installasjonsmetoden for vindu forenkles, slik at det ikke hadde vært en helt urimelig antagelse å belage et løsningsforslag med inntrukken foring. Likevel gir det at løsningsforslaget ikke belager seg på en inntrukken fôring i karmen for å oppnå passivhusstandard, rom til å velge mer energieffektive løsninger for å kompensere for et større varmetap i andre bygningsdeler, enn det er tatt høyde for i denne oppgaven.

Et annet resultat verdt å kommentere er at effekten av den inntrukne foringen ikke avtar mer enn ved en normal isolert karm jo lenger vinduet plasseres inn i veggen. Dette er ikke et så overraskende resultat da også differansen i kuldebroverdiene mellom normal og inntrukken fôring i en 250 mm vegg, som simuleringene er basert på, er omtrent den samme for alle de ulike avstandene til utside vindsperre (Byggforsk, 2015).

Det er likevel rimelig å anta at en i praksis vil oppleve en større differanse i varmetapet mellom en inntrekning på 0 mm, 20 mm og 40 mm sammenlignet med et vindu med normal fôring. Dette er fordi en større inntrekning med inntrukken fôring medfører en mindre isolasjonsmengde (fôring) rundt vinduet på innvendig side. For selv om inntrekningen fører til en mindre kuldebro mellom veggen og vinduskarmen, vil denne besparelsen på et visst punkt innhentes av det økte varmetapet som reduksjonen i den inntrukne isolasjonen medfører.

Reduksjonen i vindusareal i henhold til forslaget til omprosjektering gir en reduksjon av oppvarmingsbehov på 2,24 kWh/(m²år) og 2,43 kWh/(m²år) for Trondheim og Oslo. Resultatet blir et viktig bidrag for å oppnå standarden uten å måtte endre mer på byggets isolasjonstykkel eller utforming. Det var ønskelig å redusere vindusarealet minst mulig, da konsekvensene av en slik endring ikke blir kontrollert eller tatt hensyn til i denne oppgaven. Derfor holder oppgaven seg så nærme utgangspunktet som mulig. Å fjerne flere vinduer på nord og vest-fasaden vil nok likevel være med på å redusere oppvarmingsbehovet ytterligere. Forutsatt at andre forhold oppfylles, anbefales det derfor å likevel vurdere en ytterligere reduksjon av vindusareal. Dette

vil kunne bidra til et mer stabilt innneklima, ved at risikoen for overoppheting minskes og store mengder varmetap kan unngås på vinterstid.

7.1.5 Varmepumpe

Det ble i scenario 5 undersøkt for tilfeller der huset ble forsynt av varmepumpen alene eller i kombinasjon med andre tekniske anlegg basert på en fremgangsmåte beskrevet i kapittel 5.4.5. Da varmepumpen ble undersøkt som selvstendig energiforsyning til det omprosjekterte bygget viste det seg å være interessant å presentere tre alternativer for fordeling av den totale energien en varmepumpe kan bidra med. Dersom det skulle vise seg å være å være beste alternativ å forsyne huset med energien fra en varmepumpe, viser resultatene i Tabell og Tabell at et 80% energibidrag til oppvarming av tappevann og 80% til resterende oppvarming gir det største totale energibidraget.

Ettersom varmepumpen trenger å driftes av elektrisitet for å fungere, oppsto det usikkerhet rundt om at varmepumpen kan betegnes som en fullstendig fornybar energikilde. Hvorvidt varmepumpen da er i stand til å dekke krav i passivhusstandarden gjeldende energiforsyning er dermed uklart. Dermed ble solfanger det naturlige valget av energiforsyning. Det reelle tilbudet mottatt fra Norgeshus sin samarbeidspartner ga alternativet en kvalitetssikring, noe som gjorde valgt løsning med solfanger til det best faglig begrunnede.

For nullhuset korrelerte det totale energibidraget til en solfanger bedre med energiproduksjonen til solcellene, og varmepumpen ble valgt vekk som forsyningsmetode. For omprosjekteringsforslaget til plusshuset var det ønskelig å finne et alternativ som gir mest mulig overskuddsenergi. Implementeringen av en varmepumpe i tillegg til et solcelleanlegg på 24 panel og et kombinasjonssolfangeranlegg ble i det tilfelle den beste løsningen. Denne implementeringen, med en energidekning på 100% av både tappevannsoppvarming og resterende oppvarming resulterte likevel i et maksimalt bidrag på litt over 4000 kWh/år. Dette betyr i praksis at en standard luft-til-vann-varmepumpe vil årlig bidra med omtrent halvparten av sitt potensiale. På den måten kan en si at varmepumpen gjør omprosjekteringen overdimensjonert ettersom hele potensialet til varmepumpen ikke blir utnyttet. Likevel kan det hende at det finnes varmepumper som kan kobles på det vannbårne anlegget annerledes slik at varmepumpen kan bidra enda mer. Dette vil igjen gi en større total besparelse og gi plusshuset et større energioverskudd. Dersom det er slik at en varmepumpe vil kunne bidra med en konstant årlig energimengde uansett hvor stor andel den er innstilt til å bidra til de forskjellige energipostene, vil energibalansen til plusshuset se annerledes ut.

7.1.6 Solfanger

Det er tatt utgangspunkt i tilbud og verdier levert av Inaventa Solar og disse verdiene er derfor ikke kontrollert i denne oppgaven (Berg, 2022). Der det har vært aktuelt, er det prioritert å bruke verdiene fra Inaventa Solar over PHPP sitt resultat. Dette fører også til at PE- og PER-verdier ikke nødvendigvis er reelt eller representative. De er likevel valgt å ta med for å kunne sammenligne verdiene med seg selv, og for å sammenligne resultat i de ulike klimaforutsetningene. For tappevannsanlegget er det ikke oppgitt verdier for Trondheim, de er derfor basert på tallene for Oslo og beregnet av PHPP.

7.1.7 Solceller

For oppgaven er det Greenstat som har utført beregningene på dette tekniske anlegget, og det er tatt utgangspunkt i ett tilbud på 20 solcellepanel i Oslo (Berthod, 2022). Dette er så justert opp i PHPP til 24 panel basert på verdiene fra Greenstat. Greenstat har derimot ikke gjort beregninger for produksjon av Greenstat for Trondheim, dermed er disse resultatene ikke kontrollerte eller regnet ut fra leverandøren av anlegget. Det regnes likevel som sannsynlig, da det er basert på reelle tall fra produsent, men nok burde sees på som et estimat.

Programvaren PHPP har også kommentert i sin simuleringstabell for energiregnskapet at fra et vitenskapelig synspunkt er ikke tallene helt korrekt. Dette kan forklares ved at det er mangel på faktorer og energibærere i programmet som må tas hensyn til. Disse verdiene er likevel en god pekepinn på omtrentlig hvordan energibalansen vil se ut, men burde kontrolleres.

7.2 PER- og PE-verdier

Som forklart i metodekapitlet er det valgt å presentere PER- og PE-verdier i tillegg til energien som de tekniske anleggene bidrar til romoppvarming og oppvarming av tappevannet. Dette er valgt for å se hvorvidt noen løsninger regnes som mer effektive og fornybare enn andre alternativer som potensielt kan gi et like stort netto energibidrag. Programmets begrensninger i henhold til selvbestemmelse av faktorer som for eksempel bidragsfordeling på solfangerne, begrenset disse verdienes nytte i simuleringen. Denne svekkelsen av verdienes troverdighet ble vurdert til for stor til å inkluderes i beslutningene underveis i scenariene. Det er likevel interessant å se på programmets vurdering av de tekniske installasjonene.

Tabell 49 – PE- og PER-verdier Trondheim

Trondheim	Opprinnelig	Omprosjektert
PE-verdi	226 kWh/(m ² år)	171 kWh/(m ² år)
PER-verdi	107 kWh/(m ² år)	78 kWh/(m ² år)

Etter scenario 1-4, før det ble prosjektert for tekniske anlegg, hadde PE-verdien for et Trondheims klima blitt redusert 55 kWh/(m²år). PER-verdien ble redusert med 29 kWh/(m²år). I Oslo ble reduksjonen omtrent like stor for både PE- og PER-verdien. Verdiene reduseres her i henhold til det reduserte energibehovet som scenarioene sørger for, men fører ikke til noen effektivisering da huset uten tekniske anlegg driftes 100% av direkte elektrisitet.

I scenario 5 undersøkes det for effekten av å installere en luft-til-vann-varmepumpe. Et interessant funn i denne simuleringen er at Tabell 27 viser at en varmepumpe som bidrar med en 100% dekning av tappevannsoppvarming og 60% dekning til resterende romoppvarming får lavere PE- og PER-verdier enn en varmepumpe med en 80/80 bidragsandel. Dette kan i første øyekast virke snodig, da varmepumpen med en 80/80 energifordeling vil ha et større energibidrag totalt ifølge Tabell 26. Årsaken til dette resultatet viser seg å være grunnet ulike PE- og PER-faktorer. Energibidraget fra varmepumpen har for oppvarming nemlig en PER-faktor på 1,45, mens den for tappevannsoppvarming har en PER-faktor på 1,20. Når andelen varmepumpen bidrar med til oppvarming av tappevannet øker like mye som bidraget til oppvarmingen reduseres, vil PER-verdien altså avta tilsvarende. Funnet forteller at det ikke nødvendigvis er det største årlige energibidraget som gir løsninger med minst energitap. Dersom det i liknende oppgaver skulle vært av større interesse å vektlegge en slik energioptimalisering, ville det her vært mer hensiktsmessig å gå for en varmepumpe med en 100/60 energifordeling.

I simuleringen for en energiforsyning støttet av de ulike solfangeranleggene, ble det som nevnt tidligere, oppdaget en programbegrensning som gjorde PE- og PER-verdiene lite troverdige. Programmet fordelte nemlig det totale energibidraget fra kombinasjonsanlegget etter beskyttede innstillinger, på en slik måte at det ikke stemte overens med kombinasjonsanlegget til Inaventa Solar. Om denne skjevfordelingen påvirker de andre energiforsyningenes bidragsfordeling er uvisst. Informasjon angående dette er verken er beskrevet i programmets brukermanual eller er innenfor gruppens kompetanseområde. Å belage løsninger på resultater utenfor gruppens fatteevne ble derfor vurdert som ugunstig for oppgavens formål. PE- og PER-verdiene ble derfor i alle scenarioer som inkluderte solfangere ikke tatt hensyn til.

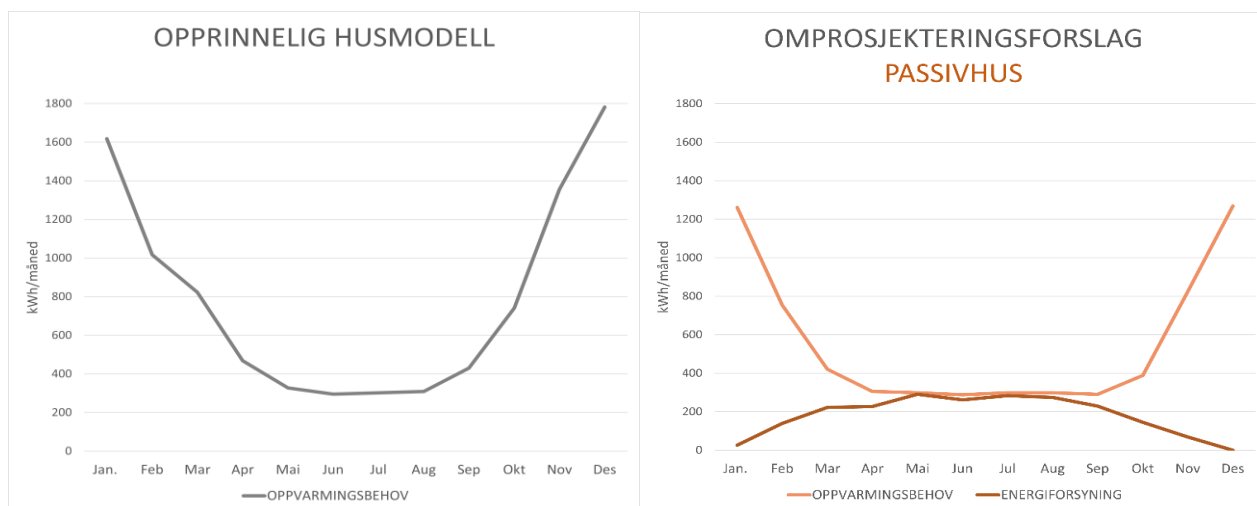
Dersom det skulle vært simulert for flere solcellealternativer ville det vært interessant å se på flere aspekter ved det tekniske anlegget enn den totale energiproduksjonen. En kunne her for eksempel benyttet seg av PE- og PER-verdiene for energiproduksjon som PHPP kalkulerer. Alternativt kunne det også vært interessant, og muligens mindre komplisert, å se på solcellenes påvirkning av klimagassutslipp i form av CO₂-ekvivalenter. CO₂-ekvivalenter vil også kunne indirekte si noe om de tekniske installasjonenes effektivitet, men for det formålet er imidlertid PE- og PER-verdiene en mer presis variabel for sammenligning.

Generelt kunne det også vært interessant å se på de ulike scenarienes påvirkning på det programsimulerte utslippet av CO₂-ekvivalenter. I retrospekt ville dette kanskje vært mer hensiktsmessig for denne oppgaven da PE- og PER-verdiene viste seg å være et mindre gunstig verktøy enn først antatt grunnet mangel på innsikt og forståelse av variabelens virkemåte. Dessuten er ikke primærenergibehovet et innarbeidet begrep i Norge, da gjeldende standarder kun baseres på netto energibehov, der særskilte bestemmelser setter krav til fornybar forsyningsandel (Schild, et al., 2010).

7.3 Passivhus

Omprosjekteringsforslaget er innenfor kravene i NS 3700 for begge byer, men det er mange hensyn som er blitt sett bort fra. Ventilasjon, fukt og dagslys burde alle kontrolleres før en eventuell omprosjektering. For termisk komfort har PHPP vurdert at det ikke er overoppheting, men forhold som solskjerming har potensiale til å øke kvaliteten og komforten på innneklimaet ytterligere. Rømningsveier er vurdert som tilstrekkelig, da ingen av disse er fjernet fra den opprinnelige prosjekteringen.

For selve bygningsfysikken er det mulighet for forbedringer. Siden det her ikke er prosjektert på detaljnivå, kan det være tenkelig at det finnes bedre alternativ. Det har vært ønskelig å beholde original bygningskropp i størst mulig grad, men ved en endring i dimensjoner, takvinkel og overgangsdetaljer kan prosjekteringen optimaliseres til et raffinert nivå.



Figur 14 – Opprinnelig husmodell sammenlignet med omprosjekteringsforslag til passivhus

På figurene over kan en se hvordan oppvarmingsbehovet endres etter omprosjekteringen. Ikke bare er behovet tydelig redusert, men en kan også se at det er mye jevnere. Samtidig gjør energiforsyningen at passivhuset er nærmest selvforsynt med energi til oppvarming gjennom sommermånedene.

Siden detaljer og overganger er utelatt fra denne oppgavens fokus, er bygningsdelene som er valgt, nødvendigvis ikke de beste. Det er tidligere gjort undersøkelser på løsninger for yttervegger på et tilsvarende hus. Oppgaven konkluderte med at delt bindingsverksvegg er mest hensiktsmessig ved en prosjektering for nullenergibygge (Sakya & Thorbjørnsen, 2021). Dette ble vurdert til å være den mest gunstige løsningen med hensyn på energi, klima, kostnad og areal.

Beregnet ut fra NS 3700 sitt Tillegg A er netto energibehov på 58,7 kWh/(m²år). PHPP viser en høyere verdi, noe som kan indikere at resultatene er bedre enn hva som er presentert her. På en annen side gir detaljeringsgraden i oppgaven noe usikre verdier, så denne feilmarginen kan være god å ha. Denne forskjellen kan også være påvirket av valget for energiforsyning.

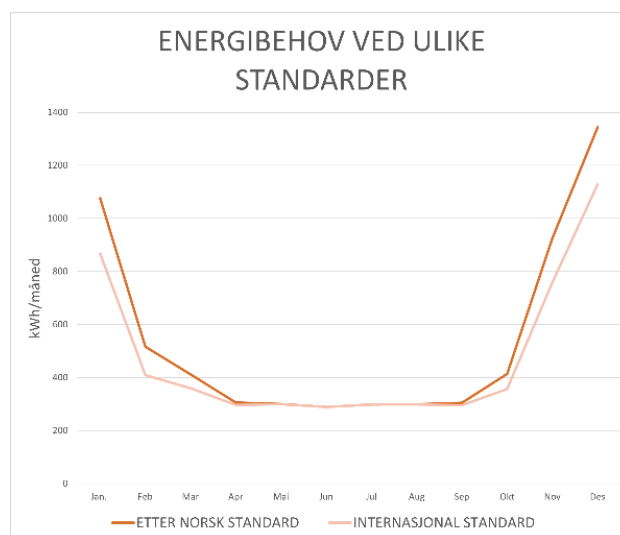
Som et alternativ til ytterveggen er det også gjort simuleringer der det 50 mm kontinuerlige isolasjonssjiktet er byttet ut med isolasjon fra Kingspan. Det gir følgende resultat som vist i Tabell 50.

Tabell 50 – Resultat med 50 mm Kooltherm K12

Oppvarmingsbehov	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Omprosjektert</i>	21,22	22,75
<i>Yttervegg med Kingspan</i>	18,27	19,55

7.3.1 Internasjonal standard

Denne oppgaven er basert på Norske standarder, men det er interessant å se på hva som skal til for å nå opp til internasjonale standarder for forslaget. Dette gjøres kun for omprosjektering i Trondheim. Figur 15 til høyre gir en visuell representasjon for forskjellen mellom oppvarmingsbehovet til bygningene prosjektert etter NS 3700 og Passive House Institute sin standard.



Figur 15 – Energibehov passivhusstandarder

I et forsøk på å komme innenfor Passive House Institute sin klassifisering er det valgt å gjøre følgende endringer i omprosjekteringen:

- Fasade Kingspan 50mm.

Det vil si at det kontinuerlige sjiktet på 50 mm tidligere med en varmekonduktivitet på 0,031 W/(mK) nå ved bruk av Kingspan Kooltherm k12 stenderverksisolasjon har en verdi så lavt som 0,02 W/(mK). Dette gir ytterveggene en U-verdi på 0,113 W/(m²K).

- Gulv Kingspan.

I det opprinnelige omprosjekteringsforslaget til passivhus er det valgt å kun bytte ut de øverste 50 mm. For å nå internasjonale standarder vil sjiktet på 50 mm og ett sjikt på 150 mm. De underste 150 mm beholder den opprinnelige isolasjonstypen. Dette gir en ny U-verdi på gulvet på 0,071 W/(m²K).

- Inntrukket fôring på karm av vindu.
- Reduserer med ytterligere 4 vindu.

Ingen rømningsveier fjernet, derfor innenfor brannkrav. Det er tatt hensyn til at alle rom for varig opphold har vindu, men det er ikke beregnet om dagslys er tilstrekkelig ved en slik løsning.

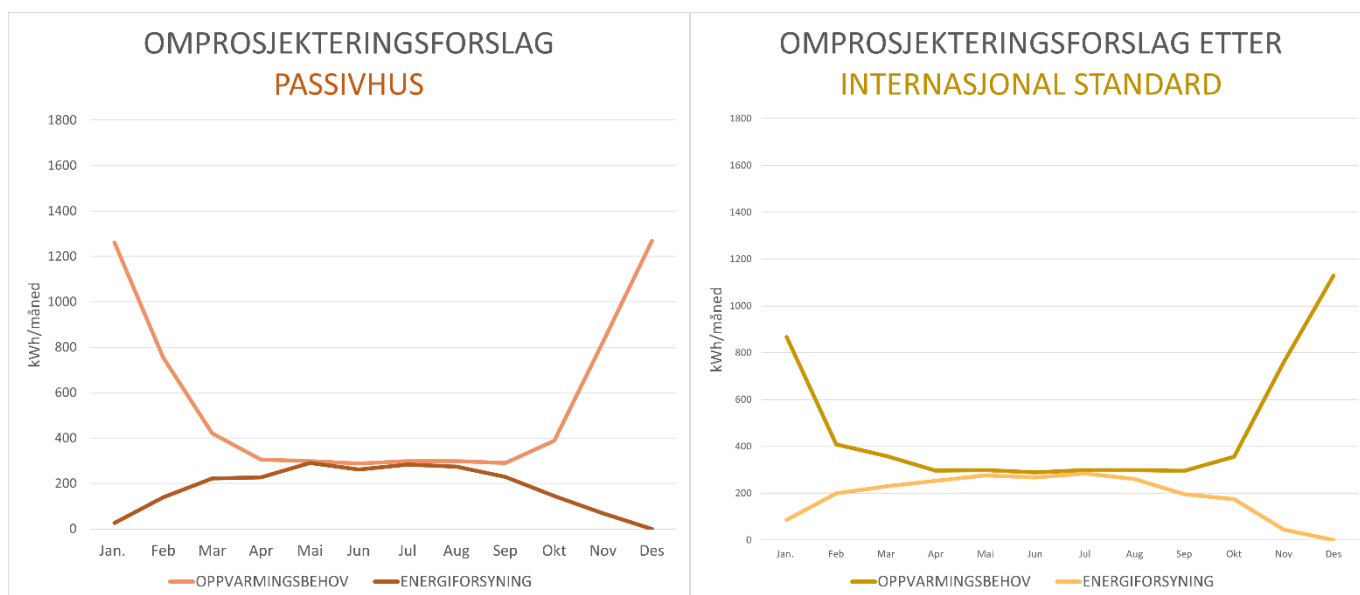
Specific building characteristics with reference to the treated floor area				Criteria	Alternative criteria	Fullfilled? ²
Space heating	Treated floor area m ²	139,9				
	Heating demand kWh/(m ² a)	15	≤	15	-	yes
	Heating load W/m ²		≤	-	10	
Space cooling	Cooling & dehum. demand kWh/(m ² a)	-	≤	-	-	-
	Cooling load W/m ²	-	≤	-	-	-
	Frequency of overheating (> 25 °C) %	0	≤	10		yes
	Frequency of excessively high humidity (> 12 g/kg) %	0	≤	20		yes
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀ 1/h	0,6	≤	0,6		yes
Non-renewable Primary Energy (PE)	PE demand kWh/(m ² a)	83,66	≤	120		yes
	PER demand kWh/(m ² a)	45,12	≤			
Primary Energy Renewable (PER)	Generation of renewable energy (in relation to projected building footprint area) kWh/(m ² a)	10,87	≥			

Figur 16 – Passivhus internasjonal standard, forslag

Dette gir et romoppvarmingsbehov på 15 kWh/(m²år), og som vist i Figur 16 er også alle andre krav innenfor Passive House Insitute sine verdier. Dermed er det en mulighet for sertifisering som passivhus etter deres standard. Disse endringene gjør at omprosjekteringsforslaget for å nå internasjonale standarder også er innenfor. Det norske omprosjekteringsforlaget hadde et vindusareal på 36,33 m². Ved reduksjonen ytterligere gjort i dette forslaget har vinduene et areal på 26,4 m². Medregnet dørene vil det gi et totalt areal på 40,08 m². Dette gjør at vindus- og dørarealet er på **28,63 %** av BRA. Denne reduksjonen er dermed på et nivå nærmere hva som er anbefalt i energiltaksmetoden til TEK 17.

Tidligere passivhusforslag var ikke innenfor de typiske verdiene fra NS 3700. Derimot med dette forslaget for internasjonale krav er alle disse verdiene lavere enn hva som er satt i den Norske

standarden. Dette er logisk, da denne omprosjekteringen har strengere krav når det kommer til energi brukt til oppvarming.

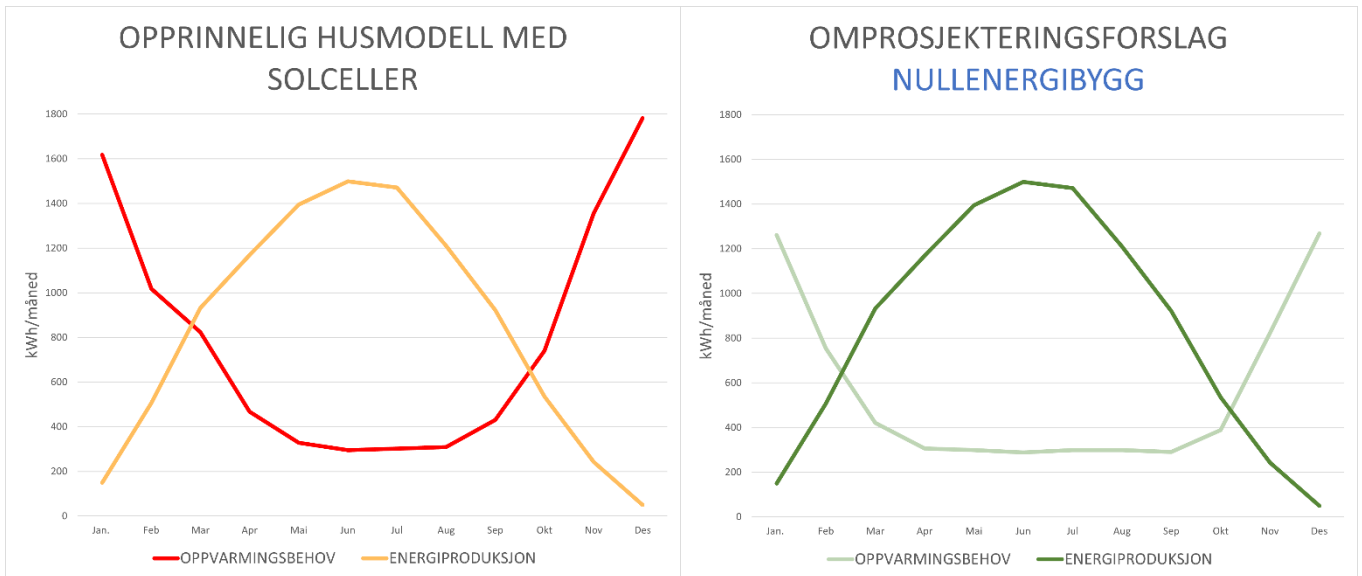


Figur 17 – Omprosjekteringsforslag passivhus etter NS 3700 sammenlignet med standarden fra Passive House Institute

Ved å få de to passivhusforslagene side om side blir det tydelig at oppvarmingsbehovet er redusert for Passive House Institute sin standard. Dette kan forklares ved at NS 3700 er basert på denne standarden, men på grunn av det harde Norske klimaet blir oppvarmingsbehovet justert. For den internasjonale standarden er kravet til oppvarming det samme uansett hvor det bygges. Her i Norge justeres kravet basert på årsmiddeltemperaturen. Dette gjør det praktisk gjennomførbart å prosjektere passivhus over hele landet.

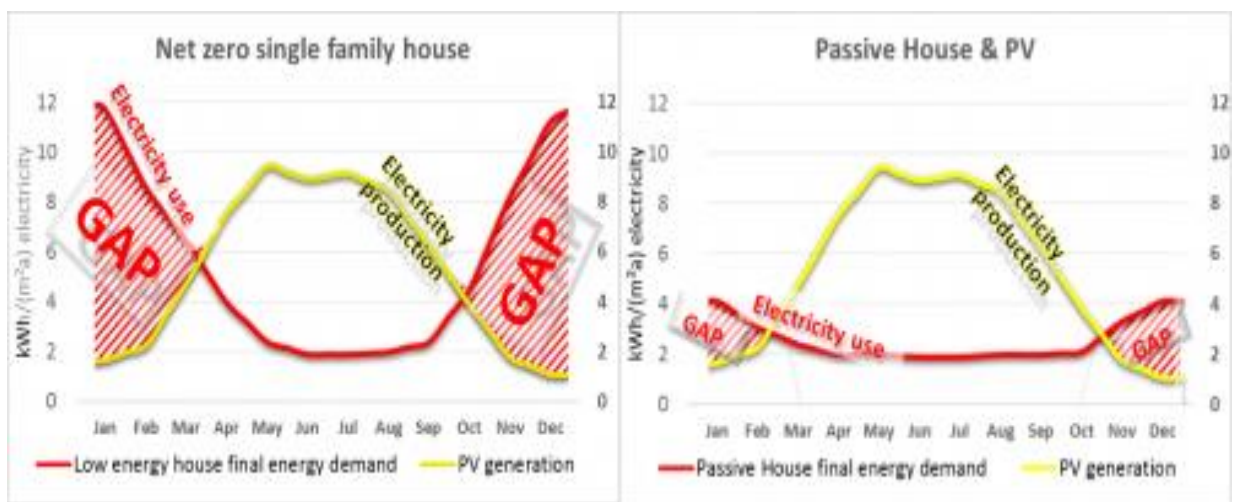
7.4 Nullenergibygg

De tekniske anleggene ble valgt basert på hvilke kombinasjoner som fikk en produksjon tilnærmet energibehovet. Dette ble en kombinasjon av et kombisolfangeranlegg og 20 solcellepanel. Dette gir også mulighet til å fremdeles ha skorstein, selv om dette ikke har vært inkludert i omprosjekteringsforslagene. Skorstein har ikke blitt medregnet da kravet om dette ikke er gjeldende da det både er installert vannbåren varme, og omprosjekteringen er innenfor passivhuskrav. Siden ikke alle besparelser, anlegg og løsninger er vurdert kan det derfor med stor sannsynlighet finnes andre kombinasjoner av anlegg som vil kunne ha samme effekt, og dekke behovet på en mer hensiktsmessig måte. Dette trenger nødvendigvis ikke være lønnsomt bare i forhold til effekt, men også når det kommer til nedbetaling, klimagass og andre hensyn.



Figur 18 – Opprinnelig husmodell med 20 solcellepanel sammenlignet med omprosjekteringsforslaget til nullenergibygg

Figurene over viser den opprinnelige modellen og nullenergibygget, med de samme tekniske anlegg installert. Nullenergibygget sitt lave oppvarmingsbehov gjør at energiproduksjonen kompenserer for hele behovet, og det er dermed netto nullenergi. For den opprinnelige modellen gir ikke de tekniske anleggene nok produksjon for å dekke behovet. Dette fører til at dersom energien fra produksjonen kan lagres, vil nullenergibygget være selvforsynt, og vil med det unngå å kjøpe strøm. Dette fører til store økonomiske besparelser ut over det å kun minimere energibehovet. Sammenlignet med passivhuset vil dette være den mest gunstige løsningen, for både klimagass, økonomi og langsiktige besparelser.



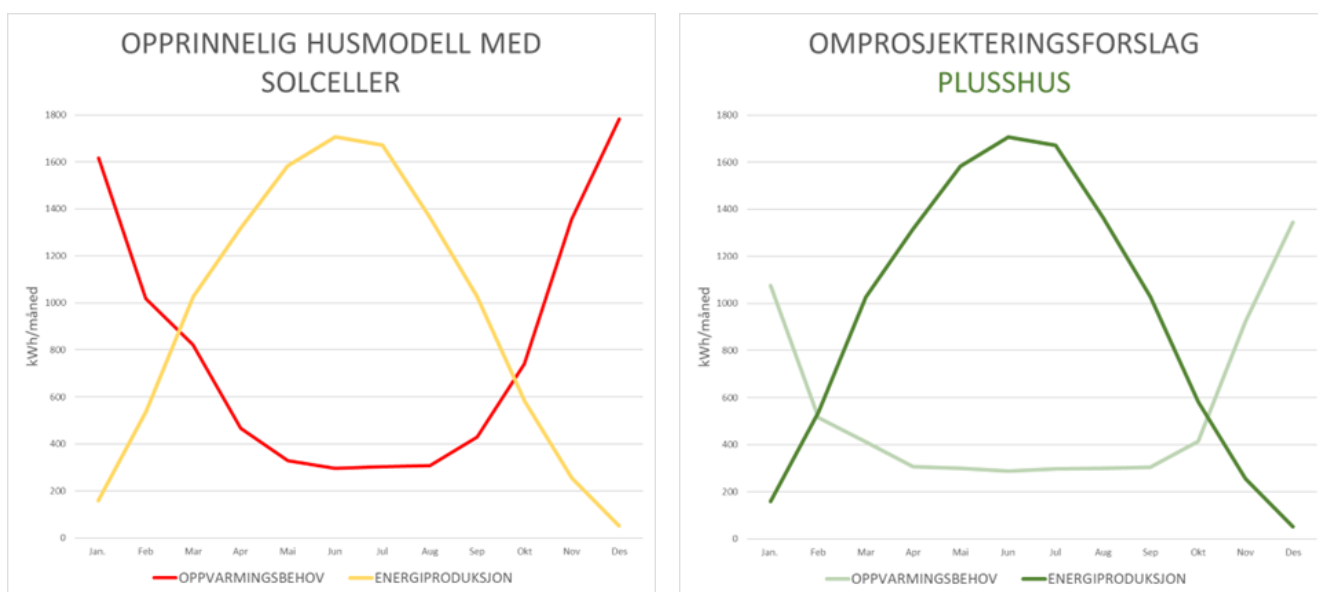
Figur 19 – Passipedias figurer for energi i bygg (Passipedia, 2022)

Dersom man sammenligner Figur 18 med figuren ovenfor så er det tydelig at rent teoretisk er verdiene fra denne oppgaven habile. Ved å omprosjekttere fra den opprinnelige modellen til nullenergibygg så blir energibehovet redusert og jevnet ut. En slik utjevning fører til at spriket på energibruk og produksjon blir kraftig redusert. Det er ikke like tydelig i grafene for denne

omprosjekteringen, noe som kan skyldes det i figuren er illustrert for et passivhus etter tysk standard.

7.5 Plusshus

I dette omprosjekteringsforslaget var målet å finne maksimal uttelling for produksjon av energi. Omprosjekteringen er fremdeles basert på passivhuset som base, supplert med tekniske anlegg. Her ble det besluttet å bytte ut tappevannsanlegget på solfangeren til et kombi-anlegg som er beregnet av Inaventa Solar. Det er også valgt å installere varmpumpe. For solcellene skal hele takarealet utnyttes, med 24 solcellepanel totalt.



Figur 20 – Opprinnelig husmodell med 24 solcellepanel sammenlignet med omprosjekteringsforslaget til plusshus

På figurene over sammenlignes det opprinnelige huset med de samme tekniske anleggene som på plusshuset. Derfor er produksjonen like stor. Derimot er behovet på plusshuset sterkt redusert, noe som gir mulighet til å dekke eget energibehov i større deler av året. Dette gjør at plusshuset har en stor fordel ved å kunne selge overskuddsenergien sin, mens den opprinnelige modellen kun får dekt eget behov.

7.6 Kostnadsanalyse

Kostnadsanalysen, ble som beskrevet og presentert i forgående kapitler basert på svært enkle parametere og forutsetninger. Likevel ble det vurdert som hensiktsmessig for å ha en viss idé for hvor lønnsomme investeringene er.

I kostnadsanalysen er ikke fremtidig økning av strømpris, årlig reduksjon av energiproduksjon eller inflasjon tatt hensyn til. Nedbetalingstiden forutsetter altså at verdien til kostnadene i

fremtiden vil være den samme. En bedre metode for å sammenligne lønnsomheten til de ulike investeringen ville vært å også beregne nåverdien for de tre omprosjekteringsforslagene.

Likevel antas det at de viktigste økonomiske forskjellene på de tre omprosjekteringsforslagene er gjort rede for i analysen. Installasjonskostnader for bygningselementer antas å være identiske som for opprinnelig husmodell, og for tekniske anlegg er installasjonskostnader medberegnet i prisen. Eventuelle feil og mangler i analysen antas å gjelde alle modellene på en slik måte at de fremdeles vil kunne sammenlignes med hverandre.

Generelt sett, så det ut til at ulike tiltakene som ble antatt som en minimumsforbedring, hadde en god innvirkning på både merkostnaden og nedbetalingstiden til alle omprosjekteringsforslagene.

Kostnadsanalysens resultater ble som følger:

Tabell 51 – Kostnader oppsummering

<i>Omprosjekteringsstandard</i>	Merkostnad [kr]	Nedbetalingstid [år]	Årlig kostnadsbesparelse [kr]
<i>Passivhus</i>	81 207	10,44	7 776
<i>Nullenergibyg</i>	206 438	11,30	18 265
<i>Pluss</i>	342 418	16,71	20 488

Det ble, som forklart i metodekapittelet, valgt bort å se på de totale kostnadene av boligbyggingen. Likevel ble totalkostnadene til Sigurd og Emil brukt som utgangspunkt for å finne merkostnaden (Kristensen & Røe, 2022). En totalkostnad ville gitt omprosjekteringsforslagene et bedre direkte sammenligningsgrunnlag mot andre modeller. Annet enn dette, vil en totalkostnad beregnet i denne oppgaven ha en begrenset nytte. Uten innsikt i fullstendige prislister og liknende ville en totalberegning i denne oppgaven basert seg på mange omtrentlige antagelser, noe som ville gjort resultatet til lite representativt for omprosjekteringens faktiske totalkostnad.

Med liten innsikt i metode og liten mulighet for å kontrollere og verifisere totalkostnadene til Sigurd og Emil i skrivende stund, kan det diskuteres hvorvidt det er hensiktsmessig å ta utgangspunkt i disse verdiene. Likevel har god kommunikasjon med medstudentene gitt uttrykk for at beregningens detaljeringsgrad skal være tilstrekkelig, også for denne oppgavens formål. Verdienes eventuelle feilkilder redegjøres i deres oppgave, noe som i ettertid vil kunne si noe om resultatenes svakheter.

7.6.1 Passivhus

Merkostnaden av å prosjektere Dråpen Moderne i henhold til omprosjekteringsforslaget som oppnår passivhusstandard, kom på 81 207 kr. Av alle omprosjekteringsforslagene viste det seg også at passivhuset var den investeringen som raskest ville lønne seg å foreta. At denne standarden for energieffektivitet viste seg å være både den billigste og den som lønnet seg raskest var overraskende. Solfangeranlegget er for eksempel rimeligere og mer energieffektivt enn et solcelleanlegg, men for å kun skulle dekke minimumskravet til energiforsyning i passivhusstandard, var det overraskende hvor stort energibidrag anlegget ga. Det store energibidraget i kombinasjon av en relativt rimelig investeringskostnad antas å være hovedårsaken til at omprosjekteringsforslaget fikk den laveste nedbetalingstiden.

Passivhuset ser ut til å være det beste alternativet, dersom en ønsker et mer energieffektivt bygg for minst mulig merkostnad.

7.6.2 Nullenergibygget

Nullenergibygget har sammenlignet med passivhuset over 2,5 ganger så stor merkostnad. Grunnen til dette er hovedsakelig implementeringen av flere kostbare tekniske anlegg. Likevel er det interessant å legge merke til at nullenergibygget bare bruker under 1 år lenger tid på å bli lønnsom. Dette kommer av at den årlige økonomiske gevinsten er over det dobbelte av besparelsene som passivhuset har. Dermed blir tilbakebetalingstiden kort, og den totale besparelsen utover dette mye større enn passivhusets besparelse.

Det kan se ut til at det er mest økonomisk fornuftig å omprosjektere den opprinnelige husmodellen til et nullenergibygget, da en ytterligere investeringskostnad ikke vil være like kostnadseffektivt.

7.6.3 Plusshus

Selv om forslaget viser seg å være den omprosjekteringen som både en mest kostbar og som tar lengst tid å nedbetale, betyr det likevel ikke at investeringen er minst lønnsom for hele byggets levetid. Fra og med etter 16,7 år vil all overskuddsenergi i bygningens resterende levetid gå med til en direkte fortjeneste. Alle omprosjekteringsforslagene får en årlig kostnadsbesparelse i sammenheng med et redusert energibehov, men bare plusshuset får årlig en direkte profitt av energiproduksjonen. Det betyr at investeringen har potensiale til å redusere kostnadene av å bygge huset i første omgang, noe verken passivhuset eller nullenergibygget har. Etter 60 år vil plusshuset gi en salgsgevinst på litt over 133 000 kr. På en annen side vil plusshuset,

sammenlignet med nullenergibyget, ha en ytterligere årlig besparelse på bare litt over 2000 kr, og bruker dermed også over 5 år mer for å tilbakebetale investeringskostnaden.

Dersom det ikke settes noen begrensninger for grunninvestering i bygget, vil plusshuset egne seg for de som er villige til å se de langsiktige gevinstene av merkostnaden.

7.7 Livsløpsanalyse

Livsløpsanalysen ble i likhet med kostnadsanalysen basert på enkle antagelser. Analysen er begrenset til tre faser. En mer omfattende livsløpsanalyse ville lagt flere faser til grunn for beregning, men for oppgavens formål er de tre fasene antatt til å være tilstrekkelig representativt for hele byggets levetid. I likhet med kostnadsanalysens metode blir det antatt at eventuelle feil og mangler fra beregningen ikke vil ha stort utslag for hvilke konklusjoner som trekkes i denne oppgaven.

I livsløpsanalysen er det kun beregnet for én produksjon og avhending av de tekniske installasjonene. I praksis vil det i hele byggets levetid være nødvendig å bytte ut de tekniske anleggene minst én gang, noe som betyr at klimagassutslipp fra produksjonen av de tekniske anleggene i produksjonsfasen potensielt skulle vært dobbelt så store. Det er også lagt til grunn at de tekniske anleggene vil være like effektive hvert år fra installering og frem til avhending. I realiteten regnes det ofte med en årlig reduksjon, noe som vil gi et endret behov for energiforsyning gjennom byggets levetid. Greenstat beregner for eksempel en årlig reduksjon av solcellenes produksjon på 0,4% (Berthod, 2022). Klimagassutslippene i bruksfasen vil i realiteten øke i takt med reduksjonen av produksjonen, da resulterende energitap må forsynes av alternative energikilder. Likevel ble det i oppgaven valgt å se bort i fra disse nevnte usikkerhetsmomentene. Dette ble gjort ettersom det er naturlig å anta at investeringskostnaden til de tekniske anleggene reduseres i takt med større markedskonkurranse samt at produksjonseffektiviteten økes. På den måten vil kanskje det kompenseres for klimagassutslippene som mangler fra dagens beregning ved at fremtidens tekniske anlegg vil være mye mer effektive.

Det antas altså at den fremtidige effektiviseringen av de tekniske anleggene, i tillegg til prisreduksjonen vil kompensere for unnlåtelsen av å beregne for at bygget behøver to sett med tekniske anlegg gjennom sin levetid.

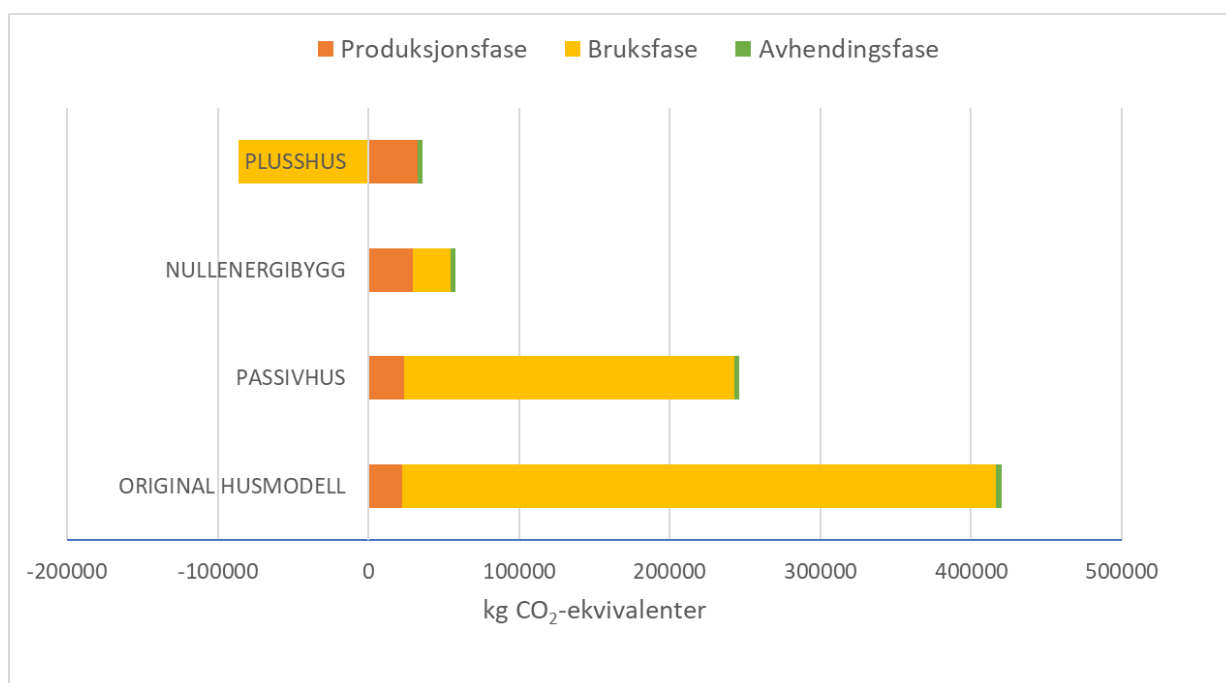
Verdiene rundt klimagass er basert på materialene som er beregnet av Sigurd og Emil. For tallene rundt klimagass knyttet til energibehov er dette beregnet av PHPP og er ikke ytterligere kontrollert. Dermed er de totale tallene en antagelse, og burde derfor kun benyttes som veiledende verdier.

Likevel vil det på grunn av disse usikkerhetene, fremkomme totale anbefalinger i denne oppgaven som heller enn for det totale klimagassutslippet, legger større vekt på differansen til omprosjekteringsforslagene.

Tabell 52 – Klimagassregnskap oppsummering

<i>Omprosjekteringsstandard</i>	Totalt utslipp CO₂-ekvivalent [kg]
<i>Original Dråpen Moderne</i>	420 271
<i>Passivhus</i>	246 074
<i>Nullenergibygg</i>	52 444
<i>Plusshus</i>	-49 771

7.7.1 Passivhus



Figur 21 – Klimagassregnskap for alle omprosjekteringsforslag

Sammenlignet med opprinnelig modell, besparer omprosjekteringsforslaget til passivhusstandard miljøet for totalt 174 198 kg CO₂-ekvivalenter. Det betyr at oppgraderingen til en høyere energistandard vil gjennom sin livstid nesten halvere opprinnelig klimagassavtrykk. En standard modell av Dråpen Moderne vil etter 34 år, ifølge livsløpsanalysen, ha et like stort klimagassavtrykk som hele passivhusets livsløp på 60 år, målt i CO₂-ekvivalenter.

Med tanke på at investeringen til passivhuset også vil lønne seg økonomisk etter litt over 10 år, finnes det flere tungtveiende grunner for å velge en mer energieffektiv standard for fremtidig prosjektering av Dråpen Moderne.

7.7.2 Nullenergibygg

Ved å prosjektere for nullenergibygg så er utslippene 7 ganger så små sammenlignet med opprinnelig modell. På toppen av dette er de årlige utslippene i bruksfasen på kun 419 kg CO₂-ekvivalenter. Dette tilsvarer kun 3 kg CO₂/(m²år), noe som basert på Rambøll sitt forslag til Direktoratet for Byggkvalitet vil regnes som et nesten nullutslippsbygg (Rambøll på vegne av DIBK, 2013). Dette er per i dag ikke en definisjon eller standard, men i fremtiden kan dette bli en mye brukt energistandard. På den måten vil dette omprosjekteringsforslaget være det alternativet som også innen klimagass kommer innenfor potensielle krav. Sånn sett følger dette forslaget den visjonen som etterstrebes for å i fremtiden ha bedre bygg og en bransje med lavere utslipp.

7.7.3 Plusshus

Det forslaget som klart kom best ut i forhold til klimagass er plusshuset. Årlig gjør plusshuset opp for hele 1 439 CO₂-ekvivalenter. Ved å produsere mer energi enn det bygget krever, kompenserer bygningen for alt utslipp gjort i livsløpet sitt, og vel så det. Faktisk vil også et plusshus kunne gjøre opp for de resterende utslippene på nullenergibygg. Dette er helt klart en dyrere økonomisk investering til å begynne med, men gir et klimanøytralt alternativ til de to andre forslagene. Som nevnt tidligere vil den ekstra investeringen nedbetales, og man vil få en langsiktig gevinst; både for klima og økonomisk.

7.8 Feilkilder

På grunnlag av at det i denne oppgaven er benyttet en rekke tall, der de fleste av disse er tastet manuelt, medfølger en sannsynlighet for avlesnings- og/eller tastefeil. Attpåtil er det brukt PHPP sine egne verdier der ikke annet er spesifisert. Disse kan være utdaterte og dermed feilaktige, og har ikke blitt kontrollert. Blant annet ligger klimadataene fra både Trondheim og Oslo inkludert i programmet, men det står ikke opplyst om når disse sist ble oppdatert. Årsaken til at oppvarmingsbehovet i Trondheim er lavere enn det i Oslo til tross for en høyere årsmiddeltemperatur er ikke gjort rede for. Dette betyr nødvendigvis ikke at dette er feil, men at det burde kontrolleres opp mot Byggforsk og norske standarder, da PHPP sine verdier muligens ikke er gyldige for beregning i Norge.

For vinduer er det flere faktorer som kan være feil eller unøyaktige. For spesifikasjoner rundt egenskaper er det kun tatt utgangspunkt i et tilsvarende vindu, da leverandørene kun har oppgitt en generell verdi. Fra leverandør er det kun oppgitt et totalt tall på U-verdi, mens man i PHPP er nødt til å spesifisere verdier for karm, glass og innsetting.

I tillegg er det kontinuerlige isolasjonssjiktet på 50 mm mer energieffektiv enn et tilsvarende isolasjonslag med stenderverk, noe som kan påvirke resultatene noe ettersom kuldebroverdiene Byggforsk oppgir for vindusinnsetting ikke vil være helt korrekte da disse er basert på gjennomgående stenderverk. Attpåtil er det heller ikke endret spesifikasjoner for vinduer som står plassert ved siden av hverandre selv om de får andre verdier for innsetting.

Det er brukt en annen U-verdi enn oppgitt for utgangspunktet på gulvkonstruksjonen. Dette er fordi det kan se ut til at Norgeshus har satt sin totale U-verdi for bygningsdelen lik den U-verdien som er oppgitt av leverandøren (Jackopor, 2022). Dette tallet baseres på Byggforskblad 471.009 som utgikk i 2018, og dermed er denne verdien utdatert (Byggforsk, 2022).

Uten gode nok kunnskaper om tekniske anlegg sine virkemåter og alternativer blir simuleringen og forståelsen av resultatene av disse begrenset. Det bør derfor tas forbehold om at valgte løsninger og drøftingen rundt disse er basert på minimalt med kompetanse i fagområdene og må derfor utbedres at eksperter på de respektive områdene.

Effekten på de tekniske anleggene kan også variere ut fra produsent. For de tekniske anleggene er solfangerne og solcellene beregnet av Norgeshus sine samarbeidspartnere brukt. Verdiene de har oppgitt regnes derfor som sikre. Der disse verdiene derimot kun er brukt som en base kan være feil. Eksempler på slike verdier er for beregningen med tappevannsanlegget på 10 m² i Trondheim, solcellene på 20 panel i Trondheim samt solcellene på 24 panel i begge byer. I de nevnte tilfellene er verdiene lagt inn som oppgitt fra leverandørene, for å så bli justert av PHPP til de ønskede variasjonene, og for de respektive byene. Disse bør dermed også kontrolleres eller simuleres av de spesifikke produsentene eller leverandørene. På toppen av dette opplyser også PHPP om at energibalansen i programmet ikke nødvendigvis er korrekt. Dette fordi, som forklart tidligere, er faktorer for de ulike energibærerne som ikke tas hensyn til i programmet. Det vil si at den ferdige prosjekteringen nødvendigvis ikke reflekterer det denne oppgaven får som resultat, men oppgaven burde kunne gi en indikasjon på hva som kan forventes av resultat.

For økonomien er det gjort en rekke antagelser og forenklinger. Spesielt når det kommer til strømpris er det tatt utgangspunkt i usikre variabler. Kjøpestrømmen kunne med fordel benyttet gjennomsnittsverdier fra de månedene der boligen behøver energitilskudd.

For klimagassregnskapet i livsløpsanalysen er det verdiene fra PHPP som har beregnet CO₂-ekvivalenter ut fra det totale energibehovet. Disse verdiene er basert på tyske verdier for utslipp, som var høyere for noen år tilbake. Dette er nok heller ikke representativt for klimagassutslippene her i Norge, da det her har en høy andel av fornybare energikilder. Det vurderes likevel dithen at

tallene fra PHPP er en god visuell på forskjellene for omprosjekteringene, og det ble dermed valgt at klimagassregnskapet skulle baseres på disse verdiene.

I avhendingsfasen burde også klimagassavtrykket for de tekniske installasjonene legges til verdiene mottatt fra Sigurd og Emil (Kristensen & Røe, 2022). I byggets levetid, burde det kanskje vært beregnet for en utskifting av de tekniske installasjonene, noe som det i en mer omfattende analyse bør tas hensyn til. Klimagass- og kostnadsverdier mottatt fra Sigurd og Emil er nok dessuten basert på en lokasjon i Oslo. Likevel ble det valgt i denne oppgaven å undersøke både livsløps- og kostnadsanalysen for Trondheim, noe som gjør beregningene mindre nøyaktig.

8 Håndtering av overskuddsenergi

Omprosjekteringen til plusshuset fører til at det produseres mer energi enn hva huset har behov for. Det fører så til en overskuddsenergi, som det finnes flere måter å håndtere på. Plusshuset vil i sommermånedene ha den største mengden overskuddsenergi. I vintermånedene når behovet også er størst vil produksjonen være minst. Derfor er det viktig å se på hvordan man kan fordele denne produksjonen på best mulig måte. Per dags dato er ikke alle alternativene like aktuelle, men dette utelukker ikke potensialet for fremtiden. Håndteringen av overskuddsenergi er et tema det forskes mye på, og har sammenlignet med dagens løsninger et stort forbedringspotensial. I denne oppgaven er det i hovedsak valgt at overskuddsenergien blir solgt til strømmettet.

Ved å selge strømmen til en kraftleverandør kan de kjøpe overskuddsstrømmen i de periodene dette produseres, og selge strøm når plusshuset ikke produserer nok energi til å dekke eget forbruk. En av leverandørene som har løsninger for dette er Fjordkraft, som har laget et konsept med «Solkonto», der kunden kan sette inn kilowattimer på konto – og hente ut disse ved behov (Fjordkraft, 2019).

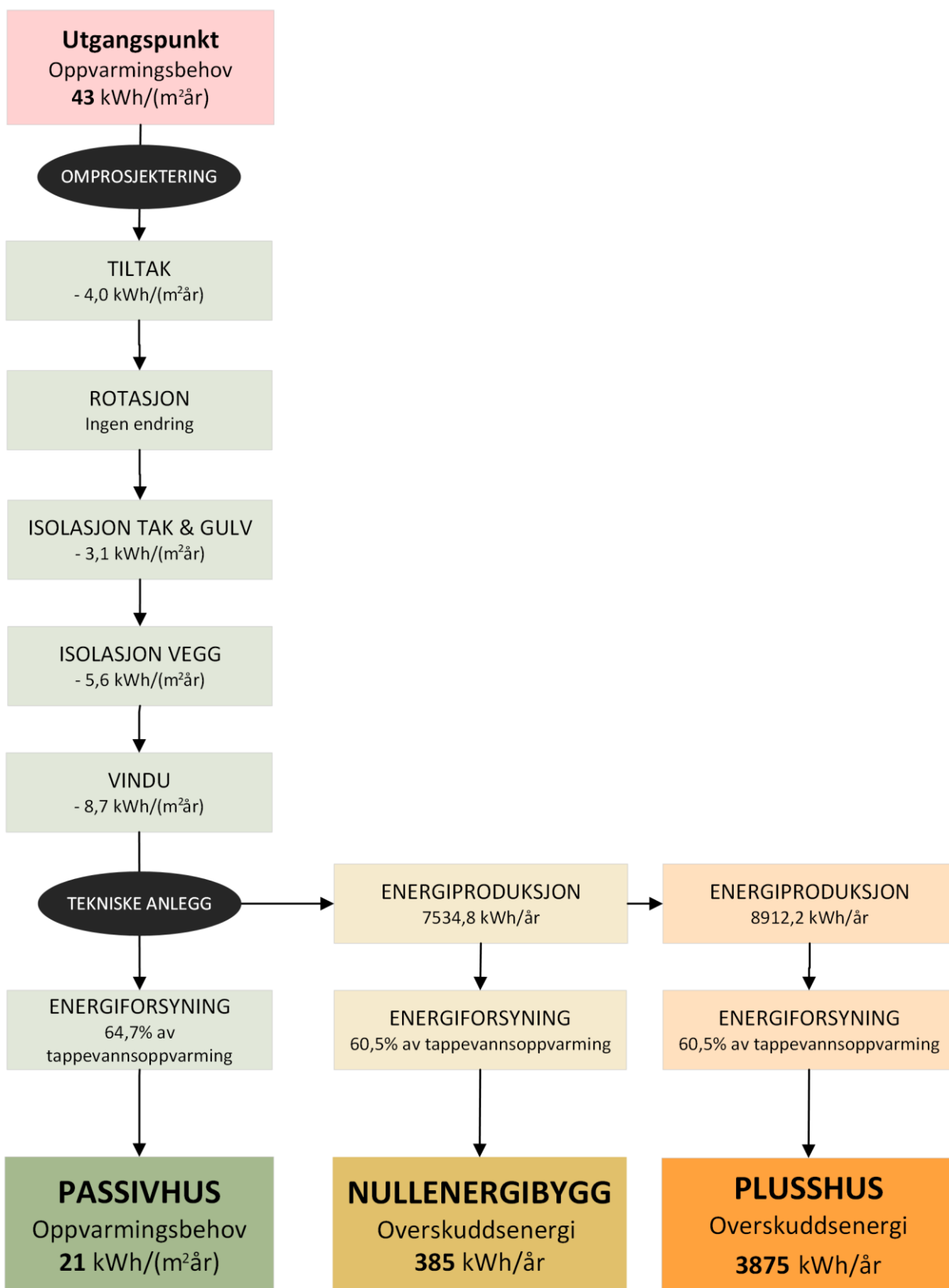
Et annet håndteringsalternativ er å finne en måte å lagre overskuddsenergien på. Dette enten ved bruk av batteri, eller varmelager. Mulighetene for dette er i stadig forbedring, og løsningene for dette blir mer effektive. For varmelagring er det mest vanlige i dag bruk av en akkumulatortank.

Noe som enda ikke er mye diskutert, men i teorien kunne vært et alternativ, er å koble seg på kommunene sine fjernvarmenett. Dette vil kunne distribuere energien rundt om i byene, og bidra til at fjernvarmen blir enda mer fornybar. Nettopp hvor praktisk gjennomførbart dette er, er ikke godt å si, men burde definitivt undersøkes nærmere.

Dersom det ikke er et alternativ å koble seg på et eksisterende fjernvarmenett, fins det også andre metoder for å håndtere overskuddsenergi. Ved å prosjektere såkalte nullområder kan man velge å lagre energien på effektive måter som ikke egner for en bolig alene, som for eksempel i energibrønner som er en sesonglagring av varme i grunnen. Overskuddsenergien kan ved samhandling med flere bygninger skape muligheter for lagring av energi i form av varme eller strøm. Dette kan også brukes for å supplere bygningene innenfor nullområdet – eksempelvis ved å ha plusshus som genererer strøm eller fjernvarme til passivhus. På denne måten kan man prosjektere egne områder, med et felles varme og strømmnett.

9 Oppsummering

Her gis en sammenfattet beskrivelse av de tre omprosjekteringsforslagene, og deres effekt, kostnad og nedbetalingstid.



Figur 22 – Oppsummering fremgangsmåte og resultat

9.1 Passivhus

- Beholder opprinnelig rotasjon.
- 200 mm av isolasjonen i tak byttes ut med Kingspan sine isolasjonstyper med bedre egenskaper. 120 mm Therma TR26 takisolasjon og i gjennomsnitt 80 mm av Therma TT46 fallisolasjon.
- 50 mm av isolasjonen i gulv byttes til Kingspan Kooltherm K3 gulvisolasjon. Resterende beholdes som opprinnelig prosjektert.
- Legges til 50 mm kontinuerlig isolasjonssjikt i yttervegg.
- Vinduene har en innsetting 40 mm inn fra vindsperre.
- Vindusareal reduseres og omfordeles.
- Installerer et 10 m² solfanger tappevannsanlegg.

Disse punktene gir følgende endringer på bygningsdelenes verdier:

U-verdi	Opprinnelig [W/(m²K)]	Omprosjektert [W/(m²K)]
Tak	0,110	0,069
Gulv	0,112	0,097
Vegg	0,198	0,146

Dette gir en total besparelse på oppvarmingsbehovet ved omprosjektering av isolasjonsløsninger:

Trondheim	Oslo
8,71 kWh/(m ² år)	8,38 kWh/(m ² år)

På vindu blir det gjort følgende besparelser på oppvarmingsbehovet:

Trondheim	Oslo
8,59 kWh/(m ² år)	8,37 kWh/(m ² år)

Solfangeren sin produksjon bidrar med følgende verdier:

Trondheim	Oslo
16,24 kWh/(m ² år)	15,49 kWh/(m ² år)

Dette gjør at energiregnskapet for omprosjekteringsforslaget blir som følger:

Tabell 53 – Passivhus energiregnskap

	Trondheim [kWh/(m ² år)]	Oslo [kWh/(m ² år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,75
<i>Totalt netto energibehov</i>	65,14	68,43
<i>Energiproduksjon</i>	16,24	15,49
<i>Energibalanse</i>	- 49,99	- 52,94

Dette forslaget er innenfor det høyeste beregnede oppvarmingsbehovet for begge byer. Solfangeren bidrar med nok fornybar energi til å forsyne 61,7% av oppvarmingen til tappevann. Dette i praksis betyr at omprosjekteringen er innenfor krav til energiforsyning. Dette er også kontrollert ved å regne ut at mengden levert elektrisk og fossil energi er mindre enn det totale netto energibehovet, fratrukket halve netto energibehovet til tappevann.

Klimagassene til passivhuset er mindre enn opprinnelig modell. Årlig vil passivhuset sammenlignet med standardmodellen spare klimaet for 2929 kg CO₂-ekvivalenter.

Kostnader for passivhuset ligger på 81 207 kr mer enn opprinnelig prosjekt, men dette vil være betalt ned etter 10,44 år på grunn av energiforsyningen. Dermed kan denne omprosjekteringen i det lange løpet vurderes som lønnsomt til tross for en høyere grunnkostnad for huset.

9.2 Nullenergibygg

- Prosjekteres likt som omprosjekteringsforslag til passivhus, med unntak av installasjon av solfangeranlegg.
- Installerer 13 m² solfanger kombianlegg i Oslo, 14 m² i Trondheim.
- Installerer 24 solcellepanel på taket.

Solfangeren sin produksjon bidrar med følgende verdier:

Trondheim 19,8 kWh/(m ² år)	Oslo 21,6 kWh/(m ² år)
--	---

Solcellene sin produksjon bidrar med følgende verdier:

Trondheim 49,2 kWh/(m ² år)	Oslo 50,42 kWh/(m ² år)
--	--

Tabell 54 – Nullenergibygg energiregnskap

	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,75
<i>Totalt energibehov</i>	65,14	68,43
<i>Energiproduksjon</i>	69,01	72,02
<i>Energibalanse</i>	+ 2,77	+ 3,59

Årlig overskuddsproduksjon er på **389 kWh/år** i Trondheim og **502 kWh/år** i Oslo.

Klimagass for nullenergibyggget ligger årlig på kun 416 kg CO₂-ekvivalenter. Dermed er også nullenergi omprosjekteringen nesten å regne et nullhus, og kan komme innenfor denne definisjonen med små endringer.

Kostnader for nullenergibyggget ligger på 206 438 kr mer enn hva det opprinnelige huset koster. Dette vil være nedbetalt på 11,3 år, og vil etter dette gi store besparelser årlig.

9.3 Plusshus

- Prosjekteres til passivhus på samme måte som nullenergibygg.
- Installere kombi-solfangeranlegg på 13 m² i Oslo og 14 m² i Trondheim.
- Installere 24 solcellepanel på taket.
- Installere en luft-til-vann-varmepumpe.

Solfangeren sin produksjon bidrar med følgende verdier:

Trondheim 19,8 kWh/(m ² år)	Oslo 21,6 kWh/(m ² år)
--	---

Solcellene sin produksjon bidrar med følgende verdier:

Trondheim 59,04 kWh/(m ² år)	Oslo 60,51 kWh/(m ² år)
---	--

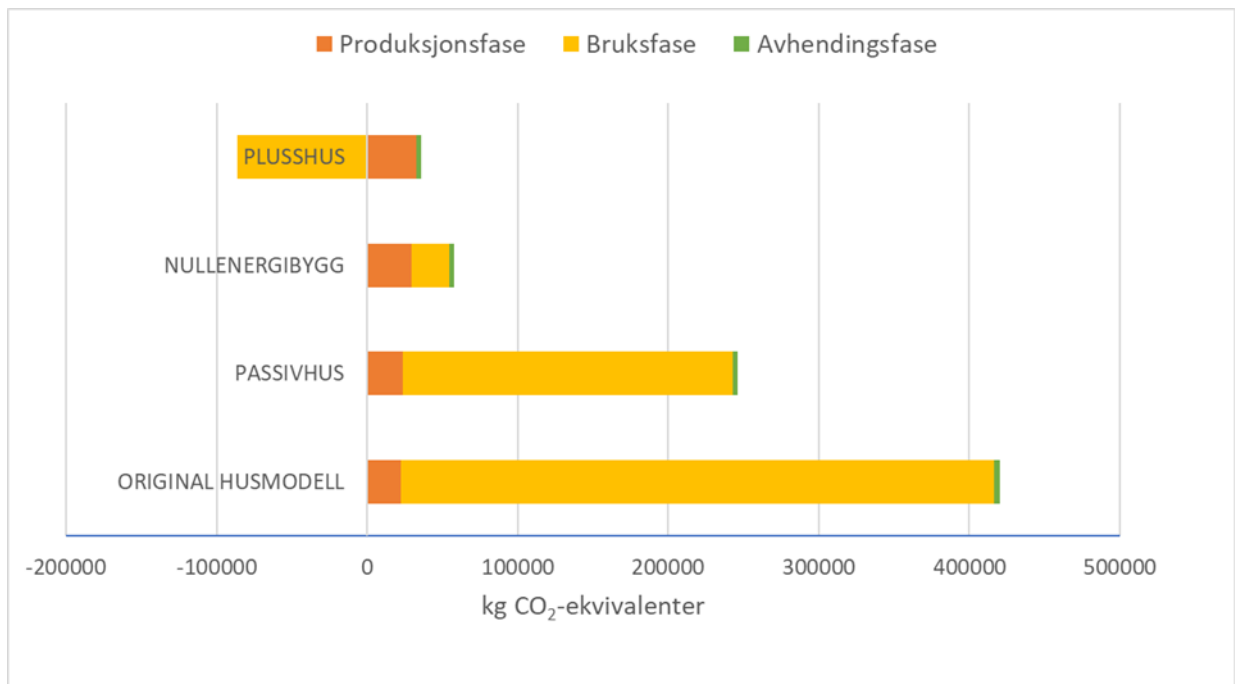
Tabell 55 – Plusshus energiregnskap

	Trondheim [kWh/(m²år)]	Oslo [kWh/(m²år)]
<i>Oppvarmingsbehov</i>	21,22	22,75
<i>Totalt energibehov</i>	51,17	53,23
<i>Energiproduksjon</i>	78,85	81,82
<i>Energibalanse</i>	+ 27,68	+ 28,87

Årlig overskuddsproduksjon er på **3875 kWh/år** i Trondheim og **4042 kWh/år** i Oslo.

Klimagass for plusshuset kompenseres for ved bruk av energiproduksjon. Årlig gjør plusshuset opp for hele 1 439 CO₂-ekvivalenter i tillegg til sitt eget energibehov.

Kostnader for plusshuset er på 342 481 kr mer enn utgangspunktet. Dette har en nedbetalingstid på 16,17 år, men etter dette vil overskuddsenergien som selges til strømmettet kunne gi en årlig profitt på 2 223 kr. Dette kommer i tillegg til at man er selvforsynt med strøm og dermed også får store besparelser på dette.



Figur 23 – Klimagass for alle omprosjekteringsforslag

10 Konklusjon

I dette kapitlet skal bacheloroppgavens erfaringer og funn føre til en endelig besvarelse på oppgavens problemstilling.

Oppgaven lyktes med å produsere tre hensiktsmessige og praktisk gjennomførbare omprosjekteringsforslag i henhold til de definerte energinivåene.

Energibehovet til oppvarming blir halvert ved å basere forslaget til null- og plussus på en passivhusomprosjektering. Dette fører til at implementeringen av tekniske anlegg er svært effektiv for å få dekt eller overgått det totale behovet for energi. Ikke minst er disse resultatene oppnådd uten å gjøre store endringer i bygningsfysikken. Dette gjør at veggene forblir tynne, og modellens estetiske uttrykk er beholdt. På den måten unngås det å få et utseende som passivhus ofte blir kritisert for å ha. Valget for å unngå tykke yttervegger, er kompensert for ved å benytte høyisolerende materialer, samt overdimensjonere taket.

Hver av de tre forslagene egner seg spesielt godt i hver sine særskilte situasjoner. Omprosjekteringen til passivhus har den laveste investeringen og tilbakebetalingstid, noe som egner seg godt dersom det er ønskelig at energieffektiviseringen skal bli rimeligst mulig i et kortsiktig perspektiv. Nullenerbygget viste seg å være det mest kostnadseffektive, noe som i kombinasjon med et svært lavt klimagassutslipp, resulterte i et klart foretrukket nivå av energieffektivitet. Plusshuset derimot, er den mest kostbare investeringen og får den lengste nedbetalingstiden. Til gjengjeld får plusshuset en årlig profitt ved salg av overskuddet i strømproduksjon og kompenserer for et årlig globalt klimagassutslipp tilsvarende 26 tur-retur flyvinger mellom Oslo og New York.

Alle omprosjekteringsforslagene gir et betraktelig kutt i bygningens totale klimagassutslipp. Bare oppgraderingen til en passivhusstandard halverer nesten utslippene for hele byggets livsløp. Nullenergibygget er ikke lagt unna å være klimanøytralt netto årlig, og kan dermed regnes som et nesten nullhus.

Alt i alt, viser simuleringresultatene at en kan oppnå betydningsfulle gevinster av å omprosjektere til mer energieffektive bygg, noe som i oppgaven er vist ved enkle simuleringer for kostnad og klimagass.

Referanser

Anskaffelser.no, 2019. *Hva er LCC? - Bygg og anlegg*. [Internett]

Available at: <https://anskaffelser.no/hva-skal-du-kjope/bygg-anlegg-og-eiendom-bae/livssyklus kostnader/hva-er-lcc>

[Funnet 22 April 2022].

Arntsen, T.-A. & Hrynyszyn, B. D., 2021. *NTNU Open: Optimization of Window Design for Daylight and Thermal Comfort in Cold Climate Conditions*. [Internett]

Available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2983069>

[Funnet 7 Mai 2022].

Berg, M., 2022. *Salgsingeniør hos Inaventa Solar* [Intervju] (20 April 2022).

Berthod, C., 2022. *Prosjektleder solenergi, Greenstat* [Intervju] (21 April 2022).

Blaker, M., 2022. *Nettavisen Økonomi*. [Internett]

Available at: <https://www.nettavisen.no/okonomi/stromkrisen-er-ikke-over-varsler-ekstrempriser-pa-strom-i-lang-tid/s/12-95-3424240056>

[Funnet 13 April 2022].

Boligsmart, 2022. *Hva koster solfanger? Pris i 2022*. [Internett]

Available at: <https://www.boligsmart.no/pris/solfanger>

[Funnet 13 Mai 2022].

Brekke, T., 2018. *Aftenposten, Eksperten svarer: Dette bør du vite om varmepumper*.

[Internett]

Available at: <https://www.aftenposten.no/bolig/i/K3rdrG/eksperten-svarer-dette-boer-du-vite-om-varmepumper>

[Funnet 19 April 2022].

Byggforsk, 2015. *472.801 Kuldebroverdier. Vindu i bindingsverksvegg av tre*. [Internett]

Available at:

https://www.byggforsk.no/dokument/4141/kuldebroverdier_vindu_i_bindingsverksvegg_av_tre

[Funnet 5 Mai 2022].

Byggforsk, 2018. *Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring, 451.021*. [Internett]

Available at:

https://www.byggforsk.no/dokument/204/klimadata_for_termisk_dimensjonering_og_frostsikri

ng#i

[Funnet 22 April 2022].

Byggforsk, 2020. *Slik prosjekterer du vannbåret varme i gulvet*. [Internett]

Available at:

https://www.byggforsk.no/nyheter/2/slik_prosjekterer_du_vannbaaret_varme_i_gulvet/1602?clid=CjwKCAjwjZmTBhB4EiwAynRmD3AkIerP6SHFqhW_AG8zEXB6LucwoRfEuqF8NsUsjISvikeX268StxoCjLoQAvD_BwE

[Funnet 25 April 2022].

Byggforsk, 2022. *471.009 Beregning av U-verdi og varmestrøm for konstruksjoner mot grunnen etter NS-EN ISO 13370 (1999 - 2018)*. [Internett]

Available at: [https://www.byggforsk.no/arkiv/795/beregning_av_u-](https://www.byggforsk.no/arkiv/795/beregning_av_u-verdi_og_varmestrom_for_konstruksjoner_mot_grunnen_etter_ns-en_iso_13370)

[verdi_og_varmestrom_for_konstruksjoner_mot_grunnen_etter_ns-en_iso_13370](https://www.byggforsk.no/arkiv/795/beregning_av_u-verdi_og_varmestrom_for_konstruksjoner_mot_grunnen_etter_ns-en_iso_13370)

[Funnet 7 Mai 2022].

Byggforsk, 2022. *473.003 Energieffektive bygninger. Begreper og definisjoner*. [Internett]

Available at:

[https://www.byggforsk.no/dokument/4153/energieffektive bygninger begreper og definisjoner](https://www.byggforsk.no/dokument/4153/energieffektive_bygninger_begreper_og_definisjoner)

[Funnet 15 Mai 2022].

Byggforsk, 2022. *473.020 Nullutslippsbygninger (ZEB). Retningslinjer og beregningsmetoder*. [Internett]

Available at:

[https://www.byggforsk.no/dokument/5177/nullutslippsbygninger zeb retningslinjer og beregningsmetoder](https://www.byggforsk.no/dokument/5177/nullutslippsbygninger_zeb_retningslinjer_og_beregningsmetoder)

[Funnet 15 Mai 2022].

Byggforskserien, 2001. *421.602 Dagslys. Egenskaper og betydning*. [Internett]

Available at: https://www.byggforsk.no/dokument/200/dagslys_egenskaper_og_betydning#i2

[Funnet 19 April 2022].

Conserve Energy Future, 2022. *Passive House Design: How It Works and Misconceptions Explained*. [Internett]

Available at: <https://www.conserve-energy-future.com/passive-house-design-works.php>

[Funnet 20 Januar 2022].

Dannevig, P. & Harstveit, K., 2021. *Klima i Norge i Store norske leksikon*. [Internett]
Available at: https://snl.no/klima_i_Norge
[Funnet 24 Januar 2022].

Direktoratet for byggkvalitet, 2017. *DIBK*. [Internett]
Available at: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-1/>
[Funnet 18 Januar 2022].

Direktoratet for byggkvalitet, 2017. *DIBK*. [Internett]
Available at: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-4/>
[Funnet 6 Mai 2022].

Direktoratet for byggkvalitet, 2018. *Bytte vinduer? Velg vinduer som gir deg lys og varme*. [Internett]
Available at: <https://dibk.no/bygge-eller-endre/puss-opp-energismart/bytte-vinduer-velg-vinduer-som-gir-deg-lys-og-varme/>
[Funnet 4 Februar 2022].

EcoSmart ATW Controller, 2022. *FJ KLIMA*. [Internett]
Available at: <https://fjklima.no/atw-controller-ecosmart/>
[Funnet 09 Mai 2022].

Energi Norge, 2022. *Derfor er strømprisen høyere i år enn i fjor*. [Internett]
Available at: <https://www.energinorge.no/fagomrader/strommarked/derfor-er-stromprisen-hoyere-i-ar-enn-i-fjor/>
[Funnet 13 April 2022].

Energi Norge, 2022. *Elavgiften*. [Internett]
Available at: <https://www.energinorge.no/elavgiften/>
[Funnet 16 April 2022].

Energy Saver, 2022. *Air-Source Heat Pumps*. [Internett]
Available at: <https://www.energy.gov/energysaver/air-source-heat-pumps>
[Funnet 19 April 2022].

EnergySage, 2021. *How to save on electric bills with energy efficiency*. [Internett]
Available at: <https://www.energysage.com/energy-efficiency/why-consume-energy/lower-electric-bill/>
[Funnet 20 Januar 2022].

Enova, 2016. *Balansert ventilasjon*. [Internett]

Available at: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/oppgradere-huset/balansert-ventilasjon/>

[Funnet 25 April 2022].

Enova, 2016. *Bio-ovn med vannkappe*. [Internett]

Available at: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/biovarme/bio-ovn-med-vannkappe/>

[Funnet 25 April 2022].

Enova, 2022. *Luft-til-vann-varmepumpe*. [Internett]

Available at: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/luft-til-vann-varmepumpe/>

[Funnet 26 April 2022].

Enova, 2022. *Vannbåren varme*. [Internett]

Available at: <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/varmepumper/vannbaren-varme-/>

[Funnet 25 April 2022].

Fjordkraft, 2019. *Snart kan du lagre solstrøm, uten batteri*. [Internett]

Available at: <https://www.fjordkraft.no/pressemeldinger/snart-kan-du-lagre-solstrom-uten-batteri/>

[Funnet 15 Mai 2022].

Fjordkraft, 2022. *Reduser klimafotavtrykket ditt med solenergi*. [Internett]

Available at: <https://www.fjordkraft.no/solcellepanel/reduser-klimafotavtrykket-med-solenergi/>

[Funnet 15 Mai 2022].

FN, 2021. *Klimaendringer*. [Internett]

Available at: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>

[Funnet 11 April 2022].

FN-sambandet, 2021. *Klimaendringer*. [Internett]

Available at: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>

[Funnet 19 Januar 2022].

Gulbrandsen, E., 2022. *Varmepumpeinfo.no, Luft-til-luft-varmepumpe*. [Internett]

Available at: <https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/luft-til-luft-varmepumpe>

[Funnet 19 April 2022].

Gulbrandsen, E., 2022. *Varmepumpeinfo.no, Luft-til-vann-varmepumpe*. [Internett]
Available at: <https://www.varmepumpeinfo.no/varmepumpetyper/luft-til-vann-varmepumpe>
[Funnet 19 April 2022].

Inaventa Solar, 2022. *Inaventa Solar kombianlegg*. [Internett]
Available at: <https://inaventasolar.com/nb/eksempel-kombianlegg>
[Funnet 19 April 2022].

Inaventa Solar, 2022. *Kombinsjonsanlegg solfanger*. [Internett]
Available at: <https://inaventasolar.com/nb/eksempel-kombianlegg>
[Funnet 20 april 2022].

International Energy Agency, 2017. *IEA*. [Internett]
Available at: <https://www.iea.org/reports/2018-global-status-report>
[Funnet 18 Januar 2022].

Jackopor, 2022. *JACKOPOR® PLATER*. [Internett]
Available at: <https://www.jackon.no/bygg/jackon-eps/jackopor/jackopor-plater/>
[Funnet 7 Mai 2022].

Kingspan, 2022. *Isolasjon, dokumenter*. [Internett]
Available at: <https://www.kingspan.com/no/nb-no/produkter/isolasjon/dokumenter-nn>
[Funnet 7 Mai 2022].

Kingspan, 2022. *Velkommen til Kingspan Norge - Isolasjon*. [Internett]
Available at: <https://www.kingspan.com/no/nb-no/produkter/isolasjon>
[Funnet 7 Mai 2022].

Kristensen, S. H. & Røe, E. G., 2022. *Klimagassregnskap og energieffektivitet - hvor går grensen for lønnsomhet.*, Trondheim: NTNU.

Larsen, J., 2021. *VS Bloggen, Kan jeg få vannbåren varme i min bolig?*. [Internett]
Available at: <https://blogg.vb.no/privat/kan-jeg-fa-vannbaren-varme-i-mitt-hus>
[Funnet 25 April 2022].

Lereim, D. O., 2020. *NDLA, Varmepumpas virkemåte*. [Internett]
Available at: <https://ndla.no/nb/subject:1:8c5a9fdd-4fa4-456b-9afe-34e7e776b4e7/topic:e05e2623-22da-4b5a-bbc8-1752d8db4c4a/resource:2b7ba865-cb53-448d-94e7-a5842984ebd0>
[Funnet 19 April 2022].

Lereim, D. O., 2020. *NDLA, Varmepumpas virkemåte*. [Internett]

Available at: <https://ndla.no/article/25375>

[Funnet 19 April 2022].

Link til utregning, u.d. *Link til utregning her*. [Internett]

Available at: [https://www.symbolab.com/solver/step-by-](https://www.symbolab.com/solver/step-by-step/%5Cfrac%7B1%7D%7B1%2B0.01%7D%5Ccdot%5Cleft(%5Cfrac%7B0.03%5Ccdot%5Cleft(1-0.43%5Cright)-0.0205%7D%7B1%2B0.0205%7D-0.01%5Cright)?or=input)

[step/%5Cfrac%7B1%7D%7B1%2B0.01%7D%5Ccdot%5Cleft\(%5Cfrac%7B0.03%5Ccdot%5Cleft\(1-0.43%5Cright\)-0.0205%7D%7B1%2B0.0205%7D-0.01%5Cright\)?or=input](https://www.symbolab.com/solver/step-by-step/%5Cfrac%7B1%7D%7B1%2B0.01%7D%5Ccdot%5Cleft(%5Cfrac%7B0.03%5Ccdot%5Cleft(1-0.43%5Cright)-0.0205%7D%7B1%2B0.0205%7D-0.01%5Cright)?or=input)

Lyskultur, 2022. *Dagslys og utsyn på hjemmekontoret øker din effektivitet, trivsel og helse*.

[Internett]

Available at: <https://lyskultur.no/nyheter/dagslys-og-utsyn-pa-hjemmekontoret-oket-din-effektivitet-trivsel-og-helse/>

[Funnet 1 April 2022].

Mamen, J., 2021. *Köppens klimaklassifisering i Store norske leksikon*. [Internett]

Available at: [https://snl.no/K%C3%B6ppens klimaklassifisering](https://snl.no/K%C3%B6ppens_klimaklassifisering)

[Funnet 21 Januar 2022].

Miljødirektoratet, 2021. *Klimaendringer i Norge*. [Internett]

Available at: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/klimaendringer-i-norge/>

[Funnet 24 Januar 2022].

Mjønerud, I., 2019. *Strøm.no, Alt du bør vite om solceller og solenergi*. [Internett]

Available at: <https://xn--strm-ira.no/solceller-og-solenergi>

[Funnet 25 April 2022].

Mæhlum, L., 2020. *SNL, Solceller*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/solceller>

[Funnet 25 April 2022].

Norges Astma og Allergiforbundet, 2016. *Vannbåren varme*. [Internett]

Available at: [https://www.naaf.no/subsites/drift-og-helse/tekniske-](https://www.naaf.no/subsites/drift-og-helse/tekniske-losninger/oppvarming/vannbaren-varme/)

[losninger/oppvarming/vannbaren-varme/](https://www.naaf.no/subsites/drift-og-helse/tekniske-losninger/oppvarming/vannbaren-varme/)

[Funnet 13 Mai 2022].

Norges Energi, 2022. *Historiske strømpriser*. [Internett]

Available at: <https://norgesenergi.no/hjelp/strompriser/historiske-strompriser/>

[Funnet 16 Mai 2022].

Norges hus, 2021. *Dråpen moderne*. [Internett]

Available at: <https://norgeshus.no/no/bygge+hus/funkishus/drapen+moderne.html>

[Funnet 2022 Mars 09].

Norsk Solenergiforening, 2022. *Solceller*. [Internett]

Available at: <https://www.solenergi.no/solstrm>

[Funnet 25 April 2022].

NVE, 2022. *Solkraft*. [Internett]

Available at: <https://www.nve.no/energi/energisystem/solkraft/>

[Funnet 25 April 2022].

Olje- og energidepartementet, 2021. *Energibruken i ulike sektorer*. [Internett]

Available at: <https://energifaktanorge.no/norsk-energibruk/energibruken-i-ulike-sektorer/>

[Funnet 2 April 2022].

Passipedia, 2022. *Primary Energy Renewable PER*. [Internett]

Available at: https://passipedia.org/basics/energy_and_ecology/primary_energy_renewable_per

[Funnet 11 Mai 2022].

Passiv House Institute, 2015. *Experiences*. [Internett]

Available at:

https://passivehouse.com/02_informations/07_resources/06_experiences/06_experiences.htm

[Funnet 19 Januar 2022].

Passive House Institute, 2015. *Passive House Planning Package (PHPP)*. [Internett]

Available at: https://passivehouse.com/04_phpp/04_phpp.htm

[Funnet 10 April 2022].

Pedersen, R., 2022. *Renten de siste årene*. [Internett]

Available at: <https://www.smartepenger.no/lan/300-renten-de-siste-arene>

[Funnet 17 April 2022].

Rambøll på vegne av DIBK, 2013. *UTREDNING NESTEN NULLENERGIBYGG FOR NORGE*. [Internett]

Available at:

https://dibk.no/globalassets/energi/nesten_nullenergibbygg_for_norge_ramboll_og_link_versjon_2.pdf

[Funnet 15 Mai 2022].

Regjeringen.no, 2021. *Regjeringen med milliardpakke i strømstøtte*. [Internett]
Available at: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/regjeringen-med-milliardpakke-i-stromstotte/id2891839/>
[Funnet 13 April 2011].

Risen Solar Technology, 2021. *RisenEnergy.com*. [Internett]
Available at: <https://en.risenenergy.com/uploadfile/202101/b56289b31e.pdf>
[Funnet 25 April 2022].

Sakya, M. A. & Thorbjørnsen, Å. S., 2021. *NTNU Open*. [Internett]
Available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2779539>
[Funnet 17 April 2022].

Schild, P. G., Klinski, M. & Grini, C., 2010. *SINTEF Byggforsk, Analyse og sammenlikning av krav til energieffektivitet i bygg i Norden og Europa*. [Internett]
Available at:
https://www.sintef.no/globalassets/upload/analyse_og_sammenlikning_av_krav_til_energieffektivitet.pdf
[Funnet 11 Mai 2022].

Simenergi, 2018. *Simien - Beregning av energibruk og inneklime*. [Internett]
Available at: <https://simenergi.no/simien/>
[Funnet 11 Februar 2022].

SINTEF, 2021. *Mer regn og bedre regelverk gir nye typer byggskader*. [Internett]
Available at: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/mer-regn-og-bedre-regelverk-gir-nye-typer-byggskader/>
[Funnet 12 April 2022].

SSB, 2012. *Utendørs 2½ time - menn mer enn kvinner*. [Internett]
Available at: <https://www.ssb.no/kultur-og-fritid/artikler-og-publikasjoner/utendørs-2-time-menn-mer-enn-kvinner>
[Funnet 19 Januar 2022].

Standard Norge, 2006. *ISO 14040*. [Internett]
Available at:
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=236802>
[Funnet 18 Januar 2022].

Standard Norge, 2013. *NS 3700*. [Internett]

Available at:

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=636902>

[Funnet 24 Januar 2022].

Standard Norge, 2021. *SN-NSPEK 3031:2021*. [Internett]

Available at:

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1393607>

[Funnet 22 April 2022].

Statistisk Sentralbyrå, 2022. *Elektrisitetspriser*. [Internett]

Available at: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitetspriser>

[Funnet 16 April 2022].

Tekna, 2021. *Hva er kravene til passivhus?*. [Internett]

Available at: <https://www.tekna.no/fag-og-nettverk/bygg-og-anlegg/byggbloggen/krav-til-passivhus/>

[Funnet 6 Mai 2022].

The Norwegian EPD Foundation, 2022. *EPD-Norge*. [Internett]

Available at: https://www.epd-norge.no/?lang=no_NO

[Funnet 19 Januar 2022].

Thue, J. V., 2016. *Bygnoingsfysikk*. 1st red. Norge: Fagbokforlaget.

UiO, 2011. [Internett]

Available at:

<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/solstraaling.html>

[Funnet 6 Mars 2022].

United Nations, 2019. *Only 11 Years Left to Prevent Irreversible Damage from Climate Change, Speakers Warn during General Assembly High-Level Meeting*. [Internett]

Available at: <https://www.un.org/press/en/2019/ga12131.doc.htm>

[Funnet 16 Mai 2022].

VG, 2022. *Strømprisene, hvor mye koster strømmen deg?*. [Internett]

Available at: <https://www.vg.no/spesial/2022/stromprisene/>

[Funnet 16 April 2022].

Zehnder, 2015. *Zehnder*. [Internett]

Available at: <https://www.zehnderamerica.com/what-is-balanced-ventilation/>

[Funnet 26 April 2022].

Vedlegg

I Poster A3

II Poster A4

III Artikkel

IV PHPP simuleringer

0 Utgangspunkt

- 0.1 Utgangspunkt Oslo
- 0.2 Utgangspunkt Trondheim
- 0.3 Tiltak Oslo
- 0.4 Tiltak Trondheim

1 Scenario

- 1.1 Rotasjon 135° Oslo
- 1.2 Rotasjon 135° Trondheim
- 1.3 Rotasjon 180° Oslo
- 1.4 Rotasjon 180° Trondheim
- 1.5 Rotasjon 225° Oslo
- 1.6 Rotasjon 225° Trondheim
- 1.7 Rotasjon 270° Oslo
- 1.8 Rotasjon 270° Trondheim

2 Scenario

- 2.1 Isolasjon tak og gulv Oslo
- 2.2 Isolasjon tak og gulv Trondheim

3 Scenario

- 3.1 Isolasjon yttervegg Oslo
- 3.2 Isolasjon yttervegg Trondheim

4 Scenario

4.1 Vindu innsetting

- 4.1.1 0 mm Oslo
- 4.1.2 0 mm Trondheim
- 4.1.3 20 mm Oslo
- 4.1.4 20 mm Trondheim
- 4.1.5 40 mm Oslo
- 4.1.6 40 mm Trondheim

4.2 Fôret karm

- 4.2.1 0 mm Oslo
- 4.2.2 0 mm Trondheim
- 4.2.3 20 mm Oslo
- 4.2.4 20 mm Trondheim
- 4.2.5 40 mm Oslo
- 4.2.6 40 mm Trondheim

4.3 Vindusmengde og plassering

- 4.3.1 Oslo
- 4.3.2 Trondheim
- 5 Energiforsyning
 - 5.1 Varmepumpe
 - 5.1.1 50/100 PER Oslo
 - 5.1.2 50/100 HP Oslo
 - 5.1.3 80/80 PER Oslo
 - 5.1.4 80/80 HP Oslo
 - 5.1.5 100/60 PER Oslo
 - 5.1.6 100/60 HP Oslo
 - 5.1.7 50/100 PER Trondheim
 - 5.1.8 50/100 HP Trondheim
 - 5.1.9 80/80 PER Trondheim
 - 5.1.10 80/80 HP Trondheim
 - 5.1.11 100/60 PER Trondheim
 - 5.1.12 100/60 HP Trondheim
 - 5.2 Solfanger
 - 5.2.1 10 m² Solar Oslo
 - 5.2.2 10 m² PER Oslo
 - 5.2.3 13 m² Solar Oslo
 - 5.2.4 13 m² PER Oslo
 - 5.2.5 10 m² Solar Trondheim
 - 5.2.6 10 m² PER Trondheim
 - 5.2.7 14 m² Solar Trondheim
 - 5.2.8 14 m² PER Trondheim
 - 5.3 Kombinasjonsløsninger
 - 5.3.1 13 m² solfanger & 100/100 varmpumpe
 - 5.3.2 Solar Oslo
 - 5.3.3 PER Oslo
 - 5.3.4 HP Oslo
 - 5.3.5 14 m² solfanger & 100/100 varmpumpe
 - 5.3.6 Solar Trondheim
 - 5.3.7 PER Trondheim
 - 5.3.8 HP Trondheim
- 6 Energiproduksjon
 - 6.1 Solceller 20 panel PV Oslo
 - 6.2 Solceller 20 panel PER Oslo
 - 6.3 Solceller 20 panel PV Trondheim
 - 6.4 Solceller 20 panel PER Trondheim
 - 6.5 Solceller 24 panel PV Oslo
 - 6.6 Solceller 24 panel PER Oslo
 - 6.7 Solceller 24 panel PV Trondheim
 - 6.8 Solceller 24 panel PER Trondheim
 - Kombinasjoner
 - 6.9 Solceller & varmpumpe PER Oslo

- 6.10 Solceller & varmepumpe PER Trondheim
- 6.11 Solceller & solfanger PER Oslo
- 6.12 Solceller & solfanger PER Trondheim
- 6.13 Solceller med solfanger & varmepumpe PER Oslo
- 6.14 Solceller med solfanger & varmepumpe HP Oslo
- 6.15 Solceller med solfanger & varmepumpe PER Trondheim
- 6.16 Solceller med solfanger & varmepumpe HP Trondheim

V. Omprosjekteringsforslag

- 1. Passivhus
 - 1.1. Oslo
 - 1.2. Trondheim
- 2. Nullenergibygge
 - 2.1. Oslo
 - 2.2. Trondheim
- 3. Plusshus
 - 3.1. Oslo PER
 - 3.2. Oslo HP
 - 3.3. Trondheim PER
 - 3.4. Trondheim HP