

Sammenligning av energieffektivitet i enebolig ved omprosjektering av ytterveggkonstruksjon

A Comparison of Energy Efficiency in a House by Remodeling the Outer Wall Construction

Trondheim Mai 2022

Navn student:

Even Størkersen

Intern veileder:

Roger Bergh

Prosjektnr:

2022 - 41

Ekstern veileder:

Terje Kjetil Fossheim

Rapporten er

ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk

Rapporten er ÅPEN

Prosjektbeskrivelse og resultatmål

I 2018/2019 var jeg med som tømrer på oppføringen en enebolig i Oslo. Eneboligen består av kjeller delvis under terreng, to etasjer mot friluft med yttervegger av bindingsverk og flatt tak. Ytterveggene er tradisjonelt bygget med gjennomgående heltrestender 48x198mm og innvending påføring 48x48mm. Den økende interessen for å bygge energieffektive boliger gir nye typer konstruksjoner, som oftest med økte isolasjonsmengder. En av disse nye løsningene er todelte yttervegger, som går ut på å ha et isolasjonssjikt mellom to bindingsverksvegger, utvendig- og innvendig yttervegg, enten med innvendig, kombinert eller utvendig bæring. I denne oppgaven skal den tradisjonelle ytterveggen byttes ut med todelt yttervegg-løsning med utvendig bæring. Tak- og gulvkonstruksjon forblir uendret, utenom overganger til yttervegg. Det skal utføres innsamling av data og nødvendige beregninger for å gjøre en SIMIEN evaluering av bygget både før og etter endring av ytterveggkonstruksjonen.

Prosjektet deles opp i 3 faser;

Fase 1: Evaluering av bygget som det er

I den første fasen skal det samles inn data fra bygget. Det skal også utvikles detaljtegninger for å gjennomføre nødvendig beregninger, og videre bruke dette til å utføre en energievaluering i SIMIEN.

Det skal leveres en beskrivelse av byggets oppbygning, sammen med detaljtegninger og beregninger. Denne fasen inkluderer også en SIMIEN evaluering som dokumenteres med utklipp fra resultater.

Fase 2: Evaluering av bygget med ny konstruksjon

I denne fasen endres konstruksjonen i ytterveggene til todelte yttervegger. Deretter utføres det beregninger av de endrede konstruksjonsdelene. Resultater fra beregninger av konstruksjonsdeler som er uendret fra fase 1 gjenbrukes. Til slutt gjøres en ny energievaluering i SIMIEN.

Det skal leveres plantegninger, snitt og detaljtegninger for å gi et overblikk over noen av endringene som er gjort. Beregninger dokumenteres som utklipp fra programvare eller håndberegninger. SIMIEN evalueringen utføres med nye resultater fra beregningene og uendrede resultater fra fase 1, og dokumenteres som utklipp fra programvare.

Fase 3: Rapport

I fase 3 blir selve rapporten skrevet, og funnene blir presentert. Denne inkluderer en beskrivelse og resultater fra fase 1 og fase 2, før en sammenligning av resultatene blir gjort.

Stikkord fra prosjektet:

Enebolig, todelte yttervegger, tradisjonell ytterveggkonstruksjon, U-verdi, kuldebro, SIMIEN-evaluering, energieffektivitet.

Forord

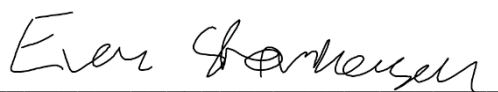
Rapporten er skrevet som avsluttende oppgave for bachelorutdanningen på byggingeniørstudiet ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er et egenutviklet prosjekt, basert på pensum fra fordypningen Husbyggingsteknikk. Kunnskap fra emnene BYGT2311 Bygningsteknologi og BYGT2310 Husbyggingsteknikk er grunnlaget for prosjektet, samt emner fra 1. og 2. studieår.

Bakgrunnskunnskap og erfaring fra tømrerutdanning, i tillegg til læring fra emner på studiet, skapte et godt grunnlag for arbeidet med oppgaven. Temaet ble valgt ut fra et ønske om videre fordypning og læring, i tillegg til å ville oppnå resultater som kan brukes som inspirasjon til videre forskning. Det har vært en lærerik prosess, i alt fra prosjekthåndtering og planlegging, til utregninger, bruk av litteratur og programvare. Valg av riktig oppgave var en viktig del av prosessen, ettersom det gjorde det interessant å jobbe med prosjektet.

Det rettes en stor takk til intern veileder, Roger Bergh, for et godt samarbeid og en genuin interesse for oppgaven. Fra dag én har det vært positivitet for valg av prosjekt, og svært god hjelp med prosessen. Takk til Terje K. Fossheim for å stille opp som ekstern veileder, og Gabriele Lobaccaro for veiledning av kuldebroberegninger og bruk av THERM.

Til slutt rettes det stor takk til Løken bygg AS for hjelp med tegninger og grunnlag, som har vært essensielt for å gjennomføre prosjektet, i tillegg til uvurderlig opplæring og grunnlag før bachelorstudiet.

Trondheim, 19. mai 2022



Even Størkersen

Sammendrag

Denne bacheloroppgaven undersøker energieffektiviteten til en enebolig med to forskjellige ytterveggkonstruksjoner; tradisjonell yttervegg og todelt yttervegg. Formålet med oppgaven er å finne ut hva økt isolasjonsmengde i yttervegg har å si for byggets energibehov. Rapporten er begrenset til energiaspektet ved prosjektet, men foreslår noen muligheter for videreføring av oppgaven i siste kapittel.

Først blir det utviklet plan- og snittegninger som grunnlag for detaljer, for å vise tilstøtende bygningsdeler, samt oppbygningen av de to ulike ytterveggkonstruksjonene. Detaljtegningene brukes videre til å manuelt beregne U-verdier for begge ytterveggene. U-verdiene brukes deretter i kombinasjon med THERM, et to-dimensjonalt varmestrømprgram, til å beregne ekstra varmetap i tilslutninger, altså kuldebroer. Til slutt blir bygget med de to konstruksjonene og tilhørende verdier, evaluert i energievalueringsprogrammet SIMIEN. Deretter sammenlignes byggets energibehov med tradisjonell yttervegg og todelt yttervegg.

SIMIEN-evaluering viser en liten reduksjon i byggets beregnede energibehov. I kombinasjon med kuldebroberegningene, viser evaluering at varmetapet rundt vinduer og dører er der det største varmetapet ligger.

Abstract

This bachelor's thesis will explore the energy efficiency of a house, with two different exterior wall constructions, traditional and a separated exterior wall. The purpose of this project is to get a clear sense of how an increase of insulation in the exterior wall, will affect the buildings energy needs. The report is limited to the energy aspect of the project but recommends some possible continuations in the last chapter.

First, the plans and sections are used to create detailed drawings of the intersections between building elements, as well as showing the different layers of the two exterior wall solutions. These are used for calculating the U-values by hand. The U-values are further used in the calculations of thermal bridges in combination with THERM, a two-dimensional heat-transfer program. In the end, the two cases are simulated in SIMIEN, an energy-evaluation program. In the end, a comparison is made to see the effects of adding insulation in the exterior wall.

The SIMIEN-evaluations shows that there is a slight decrease in the building's theoretical energy needs. It also shows, in combinations with thermal bridge values, the loss of heat around windows and doors are significant, and the main source of heat loss.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag.....	II
Abstract.....	III
Innholdsfortegnelse.....	IV
Begrepsliste.....	VII
Figurliste.....	VIII
Tabelliste.....	IX
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problembeskrivelse og formål.....	2
1.3 Prosjektramme og struktur.....	2
2 Metode.....	3
2.1 Litteratur.....	3
2.2 ArchiCAD.....	3
2.3 Standarder.....	4
2.4 THERM.....	4
2.5 SIMIEN.....	4
3 Teori.....	5
3.1 U-verdier.....	5
3.1.1 Mot friluft.....	5
3.1.2 Mot terreng.....	8
3.2 Kuldebroer.....	10
3.2.1 Standardverdier.....	10
3.2.2 Beregning i THERM.....	10
3.2.3 Normalisert kuldebroverdi.....	12
4 Konstruksjon.....	13

4.1	Generelt.....	13
4.1.1	Bygningsmaterialer	13
4.1.2	Material- og sjiktdata	14
4.1.3	Lengder og areal.....	15
4.2	Tak	16
4.2.1	Tak.....	16
4.2.2	Terrasser.....	16
4.3	Gulv på grunn.....	16
4.4	Etasjeskiller	17
4.4.1	Etasjeskiller 1.etasje/2.etasje.....	17
4.4.2	Etasjeskiller under utkrager.....	17
4.5	Yttervegg kjeller.....	17
4.5.1	Yttervegg mot friluft.....	17
4.5.2	Yttervegg mot terreng	17
4.6	Tradisjonell ytterveggkonstruksjon	18
4.7	Todelt ytterveggløsning	18
4.8	Andre bygningskomponenter.....	18
5	Resultat.....	19
5.1	U-verdi.....	19
5.2	Kuldebroer	20
5.3	SIMIEN-evaluering	22
6	Diskusjon	26
6.1	Metode	26
6.2	Konstruksjon.....	26
6.3	U-verdi.....	27
6.4	THERM og kuldebroer	28
6.5	SIMIEN	29

7	Konklusjon	30
7.1	Energibehov	30
7.2	Varmetap og kuldebroer	31
7.3	Muligheter for videreførelse av prosjektet.....	31
	Referanser.....	32
	Vedlegg	35

Begrepsliste

Begrep	Forklaring
U-verdi	Varmegjennomgangskoeffisient, varme som strømmer gjennom én m ² per grad Kelvin (W/m ² K)
Kuldebro	Område med økt varmetap gjennom tilslutninger mellom bygningsdeler
Normalisert kuldebroverdi	Samlet varmetap for alle kuldebroer i et bygg dividert med oppvarmet del BRA (W/m ² K)
TEK 17	Byggteknisk forskrift, utgitt i 2017
Norsk standard, NS	Standard for gjennomførelse av beregninger
Numerisk studie	Tallbasert studie
Energieffektivitet	Hvor effektivt energien brukes til et formål
Energibehov	Mengde energi for å oppnå et mål
Ytelseserklæring	Et dokument for et produkts ytelse
Produktdatablad	Et dokument for et produkts mål og data
Todimensjonale varmestrømmer	Varmegjennomgang i en bygningsdel sett i to dimensjoner
Varmetapstall	Verdi for varmetapet til bygningsdeler (W/m ² K)
Varmemotstand	Hvor godt et sjikt isolerer mot varmegjennomgang (m ² K/W)
Varmeovergangsmotstand	Varmemotstand i overgangen mellom et materiale og omgivelsene (m ² K/W)
Arealandel	Andel av et materiale i et sjikt (%)
Varmekonduktivitet	Varmetransport gjennom et materiale (W/mK)
Byggforskblad	Anvisning fra SINTEF Byggforsk, forkortet BF
Kuldebroatlas	Samling av kuldebroverdier for standardkonstruksjoner, i SINTEF Byggforsk
U-verdiatlas	Samling av U-verdier for standardkonstruksjoner, i SINTEF Byggforsk

Figurliste

Figur 1. Lengder brukt til beregning av kuldebroer i THERM for etasjeskiller og tak, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).	11
Figur 2. Innvendig lengder i hjørner som brukes til beregning av kuldebroer i THERM, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).	11
Figur 3. Lengder som brukes ved beregninga av kuldebroer for vinduer ved bruk av THERM, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).	12

Tabelliste

Tabell 1. Verdier for varmekonduktivitet brukt i beregningene.....	14
Tabell 2. Varmeovergangsmotstand for sjikt som er brukt i beregningene, hentet fra byggforskblad 471.008.	15
Tabell 3. Arealer og omkrets for etasjene med tradisjonell yttervegg	15
Tabell 4. Arealer og omkrets for etasjene med todelt yttervegg.....	16
Tabell 5. Beregnede U-verdier for bygningsdelene	19
Tabell 6. Kuldebroverdier for tilsluttende bygningsdeler	20
Tabell 7. Tradisjonell yttervegg: Byggets verdier sammenlignet med energikrav ved energiltaksmetoden i TEK17	22
Tabell 8. Tradisjonell yttervegg: Byggets varmetapstall sammenlignet med krav ved omfordeling av varmetap fra TEK17	23
Tabell 9. Tradisjonell yttervegg: Byggets energibehov for hver post, sammenlignet med forskriftskravene fra TEK17	23
Tabell 10. Todelt yttervegg: Byggets verdier sammenlignet med energikrav ved energiltaksmetoden i TEK17	24
Tabell 11. Todelt yttervegg: Byggets varmetapstall sammenlignet med krav ved omfordeling av varmetap fra TEK17	24
Tabell 12. Todelt yttervegg: Byggets energibehov for hver post, sammenlignet med forskriftskravene fra TEK17	25
Tabell 13. Strømkostnad for energibehov ved tradisjonell og todelt yttervegg.....	30

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I dagens samfunn er det større bevissthet over klima og menneskeskapte utslipp, samt økende interesse for å redusere sitt klimafotavtrykk. Dette inkluderer også måten vi bor på, og hvor energieffektive boligene våre er. De tekniske kravene i Byggteknisk forskrift (TEK) stiller stadig høyere krav til varmetap og energibehov i boliger (Direktoratet for Byggkvalitet, 2018). Det er et stort fokus i byggenæringen å utvikle materialer og løsninger som reduserer energiforbruket. I tillegg har strømprisene det siste halvåret vært unormalt høye, og utsiktene for fremtidige strømpriser viser ikke noen umiddelbar nedgang i pris (NorgesEnergi, 2022). Dette gjør det også økonomisk gunstig for boligeiere å eie boliger som er billigere i drift.

I praksis så betyr dette tykkere vegger, tak og gulv med mer plass til isolerende materialer i konstruksjonen (Clementz, et al., 2011). I 2018/2019 ble det bygget en enebolig i Oslo, med nettopp noen av disse egenskapene. Takkonstruksjonen inneholdt 450mm isolasjon som resultat av ønske om store, åpne rom.

Kjellerkonstruksjon ble også prosjektert med god isolerende evne mot terreng og friluft. Derimot ble ytterveggene av tre prosjektert etter tradisjonell metode, med 48x198 mm bindingsverk og 48x48 mm innvendig påforing. I tillegg er det store vindusarealer med vinduer som går fra etasjeskiller til etasjeskiller, og overdekninger av ståldragere. Dette er typiske materialer og løsninger med store varmetap. Det utviklet seg derfor en ide om å øke isolasjonsmengden i yttervegg, samt se på varmetapet til de ulike knutepunktene i konstruksjonen, og knytte dette opp mot boligens varmetap og energibehov.

1.2 Problembeskrivelse og formål

Det er ønskelig å få tydeliggjort de energimessige fordelene med bedre isolerte bygg, og spesielt hva kun én bygningsdel har å si for energiregnskapet.

Formålet med prosjektet er å sammenligne eneboligens energibehov slik som den ble prosjektert, med energibehovet til boligen prosjektert med en tykkere yttervegg. Fremgangsmåte og metode er beskrevet i kapittel 2, og konstruksjonen og bygningsdelene er beskrevet i kapittel 4. Dersom det er spesielle konstruksjonsdeler og knutepunkter som er av interesse med tanke på varmetap vil disse belyses.

Prosjektoppgaven har som mål å svare på følgende spørsmål;

- Hvor mye har en endring i ytterveggkonstruksjonen, med økt mengde isolasjon, å si for energibehovet til eneboligen?
- Hvor oppstår noe av det største varmetapet?

1.3 Prosjektramme og struktur

Prosjektet begrenses til å gjelde den spesifikke eneboligen, og er en numerisk studie basert på teoretiske verdier. Verdiene utarbeides fra beregninger og simuleringer, både for hånd og ved bruk av programvare. Rapporten skal besvare spørsmålene i underkapittel 1.2, og holder seg til energiaspektene ved oppgaven.

Prosjektet gjennomføres ved utarbeidelse av detaljtegninger for å feste beregninger og simuleringer til konstruksjonen, og for å vise hvilke løsninger som er brukt. Nærmere beskrivelse av fremgangsmåte, løsninger, konstruksjon og teorien bak beregningene finnes i kapittel 2, 3 og 4. Videre i rapporten følger resultatene fra prosjektet og en diskusjonsdel, der resultatenes pålitelighet vurderes, og eventuelle usikkerheter og feilkilder diskuteres. Rapporten vil til slutt ende i en konklusjon med de viktigste funnene og svare på prosjektets formål. I tillegg vil det foreslås muligheter for videreførelse av prosjektet.

2 Metode

2.1 Litteratur

Det er brukt noe litteratur som kilder til beregning, forskriftskrav og annen nyttig informasjon for gjennomførelse av prosjektet. Alle kilder som er brukt er referert til og kan finnes i referanseliste i enden av denne rapporten. Det er derimot noe litteratur som er mer brukt enn andre og som er verdt å nevne;

- *Rapport 84*, som er utarbeidet av Norsk Treteknisk Institutt, ser også på tiltak for å redusere energibruk, og er brukt som inspirasjon og bakgrunn for valg av todelt ytterveggløsning (Clementz, et al., 2011).
- *Byggforskserien*, som er utarbeidet av SINTEF, er brukt hyppig for preaksepterte løsninger, i tillegg til data og verdier som beregningsgrunnlag (SINTEF Byggforsk, u.d.).
- *Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK)* sine nettsider er brukt for byggteknisk forskrifts krav (TEK17) til energiforbruk og tekniske energikrav (Direktoratet for Byggkvalitet, 2020).
- *Prosjektrapport 25*, som er utarbeidet av SINTEF Byggforsk, er brukt til beregning av kuldebroer, og veiledning for bruk av programvaren THERM (Gustavsen, et al., 2008).

Det er også brukt en del materialdata som er oppgitt fra produsentene selv gjennom ytelseserklæringer og produktatablader. Dette og øvrig litteratur er referert til i teksten der kilden er brukt, og full kilde er oppgitt i referanseliste.

2.2 ArchiCAD

Programvaren ArchiCAD 25, utviklet av Graphisoft, er et tegneprogram for å utvikle diverse bygningstegninger og 3D-modeller. I prosjektet er programmet brukt til å utvikle tegninger for plan, snitt og detaljer.

2.3 Standarder

Beregninger av U-verdier og kuldebroer er gjort etter Norsk Standard, som er utarbeidet av Standard Norge. Det er brukt forskjellige standarder, som er hentet fra standard.no gjennom studentlisens fra NTNU, eller brukt gjennom prosjektrapporter fra SINTEF. Beregningsmetodene er beskrevet nærmere i kapittel 3.

- NS-EN ISO 6946:2017 Bygningskomponenter og -elementer, Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient, Beregningsmetoder (Norsk Standard, 2017).
- NS-EN ISO 13370:2017 Bygningers termiske egenskaper, Varmeoverføring via grunnen, Beregningsmetoder (Norsk Standard, 2017).
- NS-EN ISO 10211:2017 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner, Varmestrømmer og overflatetemperaturer, Detaljerte beregninger (Norsk Standard, 2017).

2.4 THERM

THERM er et program, utviklet av Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), for simulering av todimensjonale varmemestrømmer gjennom konstruksjonsdeler. I THERM modelleres en bygningsdel, med tilhørende data, varmegjennomgangsegenskaper og størrelser (Lawrence Berkley National Laboratory, u.d.). Deretter hentes det ut verdier som kan brukes til å beregne det ekstra varmetapet for konstruksjonsdelen, eller kuldebroverdier. Detaljert beskrivelse av kuldebroberegningene gjøres i underkapittel 3.2.

2.5 SIMIEN

For å få verdier på energibehov brukes det norskutviklede energievalueringsprogrammet SIMIEN (Simenergi, u.d.). Her legger man inn data som størrelser av bygg, arealer, konstruksjoners tekniske data, oppvarmingskilder og mer, for å så få ut energibehov, varmetapstall, osv. Evalueringen sammenligner også verdiene automatisk mot TEK17, for å se om det er godkjent opp mot energikravene (Direktoratet for Byggkvalitet, 2020). I tillegg kan man få ut en energimerking av bygget.

3 Teori

3.1 U-verdier

3.1.1 Mot friluft

For beregning av varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi) til konstruksjoner mot friluft benyttes NS-EN ISO 6946:2017, med fremgangsmåte beskrevet i byggforskblad 471.008 (SINTEF Byggforsk, 2021). U-verdien finner man ved å bruke formelen;

$$U = \frac{1}{R_{tot}} + \Delta U \quad (1)$$

hvor:

- U er varmegjennomgangskoeffisienten med enhet W/m²K
- R_{tot} er total varmemotstand (m²K/W)
- ΔU er et korreksjonstillegg for luftspalter, mekaniske festemidler osv. (W/m²K)

Total varmemotstand beregnes forskjellig for bygningsdeler med homogene sjikt og bygningsdeler med sammensatte sjikt. I prosjektet inneholder alle bygningsdelene sammensatte sjikt, og derfor er kun metoden for sammensatte sjikt brukt. Total varmemotstand beregnes ut fra formelen;

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;\text{\textit{\textit{ovre}}}} + R_{tot;\text{\textit{nedre}}}}{2} \quad (2)$$

hvor:

- R_{tot;øvre} er øvre grenseverdi for varmemotstand i bygningsdelen (m²K/W)
- R_{tot;nedre} er nedre grenseverdi for varmemotstanden i bygningsdelen (m²K/W)

Varmemotstand til hvert enkelt sjikt finner man ved å bruke formelen;

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

hvor:

- R er varmemotstand for sjiktet
- d er sjiktets tykkelse
- λ er materialets dimensjonerende varmekonduktivitet

For å finne R_{tot} for henholdsvis øvre og nedre grenseverdi brukes ligning (4), med noen forbehold som er beskrevet i ligning (5), (6) og (7);

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (4)$$

hvor:

- R_{si} er innvendig varmeovergangsmotstand (m^2K/W) (tabell 2)
- R_1, R_2, \dots, R_n er varmemotstand for hvert sjikt (m^2K/W)
- R_{se} er utvendig varmeovergangsmotstand (m^2K/W) (tabell 2)

Ved beregning av $R_{tot;øvre}$ brukes ligning (4), men bygningsdelen deles inn i arealandeler av materialtype i et sammensatt sjikt. Det vil si at en bygningsdel med ett sammensatt sjikt vil ha to verdier for $R_{tot;øvre}$. Forskjellige verdier for $R_{tot;øvre}$ gis notasjonen a, b, c osv. Formel for $R_{tot;øvre}$ blir da slik;

$$R_{tot;øvre} = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{tot;a}} + \frac{f_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{f_q}{R_{tot;q}}} \quad (5)$$

hvor:

- f_a, f_b, \dots, f_q er arealandeler til de forskjellige materialene i sjiktene (%)
- $R_{tot;a}, R_{tot;b}, \dots, R_{tot;q}$ er total varmemotstand for hvert felt, beregnet etter ligning (3) (m^2K/W)

Deretter finner man nedre grenseverdi ved å bruke ligning (4), men for det sammensatte sjiktet brukes en ekvivalent varmemotstand. Denne tar hensyn til arealandelen at det er forskjellige materialer i sjiktet, og beregnes slik;

$$R_j = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}}} \quad (6)$$

hvor:

- R_j er ekvivalent varmemotstand i sjikt j
- $R_{aj}, R_{bj}, \dots, R_{qj}$ er varmemotstanden til materialene til hvert felt i sjikt j ($\text{m}^2\text{K/W}$)

Nedre grenseverdi finnes så ved;

$$R_{tot;nedre} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (7)$$

med å bruke R_j for det sammensatte sjiktet.

Til slutt brukes ligning (2) og (1) for å finne U-verdien til bygningsdelen. ΔU legges til ut fra beregninger i NS-EN ISO 6946:2017, men i prosjektet er det lagt til 0,01 ved bygningsdeler som har større mulighet for unøyaktig montering, luftlommer og ekstra varmetap (SINTEF Byggforsk, 2021).

3.1.2 Mot terreng

U-verdier for bygningsdeler mot grunnen beregnes etter NS-EN ISO 13370:2017. I prosjektet er det kun oppvarmet kjeller som inneholder bygningsdeler mot grunn. For beregning av U-verdier for gulv og vegg i oppvarmet kjeller mot grunn, brukes fremgangsmåte i Byggforskblad 471.009 (SINTEF Byggforsk, 2018).

Først må parameteren B' , gulvets karakteristiske dimensjon, bestemmes. Det gjøres slik;

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (8)$$

hvor:

- B' er gulvets karakteristiske dimensjon (m)
- A er brutto grunnflateareal (m^2)
- P er utvendig omkrets av bygningen (m)

Deretter bestemmes parameteren d_t , som er gulvets ekvivalente tykkelse, slik;

$$d_t = w + \lambda \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (9)$$

hvor:

- d_t er gulvets ekvivalente tykkelse (m)
- w er total tykkelse på ytterveggene mot terreng (m)
- λ er grunnens varmekonduktivitet (W/mK)
- R_f er gulvets samlede varmemotstand (uten varmeovergangsmotstand R_{si} og R_{se}) (m^2K/W)

Så bestemmes parameteren d_w , kjellerveggen under terreng sin ekvivalente tykkelse, med formelen;

$$d_w = \lambda \cdot (R_{si} + R_w + R_{se}) \quad (10)$$

hvor:

- D_w er kjellerveggen under terreng sin ekvivalente tykkelse (m)
- R_w er veggens samlede varmemotstand (m^2K/W)

Dermed kan man sjekke om kjellergulvet er godt isolert, med formelen;

$$d_t + \frac{z}{2} \geq B' \quad (11)$$

hvor:

- z er dybden kjellergulvet ligger under terrengnivå (m)

Dersom ligning (11) er sann, kan man bruke ligning (12) for å bestemme U-verdien til gulvet på grunn;

$$U_{bf} = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t + \frac{z}{2}} \quad (12)$$

Hvis ligning (11) ikke er sann kan man bruke ligning (13) til å bestemme U-verdien til gulvet på grunn;

$$U_{bf} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t + \frac{z}{2}} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t + \frac{z}{2}} + 1 \right) \quad (13)$$

Videre beregnes U-verdien til veggene mot terreng med formelen;

$$U_{bf} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_t}{d_t + z} \right) \cdot \ln \left(\frac{z}{d_w} + 1 \right) \quad (14)$$

Det er mulighet for å gå videre og beregne effektiv U-verdi for hele kjelleren og inkludere effekten av kuldebroer. Dette er utelatt fra prosjektet på grunn av kompleksiteten til byggets utforming og egen beregning av kuldebro.

3.2 Kuldebroer

3.2.1 Standardverdier

For noen av kuldebroverdiene som brukes til beregning av normalisert kuldebroverdi, er byggforsk sitt kuldebroatlas brukt (SINTEF Byggforsk, u.d.). Verdiene som velges fra atlasen er konservative verdier i forhold til den faktiske kuldebroverdien for bygningsdelen. Det betyr at det er valgt verdier som er høyere enn det en faktisk verdi ville vært. Dette for å sikre at i tilfellet der normalisert kuldebroverdi avviker fra faktisk verdi, vil det være på den konservative siden av avviket.

3.2.2 Beregning i THERM

Når det utføres en simulering i THERM får man ut U-verdi faktorer for bygningsdelen, samt lengden U-verdi faktoren gjelder for. Dermed kan man bruke metodene beskrevet i prosjektrapport 25 fra SINTEF, som baserer seg på NS-EN ISO 10211:2017 (Gustavsen, et al., 2008). Den norske standarden er å bruke innvendige mål, og det er også brukt i beregningene i dette prosjektet.

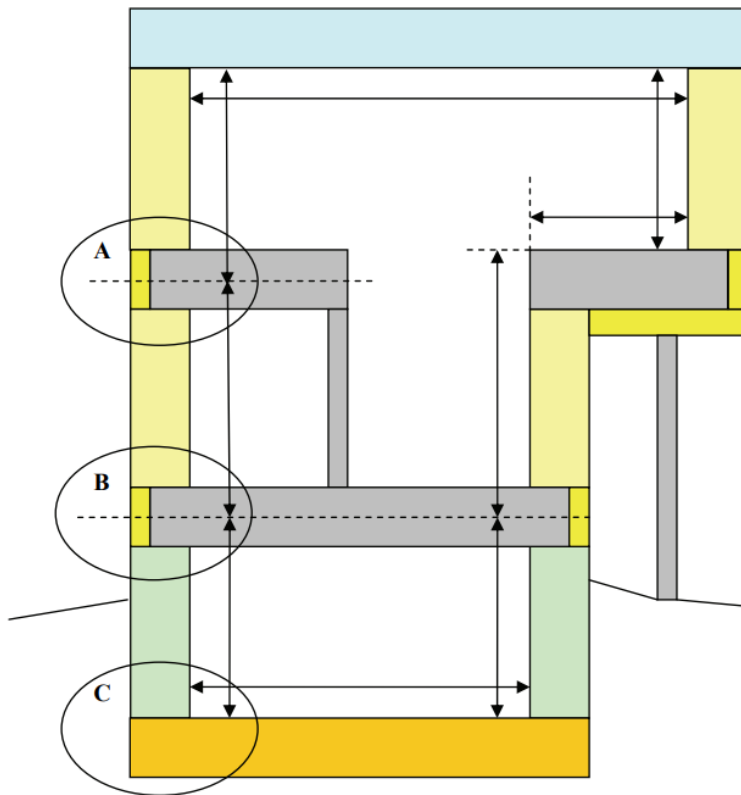
Generelt for alle beregninger av lineær kuldebroverdi brukes formelen;

$$\Psi_k = L^{2D} - \sum U_i \cdot L_i \quad (15)$$

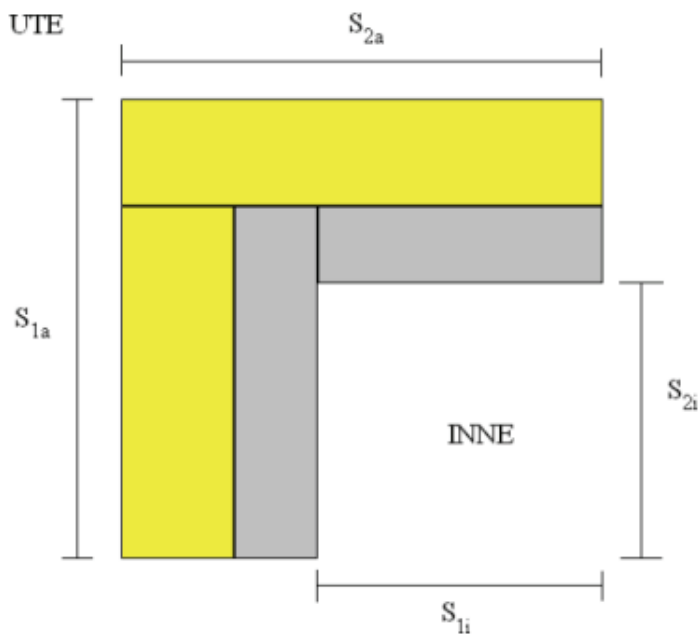
hvor:

- Ψ_k er den lineære kuldebroverdien til tilslutningen (W/mK)
- L^{2D} er produktet av U-verdi faktoren og lengden som faktoren er beregnet for, fra THERM etter simulering
- U_i er U-verdiene til bygningsdelene som er tilsluttet kuldebroen
- L_i er lengden til av de tilsluttede bygningsdelene (se figur 1, 2 og 3)

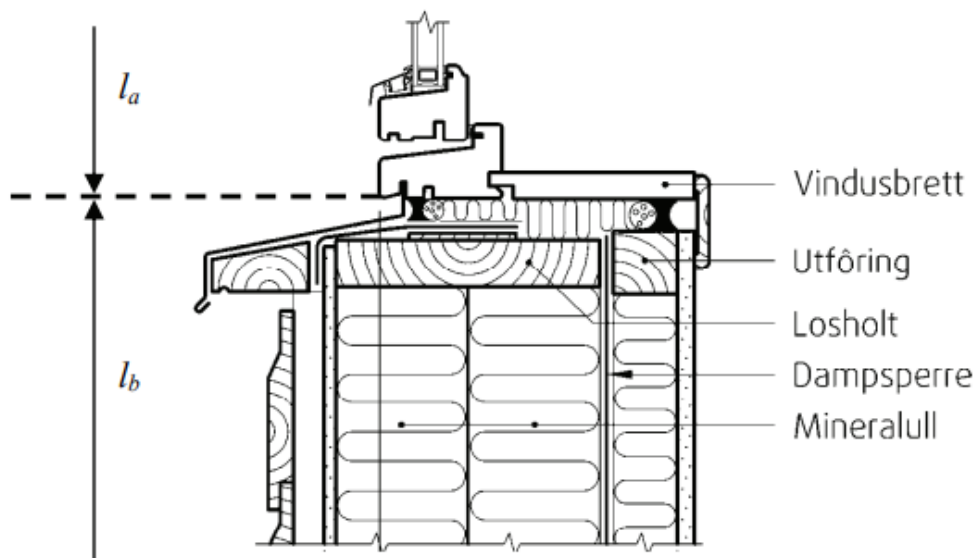
Ligning (15) brukes på tilslutninger mellom vegger og tak, eller vegger og vinduer. For de ulike tilslutningene viser figur 1, 2, og 3 hvilke lengder L_i som brukes.



Figur 1. Lengder brukt til beregning av kuldebroer i THERM for etasjeskille og tak, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).



Figur 2. Innvendig lengder i hjørner som brukes til beregning av kuldebroer i THERM, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).



Figur 3. Lengder som brukes ved beregninga av kuldebroer for vinduer ved bruk av THERM, hentet fra Prosjektrapport 25 (Gustavsen, et al., 2008).

3.2.3 Normalisert kuldebroverdi

Normalisert kuldebroverdi er det samlede varmetapet gjennom alle kuldebroene, dividert på oppvarmet BRA. For å beregne denne verdien brukes metoden i byggforskblad 472.001 (SINTEF Byggforsk, 2019). Normalisert kuldebroverdi beregnes da etter formelen;

$$\Psi'' = \frac{\sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j X_j}{A_{fl}} \quad (16)$$

hvor:

- Ψ'' er normalisert kuldebroverdi (W/m²K)
- Ψ_k er lineærkuldebroverdi for tilslutningen (W/mK)
- l_k er kuldebroens lengde i tilslutningen (m)
- X_j er punktkuldebroverdi (W/K)
- A_{fl} er samlet oppvarmet del av BRA

4 Konstruksjon

4.1 Generelt

4.1.1 Bygningsmaterialer

De bærende konstruksjonsdelene er hovedsakelig av konstruksjonsvirke, med innslag av ståldragere som overdekning over vinduer. Som isolerende materiale er trefiberisolasjon fra Hunton brukt i alle bygningsdeler. Noen steder er isolasjonsmatter brukt, som i innervegger og påforinger. I tak, bjelkelag og bindingsverk er det brukt blåseisolasjon. Som vindtetting og vindavstiving er trefiber vindtett plater fra Hunton brukt, og innvendig er Intello dampbrems brukt i klimakonstruksjonen. Innvendig gips er brukt som innvendig kledning på vegger og i himling. Utvendig kledning består av liggende bordkledning. De forskjellige bygningsdelene er beskrevet mer i detalj i underkapitlene som følger. I punkt 4.1.2 er relevante produktdata til alle materialene som brukes til beregningene listet opp. I punkt 4.1.3 er det en tabell med byggets mål og arealer som er brukt i beregningene.

4.1.2 Material- og sjiktdata

I tabell 1 er nødvendig data for de materialene som er brukt i beregningene listet opp. De fleste verdiene er hentet fra byggforsklad 471.010 (SINTEF Byggforsk, 2020). Dataene er brukt i beregninger for U-verdi og kuldebroer, og simuleringer i THERM.

Tabell 1. Verdier for varmekonduktivitet brukt i beregningene

Materiale	Tykkelse (mm)	Varmekonduktivitet, λ (W/mK)	Referanse
Konstruksjonsvirke	23, 36, 48, 98, 198, 248	0,13	BF 471.010
Finerplate	12	0,13	BF 471.010
Gulvspon	22	0,14	BF 471.010
OSB-plate	18	0,13	BF 471.010
Trefiberisolasjon	48, 98, 100, 198, 400, 450	0,038	Hunton Nativo (Hunton, u.d.)
Trykkfast isolasjon	100	0,035	Jackon (Jackon Isolasjon, 2019)
Leca Isoblokk, lecasjikt	82	0,13	Leca (Leca, 2021)
Leca isoblokk, isolasjonssjikt	86	0,024	Leca (Leca, 2021)
Trefiber vindtettplate	12	0,049	Hunton (Hunton, u.d.)
Innvendig gips	12	0,21	BF 471.010
Ståldrager	200	50	BF 471.010
Grunnmateriale (pukk/grus)	-	2,0	BF 471.010

I tillegg brukes verdier for varmeovergangsmotstander for ulike retninger og sjikt, i beregning av U-verdier og simuleringer i THERM (tabell 2). Verdiene er hentet fra byggforskblad 471.008 (SINTEF Byggforsk, 2021).

Tabell 2. Varmeovergangsmotstand for sjikt som er brukt i beregningene, hentet fra byggforskblad 471.008.

Sjikt	Varmeovergangsmotstand, R_s (m^2K/W)
Utvendig ventilert kledning, horisontalt	0,13
Utvendig ventilert kledning, oppover	0,10
Utvendig ventilert kledning, nedover	0,17
Innvendig, horisontalt	0,13
Innvendig, oppover	0,10
Innvendig, nedover	0,17
Uventilert sjikt, himling	0,45

4.1.3 Lengder og areal

I tabell 3 og 4 er noen nødvendig data for byggets omkrets og areal. Disse verdiene er brukt i beregningene av U-verdier, kuldebroer, samt SIMIEN-evaluering. Øvrige verdier som er brukt er gitt ved tegninger i vedlegg 1. Alle verdier er utregnet fra plan- og snittegninger.

Tabell 3. Arealer og omkrets for etasjene med tradisjonell yttervegg

Område	Areal, oppvarmet BRA (m^2)	Omkrets (m)
Kjeller	135,4	59,9
1.etasje	131,9	-*
2.etasje	107,0	-*
Totalt	374,3	-*

*Ikke relevant for beregninger

Tabell 4. Arealer og omkrets for etasjene med todelt yttervegg

Område	Areal, oppvarmet BRA (m ²)	Omkrets (m)
Kjeller	135,4	59,9
1.etasje	123,3	-*
2.etasje	99,8	-*
Totalt	358,5	-*

*Ikke relevant for beregninger

4.2 Tak

4.2.1 Tak

Takkonstruksjonen er et flatt tak med sperrer av 450 mm høye gitterdragere, laget av 48x98 mm konstruksjonsvirke og spikerplater. Sperrere er blåseisolert med trefiberisolasjon og ligger med c/c 600mm. Under gitterdragerne ligger en dampbrems, med 23mm himlingslekt og innvendig kledning av gips. På oversiden av sperrere ligger en 12 mm finerplate, med kombinert vindtett og undertaksduk på oversiden. Deretter krysslekting, 22 mm sponplater og takmembran. Øverst er et beskyttende lag av grus. Se tegning 3.2 for detalj. Tak over inngangsparti har samme oppbygning.

4.2.2 Terrasser

Terrassene har tilnærmet lik konstruksjon som taket, men det er noe forskjeller. Terrassen i 1.etasje har et bjelkelag av 48x248 mm konstruksjonsvirke (se tegning 3.3.4), mens terrassen i 2.etasje har gitterdragere, samme som bjelkelaget i etasjen. Begge terrassene har undertak, 36 mm luftelekter, 22 mm sponplate med takmembran, og enten fliser eller terrassebord som gulv.

4.3 Gulv på grunn

Gulv på grunn er bygd opp med puk i grunnen, med totalt 200 mm trykkfast isolasjon. Mellom isolasjonssjiktene er det en radonmembran, og PE-plast på oversiden av isolasjonen. Det er støpt et 100 mm tykt dekke med varmekabler som gulv på grunn, med knotteplast og laminat som gulv (se tegning 3.5).

4.4 Etasjeskiller

4.4.1 Etasjeskiller 1.etasje/2.etasje

Etasjeskiller i 1.etasje er gitterdragere med høyde 400 mm på c/c 600, med innvendig gips på undersiden i kjellerhimlingen. Mellom gips og gitterdrager er det festet en duk for tetting ved blåseisolering. På oversiden er det 22 mm sponplater, gulvunderlag og 23 mm tregulv. Bjelkelaget i 2.etasje er bygd opp på samme måte, men med gitterdragere med høyde på 450 mm (se tegning 3.3.3 og 3.4).

4.4.2 Etasjeskiller under utkrager

Under utkragerdel i 1.etasje er konstruksjonen litt annerledes. Her er bjelkene lagt med c/c 400 mm, og vindtett duk på undersiden av bjelkelaget som vindsperre. Luftlekting med 48x48mm og himlingsbord av 22x98mm panel (se tegning 3.7).

4.5 Yttervegg kjeller

4.5.1 Yttervegg mot friluft

Kjellerveggene mot friluft er bygd opp av Leca Isoblokk 250 mm, hvor vangene er 82 mm brede, og isolasjonssjiktet av skum er 86 mm (Leca, 2021). Utvendig er Lecablokkene pusset, og slammet innvendig. På innsiden er det en isolert ikke-bærende bindingsverksvegg, 48x98 mm, med gips som innvendig kledning (se tegning 3.4 og 3.5).

4.5.2 Yttervegg mot terreng

Kjeller vegg mot terreng er bygd opp på samme måte som kjellervegg mot friluft, med unntak av utvendig materialer. Fra pusset utvendig overflate isoleres veggen utvendig med 100 mm trykkfast isolasjon, med knotteplast mot terrenget. Det er blitt brukt leca som fyllmasse mot veggen, men i beregningene er det brukt puk som terreng på grunn av usikkerhet med tykkelse på lecasjiktet (se tegning 3.4 og 3.5).

4.6 Tradisjonell ytterveggkonstruksjon

Den tradisjonelle ytterveggkonstruksjonen er bygd opp av bindingsverk av 48x198mm konstruksjonsvirke med c/c 600 mm, med innvendig påføring av 48x48mm lekt. Innvendig kledning er 12 mm gips, med dampbrems mellom påføring og bindingsverk. Vindtett trefiberplate som vindavstiving og vindtetting, 36mm luftelekt og 22mm bordpanel som utvendig kledning (se tegning 3.1.1).

4.7 Todelt ytterveggløsning

Den todelte ytterveggløsningen er basert på løsningene til Norsk Treteknisk Institutt, og i prosjektet brukes todelte yttervegger med utvendig bæring (Clementz, et al., 2011). Dette betyr at den bærende ytterveggen tar alle laster, og den ikke bærende er å regne som en ikke-bærende innervegg. Den bærende ytterveggen er isolert bindingsverk med dimensjon 48x198 mm, med trefiber vindtettplate utvendig, med luftelekt og bordkledning. Den innvendige veggen er av 48x98 mm konstruksjonsvirke, fylt med trefiberisolasjon og 12 mm gips som innvendig kledning. Mellom de to veggene er et isolasjonssjikt på 100 mm. Dampbrems ligger mellom den innvendige veggen og isolasjonssjiktet (se tegning 5.1).

4.8 Andre bygningskomponenter

Bygget inneholder også andre øvrige komponenter. Dette er vinduer, terrassedører og inngangsdører, og størrelser og data brukt i beregninger er beskrevet i vedlegg A3. Innerdører og øvrige komponenter er ikke nødvendige for beregningene i dette prosjektet, da det ikke er en del av klimaskjermen.

5 Resultat

5.1 U-verdi

U-verdiene er beregnet etter NS-EN ISO 6946:2017, som vist i underkapittel 3.1. I tabellen under er bygningsdelene listet opp med tilhørende U-verdier. Se vedlegg B for excel-ark med utregninger.

Tabell 5. Beregnede U-verdier for bygningsdelene

Bygningsdel	U-verdi (W/m ² K)
Tradisjonell yttervegg	0,19
Todelt yttervegg	0,11
Tak	0,11
Terrasse 1. etasje	0,17
Terrasse 2. etasje	0,16
Etasjeskiller utkrager 1.etasje	0,16
Kjellervegg over terreng	0,15
Kjellervegg under terreng	0,09
Gulv på grunnen	0,13

I tabell 5 kan en se at det er en reduksjon på 0,08 W/m²K ved endring av ytterveggkonstruksjonen. Dette er i hovedsak på grunn av den økte isolasjonsmengden, men også at det legges inn et sjikt med kun isolasjon. Dette sjiktet med lav varmekonduktivitet (0,038 W/mK) fungerer som kuldebrobryter, og reduserer varmetapet i gjennomgående materialer med høy varmekonduktivitet. En annen ting å merke seg er de lave U-verdiene for kjellervegg, som er godt innenfor minimumskravet for U-verdi i TEK17 (Direktoratet for Byggkvalitet, 2020). Kjellerveggene inneholder Leca Isoblokker, som har et isolasjonssjikt med svært lav varmekonduktivitet (0,024 W/mK). I kombinasjon med den isolerte bindingsverksveggen blir dette en godt isolert yttervegg, og enda bedre med trykkfast isolasjon mot terreng.

5.2 Kuldebroer

Kuldebroverdier er hentet fra standarder eller beregnet med simuleringer i THERM og metode fra prosjektrapport 25, som vist i underkapittel 3.2. I tabell 6 er ulike tilslutninger mellom bygningsdeler, og tilhørende kuldebroverdi og samlet lengde listet opp. Se vedlegg C for excel-ark med utregninger og THERM-filer brukt til simuleringer.

Tabell 6. Kuldebroverdier for tilsluttende bygningsdeler

Kuldebro	Verdi (tradisjonell yttervegg) (W/mK)	Verdi (todelt yttervegg) (W/mK)	Samlet lengde (m)
Utv. hjørne, bindingsverk	0,037	0,049	30,8
Innv. Hjørne, bindingsverk	-0,061	-0,048	13,05
Vindu i bindingsverkvegg	0,015	0,012	132,4
Vindu i kjellervegg	0,012	0,012	31,5
Etasjeskiller-vindu-utkragerdel	0,089	0,064	53,2
Etasjeskiller-vinduer	0,109	0,078	8,5
Etasjeskiller-langvegg	0,013	0,026	8
Etasjeskiller-gavlvegg	0,026	0,032	12,76
Tak-langvegg	0,052	0,029	25,2
Tak-gavlvegg	0,058	0,031	11,5
Utv. hjørne kjeller mot friluft	0,035	0,035	10,16
Utv. hjørne kjeller mot terreng	0,065	0,065	14,7
Innv. hjørne kjeller mot friluft	0,061	0,061	2,45
Innv. hjørne kjeller mot terreng	0,054	0,054	9,8
Utkrager, ståldrager under 1.etg	0,062	0,031	12,2
Yttervegg-etasjeskiller-kjeller	0,054	0,063	40,9
Kjellervegg-gulv mot terreng	0,044	0,044	59,9
Total kuldebro (W/K)	18,960	16,598	
Totalt BRA (m ²)	374,3	358,5	
Normalisert kuldebro (W/m ² K)	0,051	0,046	

Normalisert kuldebroverdi oppgitt med tre desimaler (tabell 6). I SIMIEN-evaluering brukes det kun to desimaler da dette er normen (se vedlegg D). Lengden til kuldebroene er beregnet ut fra tegninger i vedlegg A1 og A2. Normalisert kuldebroverdi reduseres med $0,004 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved ny ytterveggkonstruksjon.

Det er spesielt vinduer som står for det største varmetapet. Sånn tilslutningene er utført, gjør at det ikke er rom for mye isolerende materiale som kan fungere som kuldebrobryter. Materialer som har høy varmeledningsevne blir gjennomgående i tilslutningene, og øker varmetapet. Med økt veggtykkelse reduseres derimot varmetapet, og det er fordi med økt mengde isolasjon i yttervegg gir mer plass til isolasjon rundt vinduer som kan fungere som kuldebrobryter.

Varmetap i tilslutninger mellom yttervegg og tak reduseres også, og viser effekten av et rent isolasjonssjikt i yttervegg. Dette bryter varmegjennomgangen i toppsvill og innvendig påforing, og nærmest halverer det ekstra varmetapet i tilslutningen. Også ved utkragedel med ståldrager i 1. etasje reduseres varmetapet. Dette skyldes det gjennomgående isolasjonssjiktet i todelt yttervegg, samt økt isolasjonsmengde mellom ståldrager og innvendig flate.

Det økte varmetapet mellom etasjeskiller og todelte yttervegger skyldes trolig at den økte isolasjonsmengden i yttervegg har liten innvirkning på selve tilslutningen. Den har derimot stor innvirkning på tilstøtende bygningsdeler i tilslutningen (de todelte ytterveggene), og dermed øker kuldebroeverdien, altså det verdien til det ekstra varmetapet. Dette skjer også med utvendig og innvendig hjørne av bindingsverk. Det er altså den reduserte varmegjennomgangen, U-verdien, til tilstøtende bygningsdeler, i tillegg til ingen endring i selve tilslutningen som gjør at varmetapet blir større med todelte yttervegger.

5.3 SIMIEN-evaluering

Tabell 7–12 er utklipp fra resultatene fra SIMIEN-evalueringene. Dataene som er brukt i evalueringene finnes i vedlegg D3 og D4. Det er valgt å ta med data som viser de verdiene som er relevante for energibehov og varmetap. Det er kun to forskjeller på de faktorene som er lagt inn i SIMIEN for de to evalueringene; ytterveggs U-verdi og oppvarmet BRA. Hver av de tre tabellene (tabell 7-9 og tabell 10-12) er måter å oppfylle energikravene i TEK17 (Direktoratet for Byggkvalitet, 2020).

Tabell 7-9 er fra evaluering av bygget med tradisjonelle yttervegger. For fullt evalueringsdokument, se vedlegg D1.

Tabell 7. Tradisjonell yttervegg: Byggets verdier sammenlignet med energikrav ved energiltaksmetoden i TEK17

Energitiltak (§14-2 (2))		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Samlet glass-, vindus og dørareal delt på bruksarealet [%]	36,3	25,0
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,16	0,18
U-verdi tak [W/m ² K]	0,12	0,13
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m ² K]	0,10	0,10
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	0,80	0,80
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0,05	0,05
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1,5	0,6
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	80	80
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	1,50

Energikravet etter energiltaksmetoden (tabell 7) er ikke oppfylt. Dette er grunnet samlet glass-, vindus- og dørareal delt på bruksareal, samt lekkasjetall og temperaturvirkningsgrad for varmegjenvinner. De to siste punktene er derimot eksempelverdier. Verdier som lekkasjetall må testes ved trykktesting og verdien som er brukt er ikke en nøyaktig verdi fra bygget.

Tabell 8. Tradisjonell yttervegg: Byggets varmetapstall sammenlignet med krav ved omfordeling av varmetap fra TEK17

Omfordeling energiltak (§14-2 (2), varmetapstall)		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Varmetapstall yttervegger	0,16	0,20
Varmetapstall tak	0,06	0,06
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0,04	0,04
Varmetapstall glass/vinduer/dører	0,29	0,20
Varmetapstall kuldebroer	0,05	0,05
Varmetapstall infiltrasjon	0,09	0,03
Varmetapstall ventilasjon	0,08	0,08
Totalt varmetapstall	0,76	0,66

Tabell 8 viser varmetapstall til bygningsdelene, mot kravene etter omfordelingsmetode (Direktoratet for Byggkvalitet, 2020). Den viser at energikravet her ikke er godkjent, da varmetapstallet for glass, vinduer og dører er for høyt. Det samme gjelder infiltrasjon, som er resultat av eksempelverdien for lekkasjetall. Selv om varmetapstallet for yttervegg ligger under kravet, klarer fortsatt ikke bygget å tilfredsstillere kravet for totalt varmetapstall. Dette er i hovedsak på grunn av varmetapet rundt vinduer og mengden vinduer i bygget.

Tabell 9. Tradisjonell yttervegg: Byggets energibehov for hver post, sammenlignet med forskriftskravene fra TEK17

Energiramme (§14-2 (1), samlet netto energibehov)		Verdi
Beskrivelse		
1a Beregnet energibehov romoppvarming		35,6 kWh/m ²
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)		4,2 kWh/m ²
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)		29,8 kWh/m ²
3a Beregnet energibehov vifter		4,4 kWh/m ²
3b Beregnet energibehov pumper		0,0 kWh/m ²
4 Beregnet energibehov belysning		11,4 kWh/m ²
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr		17,5 kWh/m ²
6a Beregnet energibehov romkjøling		0,0 kWh/m ²
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)		0,0 kWh/m ²
Totalt beregnet energibehov		102,9 kWh/m ²
Forskriftskrav netto energibehov		104,3 kWh/m ²

Den siste metoden for å tilfredsstillere energikravene fra TEK17 er energirammemetoden, hvor totalt beregnet energibehov må være innenfor kravet til netto energibehov. Tabell 9 viser at bygget tilfredsstiller dette kravet, og viser også totalt beregnet energibehov på 102,9 kWh/m² per år.

Tabell 10-12 gjelder etter at ytterveggen ble endret til todelt yttervegg. For fullt evalueringsdokument, se vedlegg D2.

Tabell 10. Todelt yttervegg: Byggets verdier sammenlignet med energikrav ved energiltaksmetoden i TEK17

Energiltak (§14-2 (2))			
Beskrivelse	Verdi	Krav	
Samlet glass-, vindus og dørareal delt på bruksarealet [%]	37,9	25,0	
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,11	0,18	
U-verdi tak [W/m ² K]	0,12	0,13	
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m ² K]	0,10	0,10	
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	0,80	0,80	
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0,05	0,05	
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	1,5	0,6	
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	80	80	
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	1,50	

Tabell 10 viser at bygget fortsatt ikke tilfredsstillt kravet ved energiltaksmetoden. Dette er selv med yttervegg med lavere U-verdi. En kan også se at prosentvis glass-, vindus- og dørareal har økt fra tabell 7. Dette er på grunn av at oppvarmet BRA er lavere i evaluering av bygget med todelt yttervegger.

Tabell 11. Todelt yttervegg: Byggets varmetapstall sammenlignet med krav ved omfordeling av varmetap fra TEK17

Omfordeling energiltak (§14-2 (2), varmetapstall)			
Beskrivelse	Verdi	Krav	
Varmetapstall yttervegger	0,11	0,21	
Varmetapstall tak	0,06	0,07	
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0,04	0,04	
Varmetapstall glass/vinduer/dører	0,30	0,20	
Varmetapstall kuldebroer	0,05	0,05	
Varmetapstall infiltrasjon	0,09	0,03	
Varmetapstall ventilasjon	0,08	0,08	
Totalt varmetapstall	0,73	0,68	

Det er verdt å merke seg reduksjonen i totalt varmetapstall, fra 0,76 til 0,73 ved endring av ytterveggkonstruksjon. Dette er i hovedsak på grunn av at varmetapstallet for yttervegger reduseres, men det er derimot ikke nok til å få godkjent totalt varmetapstall for bygget. Dette skyldes fortsatt det høye varmetapstallet rundt glass, vinduer og dører.

Tabell 12. Todelt yttervegg: Byggets energibehov for hver post, sammenlignet med forskriftskravene fra TEK17

Energiramme (§14-2 (1), samlet netto energibehov)	
Beskrivelse	Verdi
1a Beregnet energibehov romoppvarming	32,1 kWh/m ²
1b Beregnet energibehov ventilasjonsvarme (varmebatterier)	4,1 kWh/m ²
2 Beregnet energibehov varmtvann (tappevann)	29,8 kWh/m ²
3a Beregnet energibehov vifter	4,4 kWh/m ²
3b Beregnet energibehov pumper	0,0 kWh/m ²
4 Beregnet energibehov belysning	11,4 kWh/m ²
5 Beregnet energibehov teknisk utstyr	17,5 kWh/m ²
6a Beregnet energibehov romkjøling	0,0 kWh/m ²
6b Beregnet energibehov ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	0,0 kWh/m ²
Totalt beregnet energibehov	99,3 kWh/m ²
Forskriftskrav netto energibehov	104,5 kWh/m ²

Igjen er energikravet fra TEK17 godkjent ved bruk av energirammemetoden. I tillegg reduseres energibehovet med 3,6 kWh/m² i forhold totalt beregnet energibehov fra tabell 9. Hovedsakelig blir energibehovet redusert for romoppvarming, som resultat av mindre varmetap gjennom yttervegg (tabell 11).

6 Diskusjon

6.1 Metode

For metoden er det brukt litteratur, beregninger og simuleringer for å få resultatene i kapittel 5. Litteraturen anses som å være pålitelig da kildene hovedsakelig er fra uavhengige, anerkjente forskningsinstitutter, eller fra kjente produsenter med godkjente ytelseserklæringer. Det var også planlagt å gjøre alle beregninger for hånd for økt læringsutbytte, men det viste seg å være problematisk og mer tidkrevende enn først antatt. Dermed fulgte noen feilkilder ved bruk av THERM og U-verdier. Videre drøfting av feilkilder ved beregninger og simuleringer er diskutert i de følgende underkapittel, i tillegg til konstruksjonsdel og SIMIEN-evaluering.

6.2 Konstruksjon

Eneboligen som er brukt i prosjektet er et komplekst bygg med mange bygningsdeler og tilslutninger som ikke er standardløsninger. Ved bruk av et bygg uten så mange komplekse tilslutninger ville resultatet muligens blitt renere, uten for mange antagelser og tilnærminger. Det er også mye vindusareal som reduserer mengden yttervegg. Med færre vinduer ville forskjellene blitt større ved endring av ytterveggkonstruksjon. I tillegg ville det også blitt mer tid til å utvikle detaljer på alle tilslutninger og bygningsdeler, og gjøre beregninger på alle disse.

Tegningene som er produsert, plan/snitt/detalj-tegninger, er basert på standardløsninger fra Byggforskblader og gjenkallelse av hvordan det ble bygget. Det vil forekomme avvik fra hvordan bygget er teoretisk prosjektert i tegningene, og hvordan detaljene ble utført i praksis. Dette er noe som alltid vil være et mulig avvik i overgangen fra prosjektering til utførelse.

6.3 U-verdi

Det var planlagt å gjøre U-verdiberegningene for hånd for å så vise resultatene i tabell, med håndberegningene som vedlegg. Dette viste seg å være mer tidkrevende enn antatt, og det ble besluttet å bruke Excel, ettersom flere beregninger brukte samme metode. Dette reduserte tidsbruken på selve beregningene, men krevde også grundig sjekk av beregningene, da feilene lett gjemte seg i cellene. Beregningene av U-verdi er derfor nøye gått gjennom, og noen er også dobbeltsjekket med THERM og opp mot standardverdier fra Byggforsk (SINTEF Byggforsk, u.d.).

Ved beregning av U-verdi for konstruksjoner mot grunn er Byggforskblad 471.009 brukt. Dette byggforskbladet gikk ut i 2018, men er derimot brukt i beregningene ettersom anvisningen ble brukt i emnet BYGT2310 Husbyggingsteknikk, og det ikke ble funnet nyere anvisninger på beregning av konstruksjoner mot grunn.

Resultatene i tabell 5 viser U-verdiene for bygningsdelene. Ettersom disse er håndberegnet, er noen av bygningsdelene sjekket i THERM og opp mot lignende standardløsninger fra byggforskserien (SINTEF Byggforsk, u.d.). Differansen i verdiene som er beregnet for hånd og lignende standardløsninger, var liten. Det viser også THERM når bygningsdelene blir sjekket der. Medregnet at konstruksjonene heller ikke er helt like, regnes resultatene i tabell 5 til å være pålitelige.

6.4 THERM og kuldebroer

Kuldebroer var også en faktor som egentlig skulle beregnes for hånd ved hjelp av NS-EN ISO 10211:2017. Dette er omfattende arbeid og knyttet til relativt store avvik. Derfor ble programvaren THERM valgt for å beregne varmetap ved tilslutning av bygningsdeler. Feilkildene her ligger i uerfaren bruk av THERM som beregningsprogram, selv om det ble funnet litteratur og videoveiledning som var til god hjelp. Derfor er det vanskelig å evaluere resultatene og hvor realistiske disse er. Dette avviket er til en viss grad blitt redusert ved å sjekke verdiene opp mot lignende konstruksjoner i Byggforsk sitt kuldebroatlas, men vil fortsatt inneholde noen feilkilder (SINTEF Byggforsk, u.d.).

Dette inkludere også der det direkte er brukt standardverdier fra kuldebroatlas, både ved tilnærming av konstruksjon og faktisk utførelse av tilslutningen (SINTEF Byggforsk, u.d.). For å få feilkildene over på den konservative siden, altså at verdiene som er brukt er dårligere enn faktiske verdier, er verdiene tatt fra løsninger som er knyttet til større varmetap enn det som er prosjektet.

Som beskrevet i punkt 3.2.2, er U-verdiene brukt til å bestemme varmetapet ved tilslutningen. Ettersom U-verdiene er håndberegnet, og ikke beregnet i THERM vil det være mulige feilkilder i hva THERM anser som å være U-verdien til tilstøtende bygningsdeler. Dette er til en viss grad tatt høyde for ved at noen av bygningsdelene er sjekket i THERM alene for å se om U-verdiene stemmer overens. De som er sjekket er yttervegger og tak, hvor begge stemte med håndberegnet U-verdi.

Normalisert kuldebroverdi finnes ved å bruke oppvarmet BRA i bygget. Eneboligens oppvarmet BRA er forskjellig med henholdsvis tradisjonell og todelt yttervegg. Ettersom målet med oppgaven er å sjekke byggets energibehov ved endring av ytterveggkonstruksjon, er denne feilkilden ansett som å være neglisjerbar.

Ser man på resultatene i tabell 6 avviker noen fra standard verdier, slik som innvendige yttervegghjørner i kjeller. Innvendige hjørner ender som oftest med negative kuldebroverdier, mens simuleringer i THERM gir positive verdier. Om dette er sanne verdier er usikkert, og er en mulig feilkilde.

6.5 SIMIEN

For de to SIMIEN-evalueringene av bygget er det brukt forskjellige verdier for oppvarmet BRA. Dette kan merkes i resultatet, hvor forskriftskravet for netto energibehov er forskjellig. Denne forskjellen regnes å være neglisjerbar, da netto energibehov oppgis per m².

I evalueringene er det mulig å legge inn mange flere faktorer enn det som er gjort i dette prosjektet. Det er ikke lagt inn faktorer som skyggefaktorer o.l., samtidig som det er brukt standardverdier for elforsyning og ventilasjon. Disse faktorene anses som å være feilkilder ettersom det ikke nøyaktig beskriver eneboligens situasjon. Dette er derimot tolerert ettersom integriteten til formålet med oppgaven er beholdt, ved å kun endre oppvarmet BRA og U-verdi til yttervegg mellom evalueringene.

Ved bruk av SIMIEN gjennomføres en teoretisk simulering, og faktiske energibehov kan avvike fra de teoretiske verdiene fra evalueringene. For å evaluere om verdiene for energibehov per m² er gyldige er de sjekket opp mot tall fra Forbrukerguiden, som er basert på tall fra SSB for strømforbruk (Forbrukerguiden, 2022). Selv om de ikke oppgir tall for eneboliger over 300 m², er det i tråd med funnene fra SIMIEN-evalueringen, og verdiene differensierer ikke nevneverdig.

Verdiene i tabell 9 og tabell 12 viser en liten reduksjon i totalt beregnet energibehov. Som nevnt i underkapittel 6.2 ville også mindre vindusareal ført til større påvirkning når ytterveggkonstruksjonen ble endret. Dette ville hatt en effekt på det totale energibehovet, i tillegg til det totale varmetapet da totalt glass/vindus/dørareal blir redusert.

7 Konklusjon

7.1 Energibehov

Formålet med prosjektet var å finne ut hva en økt isolasjonsmengde i yttervegg har å si for eneboligen sitt energibehov, og hvor det største varmetapet ligger.

Energibehovet går fra 102,9 kWh/m² til 99,3 kWh/m² når isolasjonstykkelsen i veggen økes. Dette er en nedgang på 3,5%, som viser at det ikke har en altfor stor effekt på det totale energibehovet til eneboligen. Tabell 9 og tabell 12 viser at nedgangen hovedsakelig er knyttet til romoppvarming.

For å gi et perspektiv på gevinsten av redusert energibehov kan en bruke strømpriser for å se hva som er mulig å spare. Strømprisene er forventet å holde seg høye i en god tid fremover, som vil si at selv små energibesparelser kan gi store gevinster. Tabell 13 viser byggets strømkostnad i 2021, med tradisjonell og todelt yttervegg. Gjennomsnittsprisene er hentet fra NorgesEnergi, for strømsone 1 (NorgesEnergi, 2022).

Tabell 13. Strømkostnad for energibehov ved tradisjonell og todelt yttervegg

År	Gjennomsnittlig strømpris (øre/kWh)	Kostnad, Eneboligen med tradisjonell yttervegg (102,9 kWh/m ² , 374,3 m ²)	Kostnad, Eneboligen med todelt yttervegg (99,3 kWh/m ² per år, 358,5 m ²)
2021	144,10	55 500,79 NOK	51 298,23 NOK

Det er altså mulig å spare 4 202,56 NOK per år dersom det stemmer at strømprisene skal holde seg i tiden fremover. Gjennom flere år kan det ha stor innvirkning på total strømkostnad.

7.2 Varmetap og kuldebroer

For begge evalueringer av bygget, viser tabell 8 og tabell 11 at det største varmetapet kommer fra vinduer og dører, og at den todelte yttervegløsningen reduserer det totale varmetapstallet med kun 0,03. Tabell 6 viser at de høyeste kuldebroverdiene ligger i tilslutningene mellom vinduer og etasjeskiller. Tabellene viser også at den todelte ytterveggen reduserer varmetapet i yttervegg, samt i overgang mellom yttervegg og tak, og utkraget etasjeskiller i 1.etasje. Med todelte yttervegger øker derimot kuldebroverdiene for tilslutninger mellom kjeller og yttervegg mot friluft, da det ekstra varmetapet blir større når differensen på varmetap mellom tilslutning og tilstøtende bygningsdeler blir større.

7.3 Muligheter for videreførelse av prosjektet

Det er flere muligheter for videreførelse av prosjektet. Energibehovet er oppgitt i per år, og det hadde vært interessant å se på det økonomiske aspektet ved redusert energibehov. For eksempel ekstra materialkostnader og hvor lang tid det tar å tjene inn dette på spart energi og kostnader på strøm. Det er også mulighet for å se på løsninger for å redusere varmetapet mellom de tilsluttede bygningsdelene, eller på fuktproblematikk ved å øke veggtykkelsen. Eventuelt kan en se på andre bygg og gjøre flere evalueringer av en samling boliger for å skape et bilde av hvordan bygningsdeler påvirker energibehovet.

Referanser

Clementz, C. A. et al., 2011. *ENTRÉ-energieffektive trekonstruksjoner, Delrapport 2: Yttervegger i tre som kan tilfredsstillte passivhuskrav*, s.l.: Norsk Treteknisk Institutt.

Direktoratet for Byggkvalitet, 2018. *Dette er energikravene i byggteknisk forskrift*.

[Internett]

Available at: <https://dibk.no/verktoy-og-veivisere/energi/dette-er-energi-kravene-i-byggteknisk-forskrift/>

[Funnet 7 Mai 2022].

Direktoratet for Byggkvalitet, 2020. *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*.

[Internett]

Available at: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/14/14-2/>

[Funnet 5 Mai 2022].

Forbrukerguiden, 2022. *Normalt strømforbruk – sjekk selv: Har du et gjennomsnittlig forbruk?*. [Internett]

Available at: <https://forbrukerguiden.no/normalt-stromforbruk/>

[Funnet 11 Mai 2022].

Gustavsen, A. et al., 2008. *Prosjektrapport 25: Kuldebroer - Beregning, kuldebroverdier og innvirkning på energibruk*, Trondheim: SINTEF Byggforsk.

Hunton, u.d. *Hunton Nativo Trefiberisolasjon Plate: Spesifikasjoner*. [Internett]

Available at: https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-nativo_trefiberisolasjon-plater/

[Funnet 9 Mars 2022].

Hunton, u.d. *Hunton Vindtett: Spesifikasjoner*. [Internett]

Available at: <https://www.hunton.no/produkter/vegg/hunton-vindtett/>

[Funnet 9 Mars 2022].

Jackon Isolasjon, 2019. *Jackofoam: Ytelseserklæring*. [Internett]

Available at: <https://www.jackon.no/bygg/jackon-xps/jackofoam/>

[Funnet 9 Mars 2022].

Lawrence Berkley National Laboratory, u.d. *Software Tools: THERM*. [Internett]
Available at: <https://windows.lbl.gov/software/therm>
[Funnet 5 Mai 2022].

Leca, 2021. *Leca Teknisk Håndbok 2021*. [Internett]
Available at: <https://www.leca.no/teknisk-info/leca-teknisk-handbok-2020>
[Funnet 9 Mars 2022].

NorgesEnergi, 2022. *Sannsynligvis høyere strømpriser resten av året*. [Internett]
Available at: <https://norgesenergi.no/stromsmart/hoye-strompriser/>
[Funnet 9 Mai 2022].

Norsk Standard, 2017. *NS_EN ISO 13370:2017 Bygningers termiske egenskaper, Varmeoverføring via grunnen, Beregningsmetoder*, s.l.: Norsk Standard.

Norsk Standard, 2017. *NS-EN ISO 10211:2017 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner, Varmestrømmer og overflatetemperaturer, Detaljerte beregninger*, s.l.: Norsk Standard.

Norsk Standard, 2017. *NS-EN ISO 6946:2017 Bygningskomponenter og -elementer, Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient, Beregningsmetoder*, s.l.: Norsk Standard.

Simenergi, u.d. *SIMIEN: Beregning av energibruk og inneklima*. [Internett]
Available at: <https://simenergi.no/simien/>
[Funnet 5 Mai 2022].

SINTEF Byggforsk, 2018. *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-verdi_og_varmestroem_for_konstruksjoner_mot_grunnen_etter_ns-en_iso_13370
[Funnet 13 Mars 2022].

SINTEF Byggforsk, 2019. *472.001 Kuldebroer. Typer, konsekvenser og bruk av normalisert kuldebroverdi*. [Internett]
Available at:
https://www.byggforsk.no/dokument/5206/kuldebroer_typer_konsekvenser_og_bruk_av_normalisert_kuldebroverdi#
[Funnet 1 April 2022].

SINTEF Byggforsk, 2020. *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. [Internett]

Available at:

https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer

[Funnet 10 Mars 2022].

SINTEF Byggforsk, 2021. *471.008 Beregning av U-verdier etter NS-EN ISO 6946*. [Internett]

Available at: https://www.byggforsk.no/dokument/208/beregning_av_u-verdier_etter_ns-en_iso_6946

[Funnet 13 Mars 2022].

SINTEF Byggforsk, u.d. *Byggforskserien*. [Internett]

Available at: <https://www.byggforsk.no/byggforskserien>

[Funnet 5 Mai 2022].

SINTEF Byggforsk, u.d. *Kuldebroer*. [Internett]

Available at: <https://www.byggforsk.no/innhold/532/kuldebroer>

[Funnet 1 April 2022].

SINTEF Byggforsk, u.d. *U-verdier*. [Internett]

Available at: <https://www.byggforsk.no/innhold/556/u-verdier>

[Funnet 20 April 2022].

Vedlegg

Artikkel

Poster

A Tegninger og vindusliste

A1 Tegninger fase 1

A2 Tegninger fase 2

A3 Vindusliste

B U-verdiberegning

B1 U-verdier fase 1

B2 U-verdier fase 2

C Kuldebroberegning

C1 THERM fase 1

C2 THERM fase 2

C3 Kuldebroverdier fase 1

C4 Kuldebroverdier fase 2

D SIMIEN

D1 SIMIEN-evaluering fase 1

D2 SIMIEN-evaluering fase 2

D3 SIMIEN-fil fase 1

D4 SIMIEN-fil fase 2