



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Studenterrapport

Aalborg Universitet København

A. C. Meyers Vænge 15

2450 København SV

Danmark

Uddannelse:

Master i bygningsfysik

Semester:

4. semester

Titel på projekt:

Energirenovering af offentlige bygninger iht.
EU-direktiv EPBD

Projektperiode:

1. februar – 4. juni 2025

Vejleder:

Seniorforsker, Kim B. Wittchen

Bivejleder:

Post.Doc, Regitze Kjær Zimmermann

Medlemmer og studienummer:

Nicolai Elbæk Michalik, 20235664
Christian Winther, 20168079

Antal normalsider:

83

Afleveringsdato:

3. juni 2025

Resumé:

Denne rapport undersøger, hvordan en ældre offentlig etageboligbygning – nærmere bestemt *Skovglimt* i Sorø Kommune – kan energirenoveres med henblik på at opnå energimærke A2010 i overensstemmelse med kravene i de nye EU-direktiver, EPBD og EED. Analysen er baseret på en kombination af tilstandsregistreringer, digitale målinger, simuleringer samt økonomiske og miljømæssige vurderinger.

Den eksisterende bygning er undersøgt med henblik på både tilstanden, energibehov og indeklima. Der identificeres et stort forbedringspotentiale – særligt med hensyn til kuldebroer, ældre tekniske installationer og energimæssig ydeevne. Med afsæt i en række energirenoveringsscenarier vælges scenarie 5 som den mest balancerede og fremtidssikrede løsning. Denne løsning omfatter blandt andet konvertering til fjernvarme, solceller, optimering af klimaskærmen og mekanisk, balanceret ventilation.

Via BSim- og Be18-simuleringer samt LCC- og LCA-beregninger vurderes både energimæssig, totaløkonomisk- og miljømæssig rentabilitet. Scenarie 5 opfylder alle relevante krav til energimærkning og indeklima og viser sig som den løsning, der bedst balancerer investeringsbehov, energibesparelser og komfortforbedringer.

Afslutningsvis vurderes scenariets robusthed i forhold til fremtidige klimaforandringer, hvilket understreger vigtigheden af en helhedsorienteret tilgang til energirenovering.



Energirenovering af offentlige bygninger iht. EU-direktiv EPBD



Gruppemedlemmer og studienummer:

Nicolai Elbæk Michalik, 20235664

Christen Winther, 20168079

Uddannelsessted:	BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø Aalborg Universitet, København A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV
Uddannelse:	Master i Bygningsfysik
Semester:	4. semester, forår 2025
Titel på Masterprojekt:	Energirenovering af offentlige bygninger iht. EU-direktiv EPBD
Vejleder:	Seniorforsker, Kim B. Wittchen
Bivejleder:	Post.Doc, Regitze Kjær Zimmermann
Studerende:	Nicolai Elbæk Michalik, studienr. 20235664 Christian Winther, studienr. 20168079
Aflevering:	3. juni 2025
Sprog:	Dansk
Antal normalsider:	83
Antal sider	144

Forord

Denne rapport er udarbejdet som afslutningen på uddannelsen *Master i Bygningsfysik* ved Aalborg Universitet. Projektet tager afsæt i et konkret case-studie af plejeboligen *Skovglimt* i Sorø Kommune og undersøger, hvordan energirenovering kan bidrage til at opfylde fremtidige klimamæssige og lovgivningsmæssige krav i bygningsmassen.

Arbejdet bygger på analyser, herunder bygningsfysiske registreringer, simuleringer, totaløkonomi og livscyklusvurderinger. Formålet har været at skabe et helhedsorienteret beslutningsgrundlag, der både adresserer energiforbrug, indeklima og miljøpåvirkning.

En stor tak skal rettes til Sorø Kommune for adgang til bygningen, samarbejdsvilje og bidrag med informationer, der har muliggjort en dybdegående analyse. Ligeledes takkes ATRA Arkitekter for at stille 3D-scanningen af bygningen til rådighed, hvilket har været en væsentlig hjælp i den digitale opmåling og mængdeudtræk.

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	6
2	Baggrund.....	8
2.1	Opgaveformulering.....	8
2.2	Historik.....	8
2.3	Bygningstyper.....	22
2.4	BBR-oplysninger og fredningsstatus	23
2.5	Lokalplan og kommuneplanramme	23
2.6	Afgrænsning	23
2.7	Læsevejledning.....	24
2.8	Definitioner.....	24
3	Teori.....	25
3.1	Bygningsreglementet	25
3.1.1	Historiske bygningsreglementer	25
3.1.2	Bygningsreglementet, BR18	26
3.1.3	Frivillige renoveringsklasser	28
3.2	Fugt- og varmeteori	30
3.3	Fremtidsscenerier/ klimaændringer	32
3.4	Økonomi	33
3.4.1	Life Cycle Costing (LCC)	33
3.4.2	Rentabilitet	34
3.4.3	Samspil mellem rentabilitet og totaløkonomi	34
4	Metoder og materialer	35
4.1	LCA.....	35
4.2	LCC- og rentabilitet	37
4.3	Be18.....	38
4.4	Wufi.....	39
4.5	Heat2	39
4.6	BSim.....	40
4.7	IK-kompasset.....	40
4.8	Dagslys 10%.....	43
4.9	Brug af dataloggere	44
4.10	Faktormetoden.....	45
5	Resultater.....	46
5.1	Tilstandsvurdering	46
5.2	Nuværende energiforbrug.....	51

5.3	Registreret indeklima (Aflæsning af loggere).....	52
5.4	Teknisk analyse	56
5.4.1	Termografering og fugtmålinger.....	56
5.4.2	Eksisterende energiramme/energibehov	63
5.4.3	Beregning af energiforbruget.....	66
5.4.4	Eksisterende nuværende indeklima	68
5.5	Delkonklusion af eksisterende forhold	74
5.6	Forbedringsforslag.....	76
5.6.1	Forbedring af bygningsdele.....	77
5.6.2	Fremtidigt energibehov.....	115
5.6.3	Samlede besparelse	120
5.6.4	Indeklima	122
5.7	Delkonklusion af forbedringsforslag	129
5.8	Fremtidige klimaforhold.....	130
5.8.1	BSim.....	130
5.8.2	Be18.....	130
6	Diskussion.....	132
7	Perspektivering	137
8	Konklusion	139
9	Referencer	141
10	Bilagsoversigt	144

1 Indledning

Den eksisterende bygningsmasse udgør både en stor udfordring og en central mulighed i omstillingen til et klimaneutralt samfund. Mange af de bygninger, vi skal bruge i fremtiden, er allerede bygget – og derfor er energirenovering en nøgleindsats, hvis vi skal reducere udledninger og forbedre energimæssig ydeevne uden at rive ned og bygge nyt. En grundig, strategisk renovering kan ikke blot sænke energiforbruget og CO₂-belastningen, men også forlænge bygningers levetid, forbedre indeklimaet og fremtidssikre dem mod kommende krav og klimaforandringer (Pedersen, 2021).

Med dette afsæt har EU vedtaget en række skærpede krav, som sætter rammen for medlemslandenes indsats: Bygningsdirektivet (EPBD, EU/2024/1275) og Energieffektivitetsdirektivet (EED, EU/2023/1791). Disse skal implementeres i national lovgivning over de kommende år og vil få stor betydning for både den offentlige og private bygningsmasse i Danmark. Direktiverne fastsætter blandt andet, at bygningers energimæssige ydeevne skal forbedres gradvist, og at alle nye og eksisterende bygninger over tid skal omdannes til nulemissionsbygninger. Hertil kommer krav om udbredelse af solenergi og årlige reduktioner i energiforbruget i offentlige bygninger.

Bygningsdirektivet (EPBD) fastsætter krav om at fremme den energimæssige ydeevne af bygningsmassen, med det langsigtede mål at opnå en nulemissions bygningsmasse i 2050. Dette mål fordrer en markant forbedring af bygningers energiforbrug gennem renovering, modernisering og implementering af lavenergiløsninger som f.eks. højisolerende materialer, energieffektive opvarmnings- og ventilationssystemer samt vedvarende energikilder som solceller og varmepumper. EPBD understøtter også tiltag, der fremmer energieffektivitet i bygningens drift og opfordrer til, at medlemslandene etablerer en langsigtet strategi for renovering af den eksisterende bygningsmasse, således den løbende opfylder de fastsatte energi- og miljøkrav (Energistyrrelsen, 2024).

Kravene faseopdeles, hvorved medlemslandene I 2030, skal forbedre energieffektiviteten for de energimæssige dårligste 16 % af bygningerne. I 2033 gælder dette for de 26 % dårligste bygninger. Alle nye og eksisterende bygninger skal over tid omdannes til nulemissionsbygninger, der udelukkende benytter vedvarende energi til opvarmning og køling.

Ikke alle bygninger er omfattet af kravene. Undtagelserne omfatter bygninger.

- som er fredede eller beskyttede,
- religiøse bygninger,
- midlertidige konstruktioner med en levetid under to år,
- mindre bygninger under 50 m²,
- samt bygninger ejet af forsvaret.

Desuden kan medlemslandene undtage bygninger på baggrund af cost-benefit-analyser, økonomiske udfordringer eller særlige anvendelser af bygningen.

Som en del af EU's indsats for at reducere CO₂-udledningen er installation af solenergi et vigtigt element i Bygningsdirektivet. Direktivet kræver, at solenergianlæg installeres, når det er teknisk og økonomisk muligt.

Fristerne for installation af solenergi er gradvist fordelt over flere år.

- Fra 2027 bliver det obligatorisk for alle nye offentlige bygninger og andre eksisterende bygninger med et bruttoetageareal over 250 m² at installere solenergi. Dette krav omfatter også andre bygninger, der er større end 500 m², hvis de gennemgår større renoveringer eller lignende omfattende ændringer.
- Året efter, i 2028, udvides kravet til at inkludere eksisterende offentlige bygninger med et samlet areal på over 2000 m².

- Herefter, fra 2029, bliver installation af solenergi påkrævet for alle eksisterende offentlige bygninger, der overstiger 750 m² i det samlede areal.
- I 2030 gælder kravet for alle nye boliger og senest i 2031 vil kravet også gælde for offentlige bygninger, der har et samlet areal på over 250 m².

Energieffektivitetsdirektivet (EED) har som hovedmål at forbedre energieffektiviteten i EU ved at fremme foranstaltninger, der reducerer energiforbruget i både offentlige og private bygninger. EED lægger vægt på den årlige reduktion af energiforbruget i offentlige bygninger, hvilket har stor betydning for den offentlige sektors rolle som både ejer og forbruger af bygninger. Direktivet kræver, at medlemslandene udarbejder planer for energieffektivisering, som indeholder både energibesparelser og investeringer i energirenovering. Dette vil ikke kun bidrage til at nedbringe energiforbruget men også fremme økonomiske og miljømæssige gevinster på lang sigt.

Offentlige bygninger er forpligtet til årligt at reducere energiforbruget med 1,9 % og renovere 3 % af det samlede bygningsareal. Direktivet understøttes af nationale renoveringsplaner og finansielle incitamenter (Synergi, 2024). Af Tabel 1 fremgår den samlede offentlig bygningsmasse (i m²) fordelt på energimærker.

Energimærke	Kommuner	Regioner	Stat	Total
A	2.274	914	565	3.754
B	2.926	272	605	3.802
C	7.815	508	894	9.218
D	5.514	416	578	6.508
E	1.817	235	185	2.237
F	7.914	670	147	1.608
G	428	430	67	925
Total	21.564	3.446	3.042	28.052

Tabel 1 - Samlet offentlig bygningsmasse fordelt på energimærker. De opskalerede værdier for m² er afrundet til nærmeste tusinde. På grund af afrundingen kan totalen variere fra de øvrige værdier. De indskrevne m² skal ganges med en faktor 1.000 (Madsen, 2024).

2 Baggrund

2.1 Opgaveformulering

Energirenovering af eksisterende bygninger er afgørende for at opfylde de nye EU-krav fra Bygningsdirektivet (EPBD) og Energieffektivitetsdirektivet (EED). Der er behov for en grundig analyse af, hvordan energirenovering af ældre bygninger kan bidrage til at forbedre energimærket, optimere indeklimaet og samtidig sikre både totaløkonomisk og miljømæssig bæredygtighed. Det er essentielt at forstå, hvordan renoveringsstrategier, som efterisolering, energioptimering af tekniske installationer og valg af materialer, kan have en positiv indvirkning på bygningens samlede energiforbrug og komfortniveau. Samtidig er det vigtigt at sikre, at de valgte løsninger ikke medfører risiko for fugtproblemer.

Projektet vil tage udgangspunkt i en offentlig etageboligbygning, som repræsenterer en bygningstype med stort potentiale for energibesparelser og samtidig udgøre en relevant case i forhold til bygningskonstruktioner, anvendelse og drift i den offentlige sektor.

Det er på denne baggrund relevant at stille følgende spørgsmål, som danner rammen for projektets videre arbejde:

1. Hvordan kan en energirenovering af en ældre etageboligbygning, baseret på de nye EU-krav (EPBD og EED), udføres for at forbedre bygningens energimærke og samtidig optimere indeklimaet?
2. Hvilke specifikke energirenoveringstiltag er nødvendige for at opnå de ønskede energimærker (D, B og A2010) i en ældre offentlig etageboligbygning, og hvordan kan disse tiltag optimeres for at forbedre bygningens indeklima?
3. Hvordan kan simuleringer og beregninger af energiforbrug og indeklima bidrage til at identificere de mest effektive energirenoveringstiltag, der både forbedrer energimærket og sikrer et sundt og komfortabelt indeklima for brugerne?
4. Hvordan kan totaløkonomiske- og livscyklusberegninger anvendes til at vurdere de økonomiske og miljømæssige konsekvenser af energirenoveringstiltag, og hvilke faktorer skal der tages højde for i vurderingen af tilbagebetalingstid og CO₂-aftryk?
5. Hvordan kan fremtidige klimascenarier (2050 og 2090) påvirke valget af energirenoveringstiltag, og hvordan kan disse scenarier anvendes til at vurdere robustheden af renoveringstiltagene i et langsigtet perspektiv?

2.2 Historik

Plejeboligen *Skovglimt* i Stenlille, Sorø Kommune, har udviklet sig markant siden sin opførelse. Oprindeligt fungerede bygningen som plejehjem, men i 2005 blev der gennemført en omfattende renovering til cirka 40 millioner kroner, hvilket resulterede i moderne faciliteter. Efter kommunalreformen i 2007 blev *Skovglimt* et botilbud for personer med handicap, hvor beboere fra Albertihuset i Sorø og Niløseholm i Dianalund flyttede ind (UDVIKLING, NR. 4, 4. KVARTAL 2008).

Skovglimt er valgt som case i denne rapport, fordi bebyggelsen på én gang repræsenterer typiske udfordringer og muligheder i den offentlige bygningsmasse. Den samlede bygningsstruktur består af både ældre og nyere bygninger opført i forskellige perioder og byggestandarder, hvilket gør det muligt at analysere energirenovering i et komplekst, men repræsentativt bygningsmiljø. Særligt kombinationen af moderniseret og oprindelig bygningsmasse skaber et interessant udgangspunkt for at undersøge, hvordan energirenoveringstiltag kan målrettes og prioriteres under hensyn til variationer i konstruktioner, materialer og installationer.

Bygning A, der blev opført i 1952, er den ældste del af *Skovglimt* og har en fuld uopvarmet kælder med blandt andet teknikrum, vaskeri og kontor til Teknisk Servicepersonalet.

Bygning B blev opført i 1977 og har en teknikgang i stedet for en fuld kælder. Bygning C blev opført samtidig med Bygning B som en del af det oprindelige byggeri og fungerer som forbindelsesled mellem bygning A og B hvor trappeopgang samt adgangsvej mellem de to bygninger er placeret.

Bygning D blev opført i 2005 som en tilbygning til bygning B.

Der er ikke fundet de oprindelige byggeansøgninger for bygning A, B og C, hvilket har vanskeliggjort at finde de eksakte opførselsår og oprindelig tegningsmateriale. Bygningerne er i stedet 3D-scannet, og optegnet 3D i Revit, hvilket muliggør udtræk af mængder til blandt andet energiramme og BSim.

I 2005 blev bygningerne moderniseret, hvor de blev tilpasset til deres nuværende anvendelse. Den samlede bygningsmasse udgør en kompleks helhed, hvor ældre og nyere bygninger mødes, og hvor forskelle i byggestandarder, materialer og installationer skaber udfordringer i forhold til en samlet energirenovering. I dette projekt vil der blive fokuseret på at identificere energieffektive løsninger, der kan tilpasses *Skovglimt*s specifikke bygningstyper, samtidig med at indeklima og totaløkonomi optimeres. Der vil være særlig opmærksomhed på at sikre, at renoveringstiltag ikke skaber fugtproblemer, som kan have negative konsekvenser for bygningens levetid og beboernes sundhed.

I dag rummer *Skovglimt* 27 et- og toværelses lejligheder, der varierer i størrelse fra 26 til 62 m². Alle lejligheder er udstyret med handicapvenlige badeværelser, og nogle af dem har mindre køkkener eller altaner. Indretningen er planlagt således, at beboere med forskellige behov kan få den rette støtte. I stueetagen ligger lejlighederne tæt på fællesarealer, mens de på første og anden sal er mere afsondrede for at give større selvstændighed til beboerne (UDVIKLING, NR. 4, 4. KVARTAL 2008).

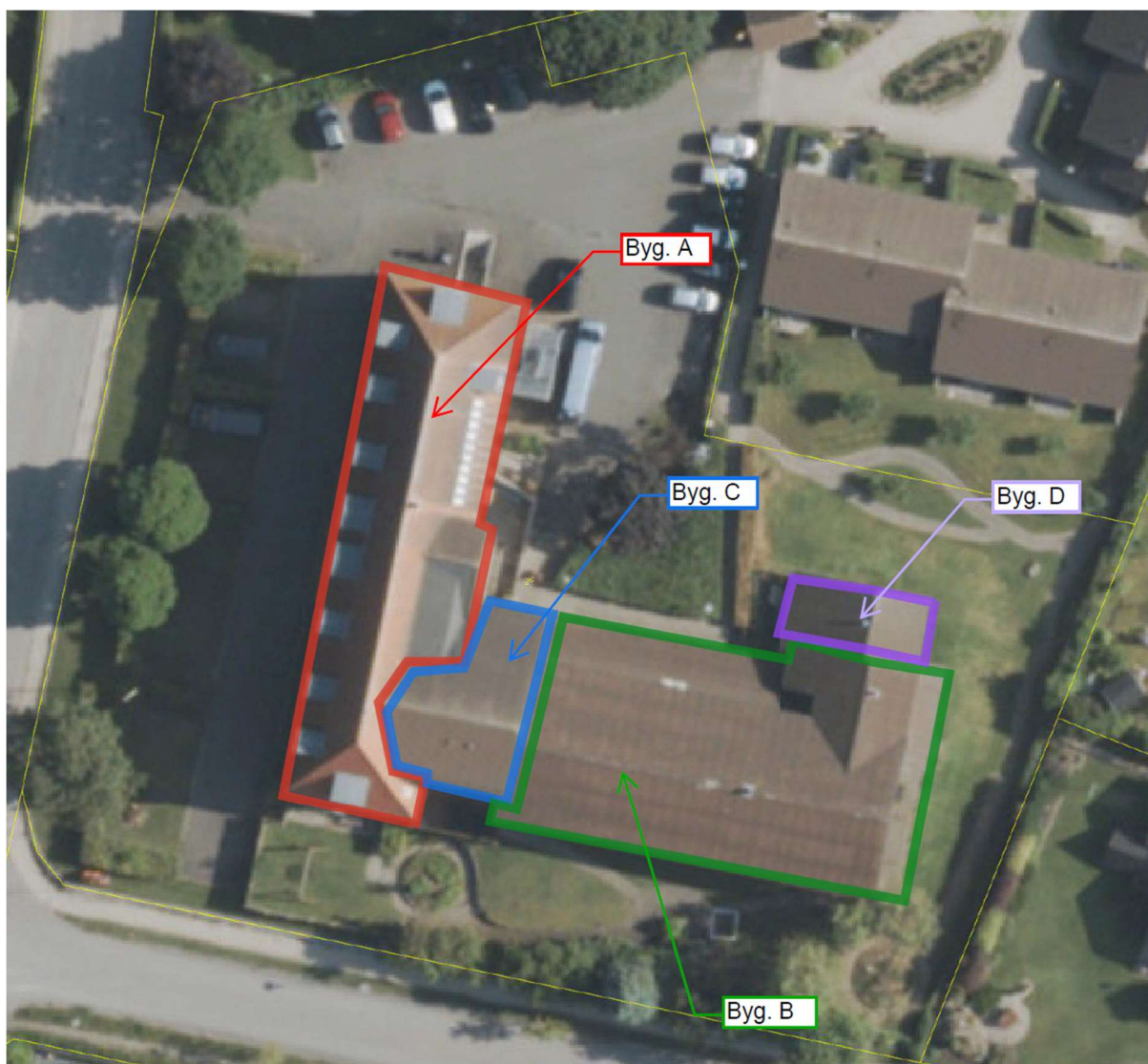
Figur 1 Viser en situationsplan over *Skovglimt*s matrikel med markering af bygningerne.

Figur 2 - Figur 6 viser alle plantegningerne over *Skovglimt*.

Figur 7 - Figur 13 viser alle facadesnit- og facadetegningerne over *Skovglimt*.

Figur 14 - Figur 17 viser et enkelt tværsnit for hver bygning på *Skovglimt*.

Alle tegninger er fra moderniseringen i 2005. Det samlede tegningssæt, revit-fil og link til 3D scanning findes i *bilag 1 – Registreringsgrundlag*.



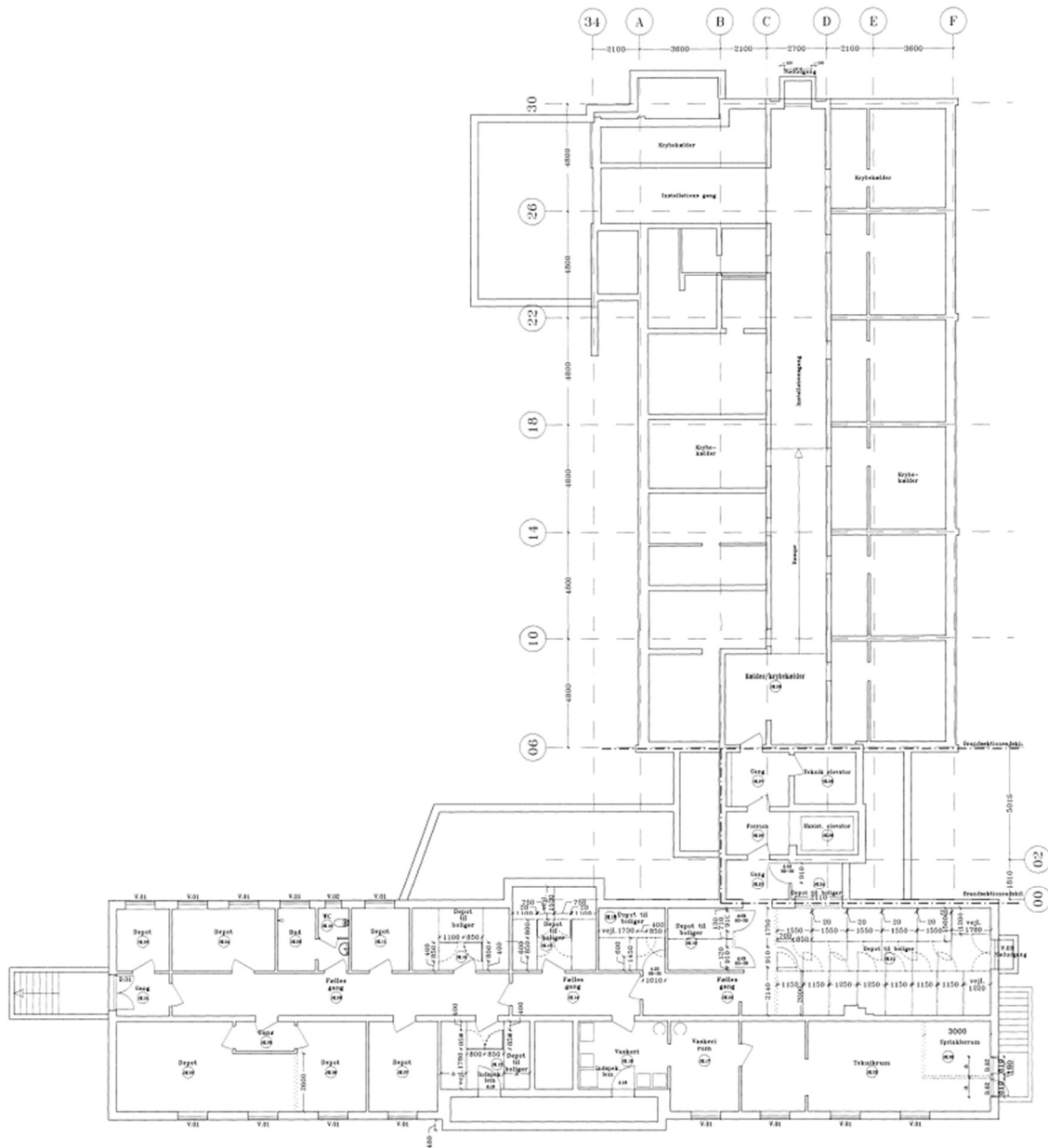
Figur 1 - Situationsplan med markering af bygninger.

Bygning A er opført i 1952.

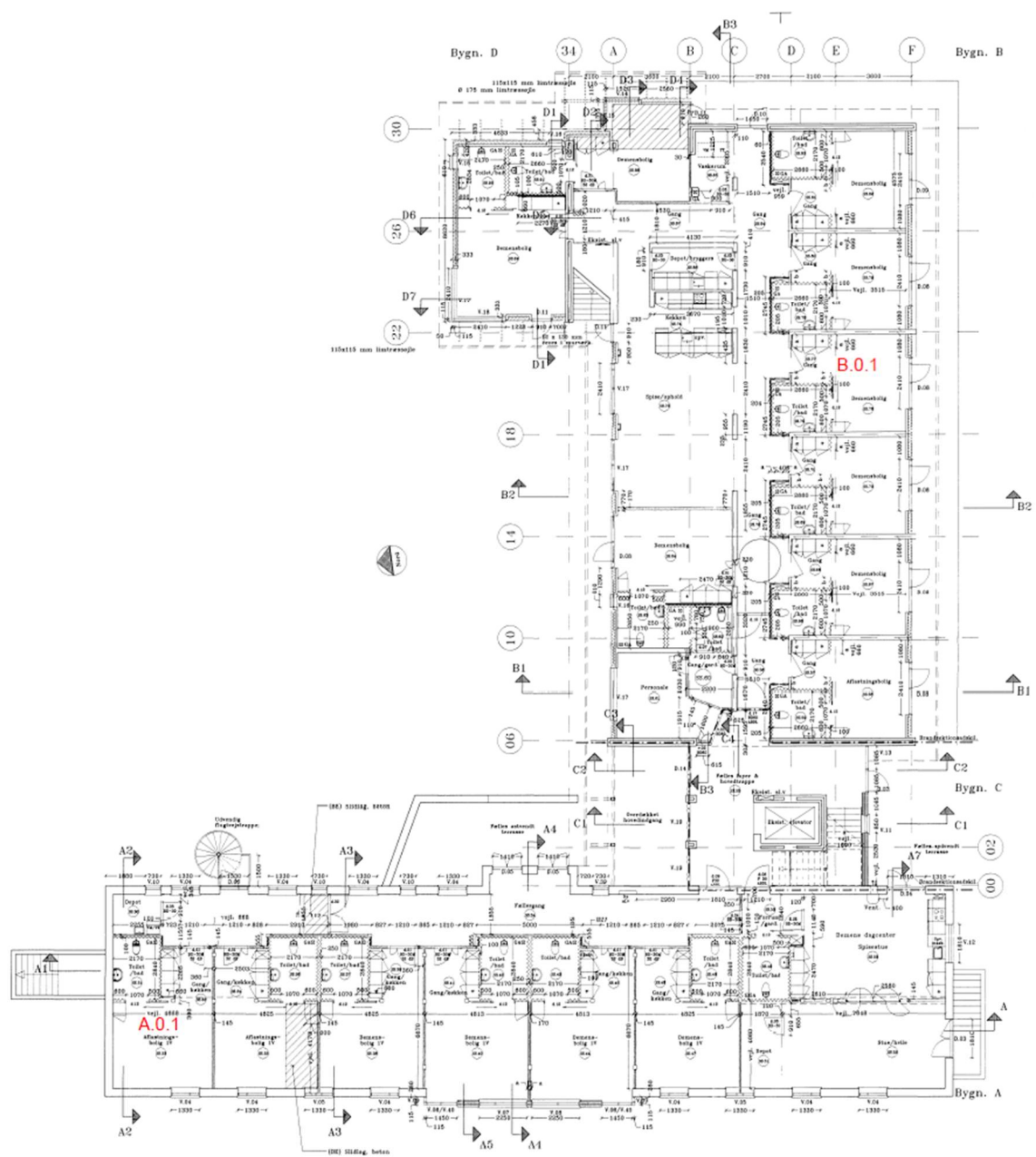
Bygning B er opført i 1977.

Bygning C er opført i 1977 som en sammenkobling af bygning A og bygning B.

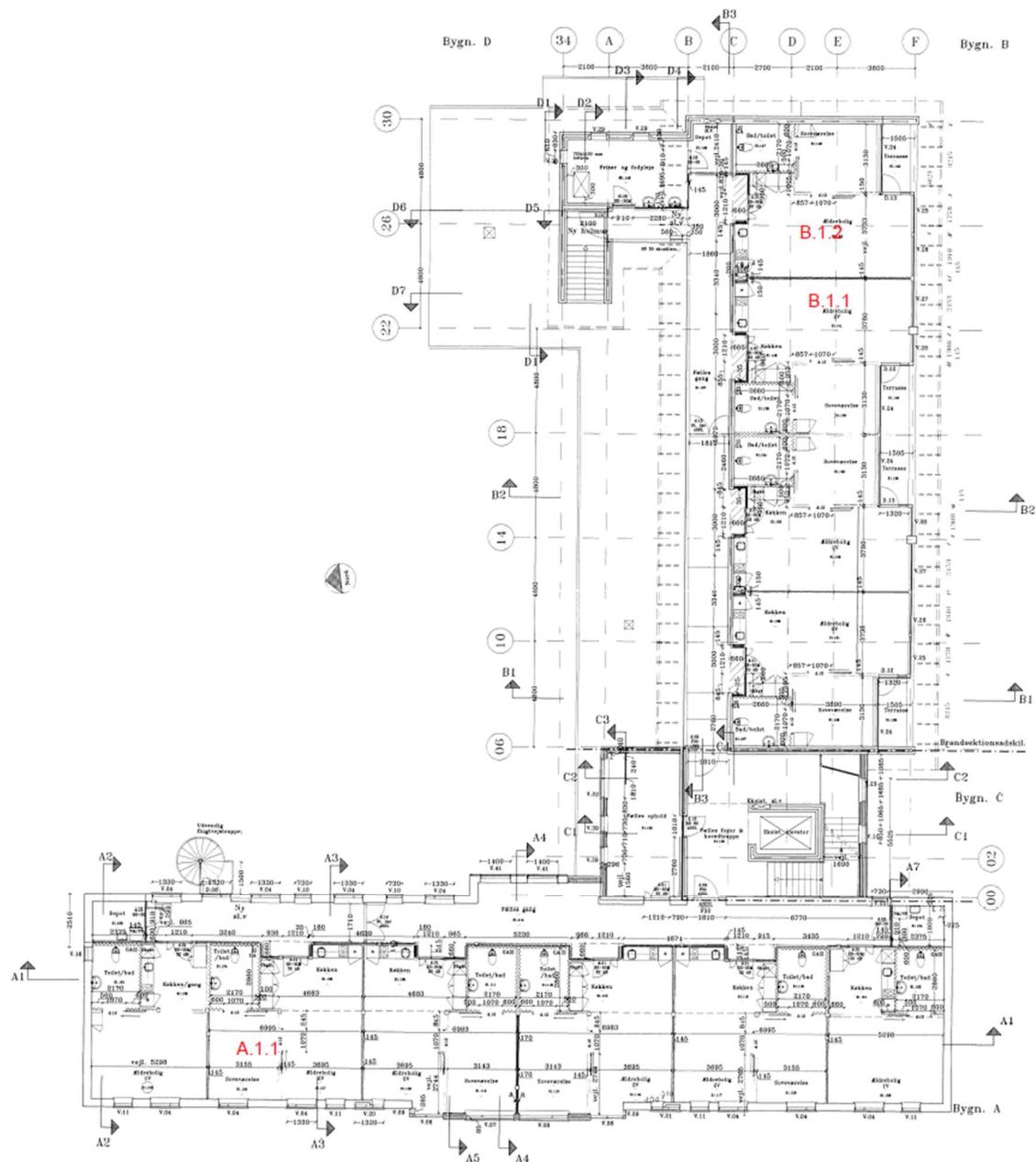
Bygning D er opført i 2005 samtidig med, at hele byggeriet blev moderniseret.



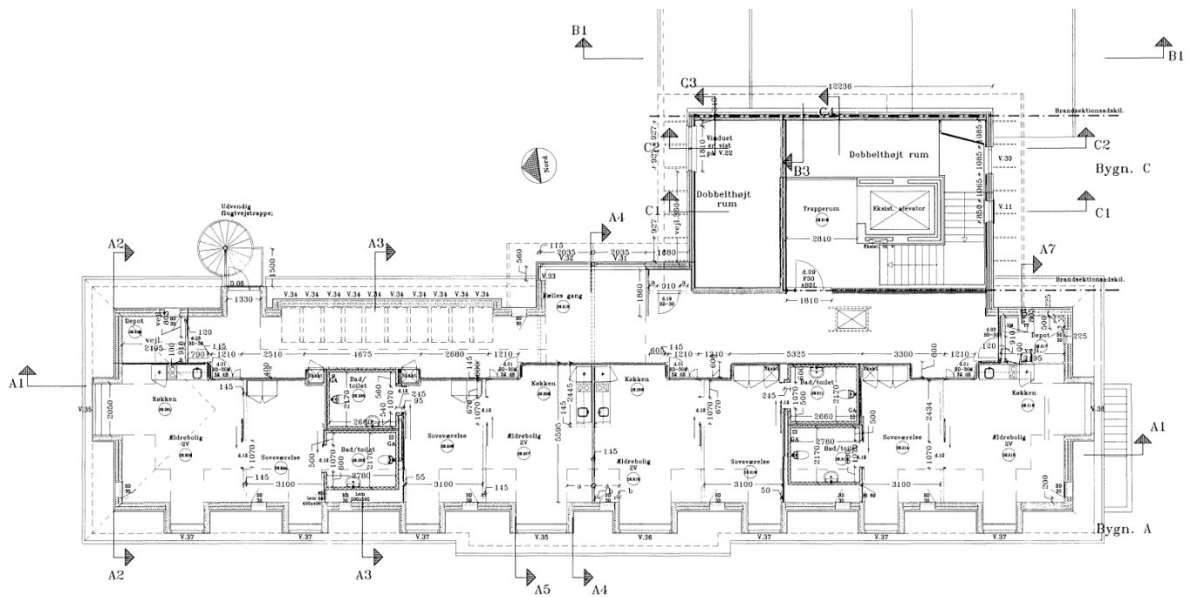
Figur 2 - Kælderplan af hele Skovglint.



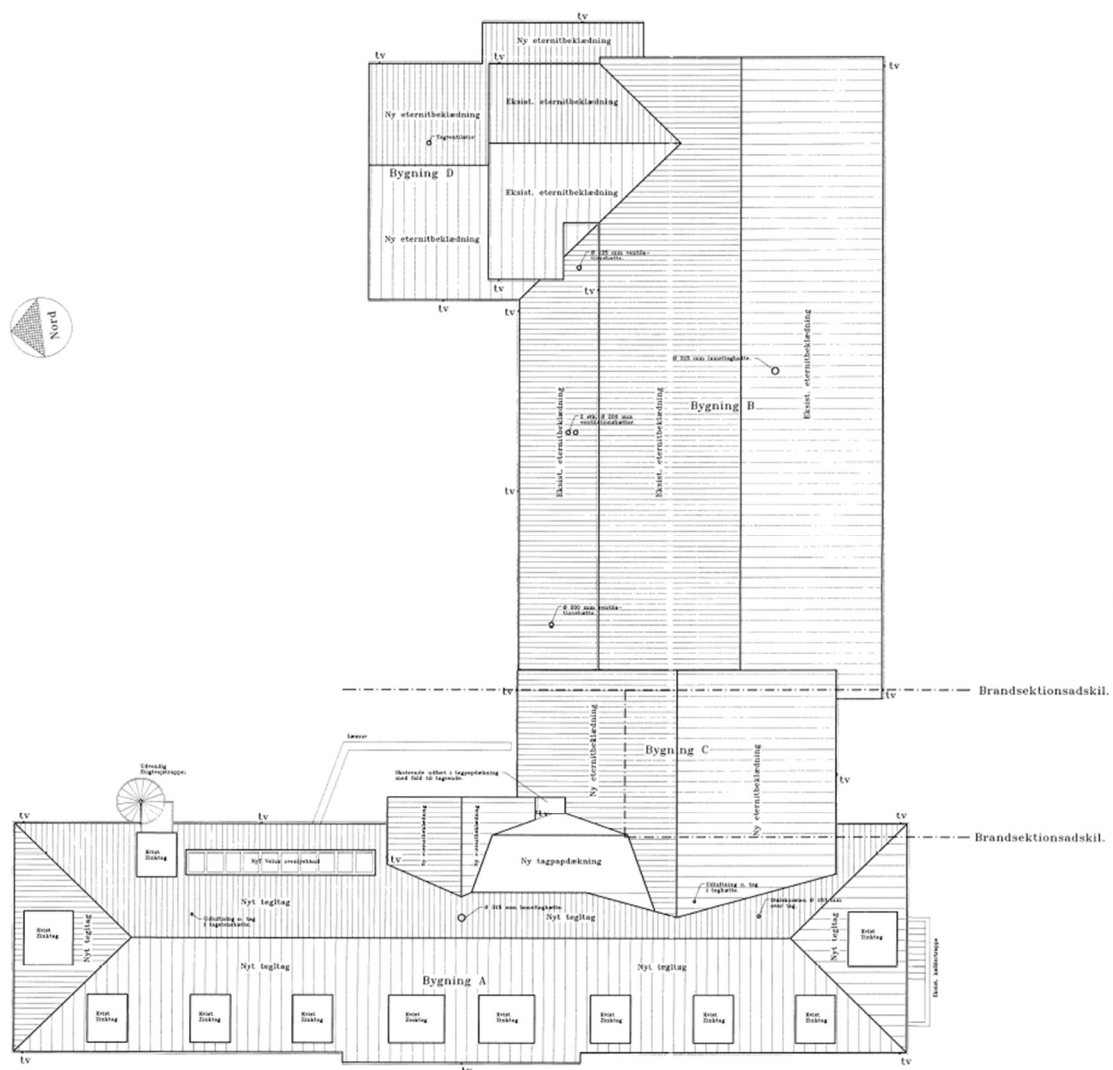
Figur 3 - Stueplan af hele Skovglimt.



Figur 4 - 1. salsplan af hele Skovglimt.



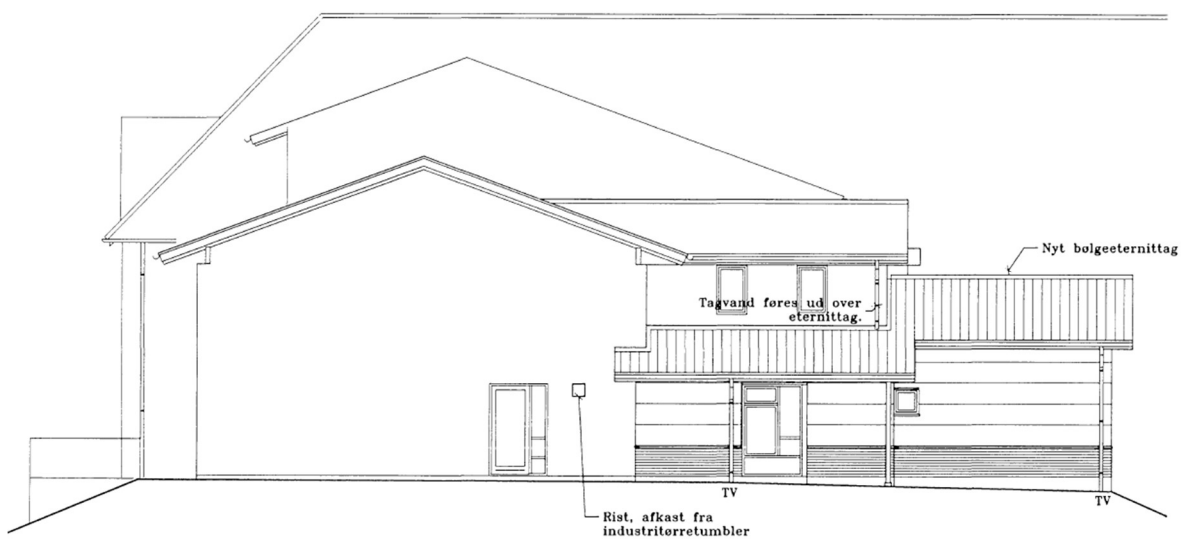
Figur 5 - 2. salsplan af hele Skovglimt.



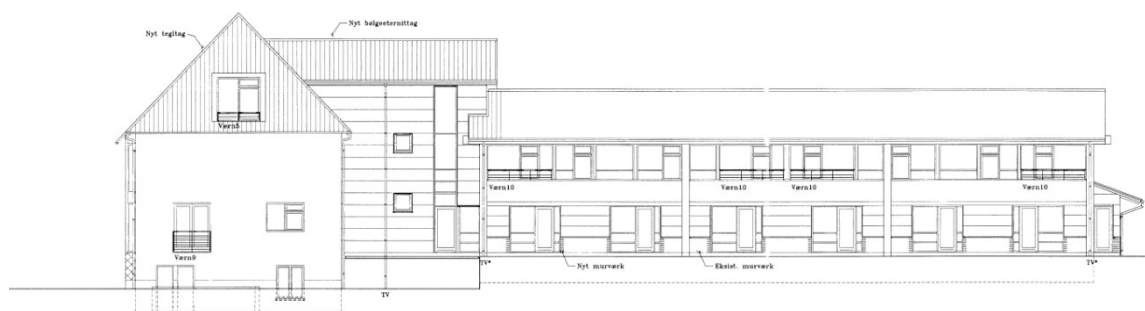
Figur 6 - Tagplan af hele Skovglimt.



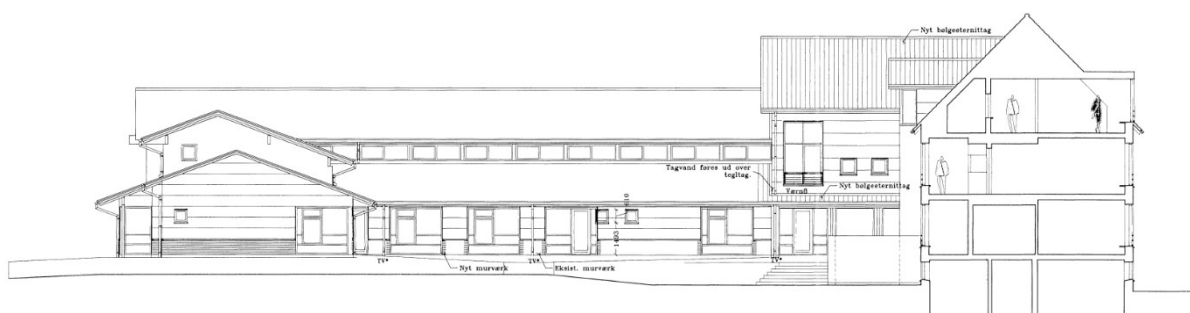
Figur 7 - Facadesnit mod øst.



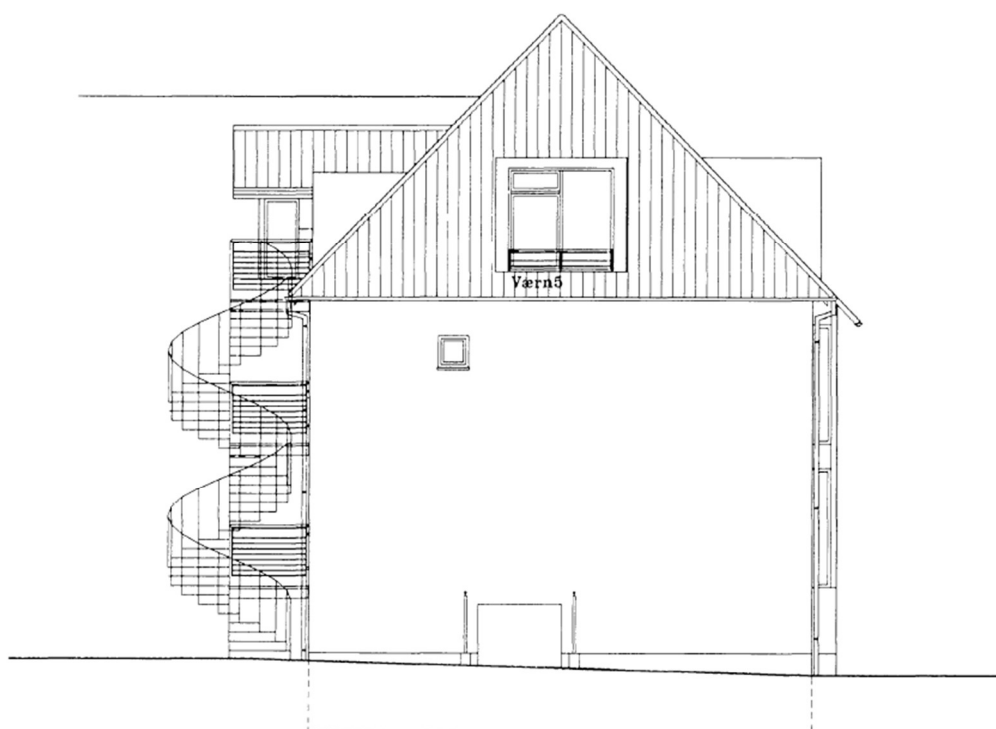
Figur 8 - Facade mod øst ved bygning B og D.



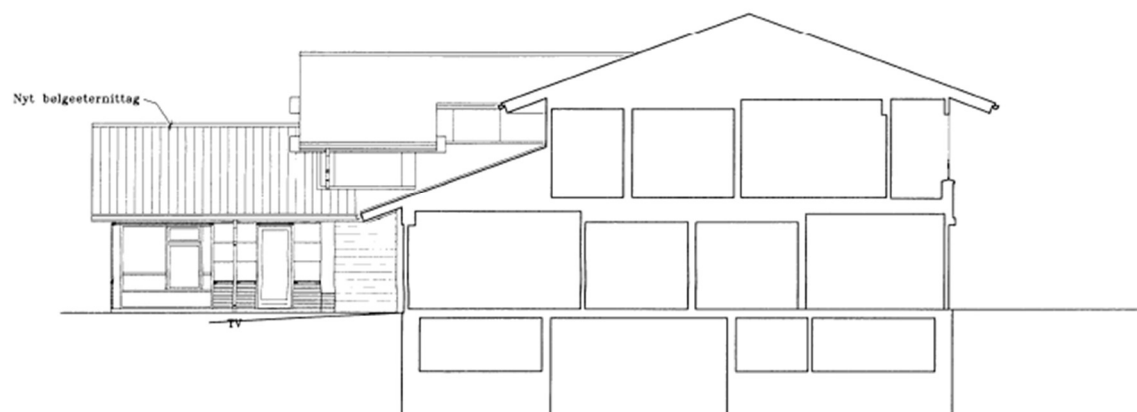
Figur 9 - Facade mod syd.



Figur 10 - Facadesnit mod nord.



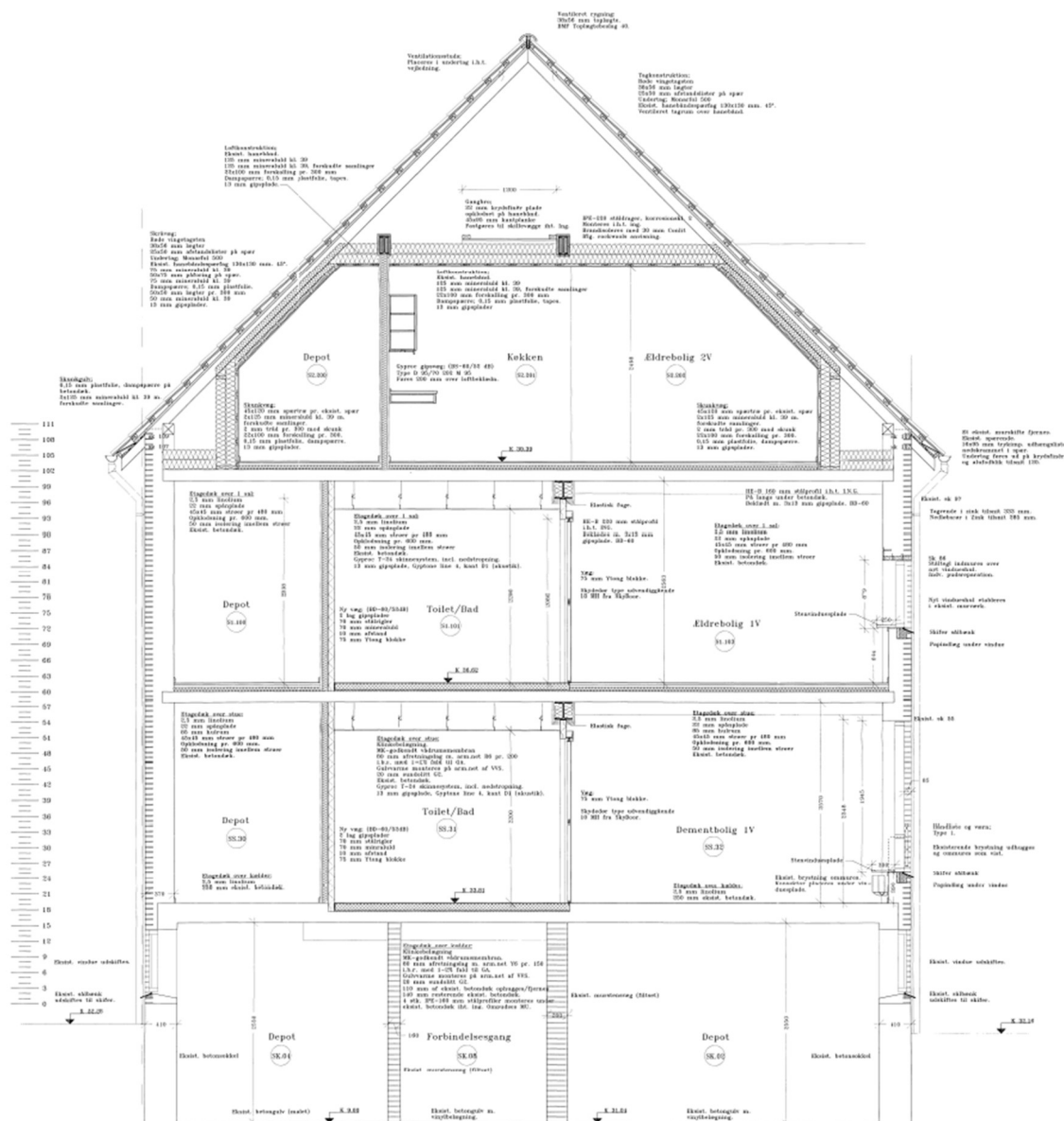
Figur 11 - Facade mod nord ved bygning A.



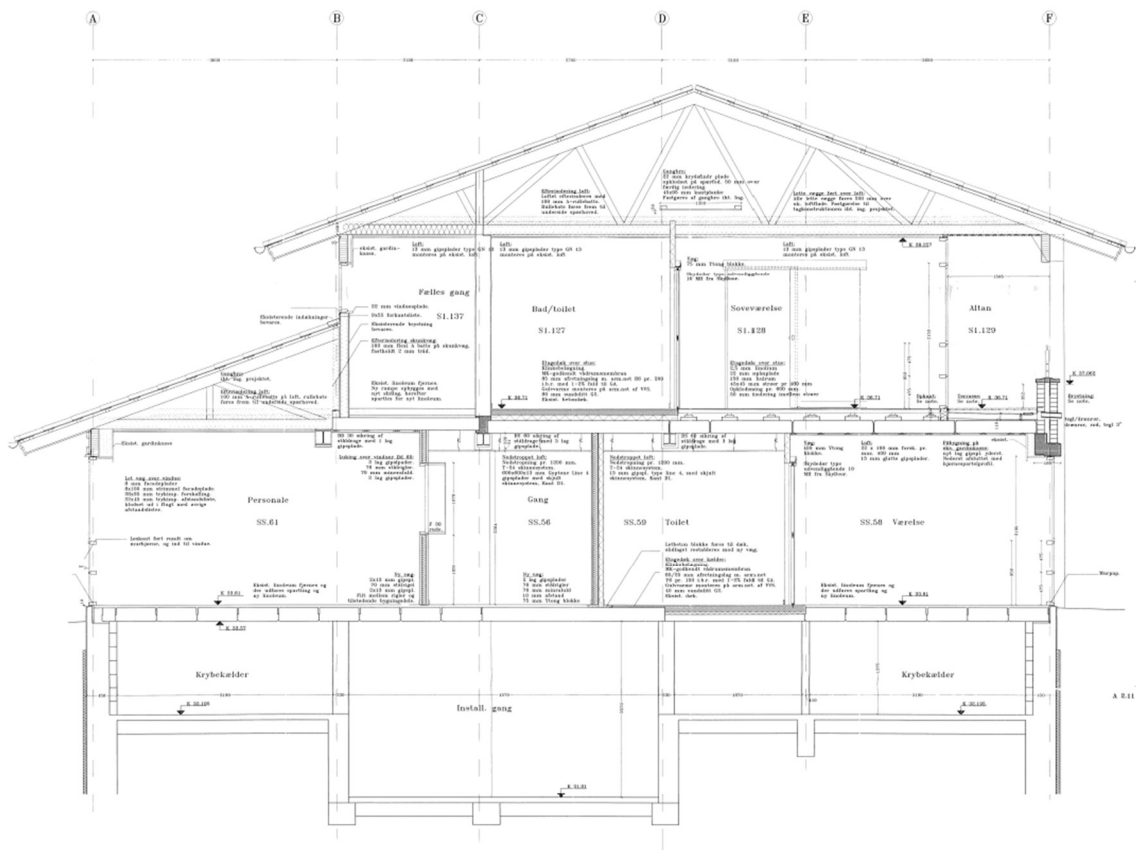
Figur 12 - Facadesnit mod vest.



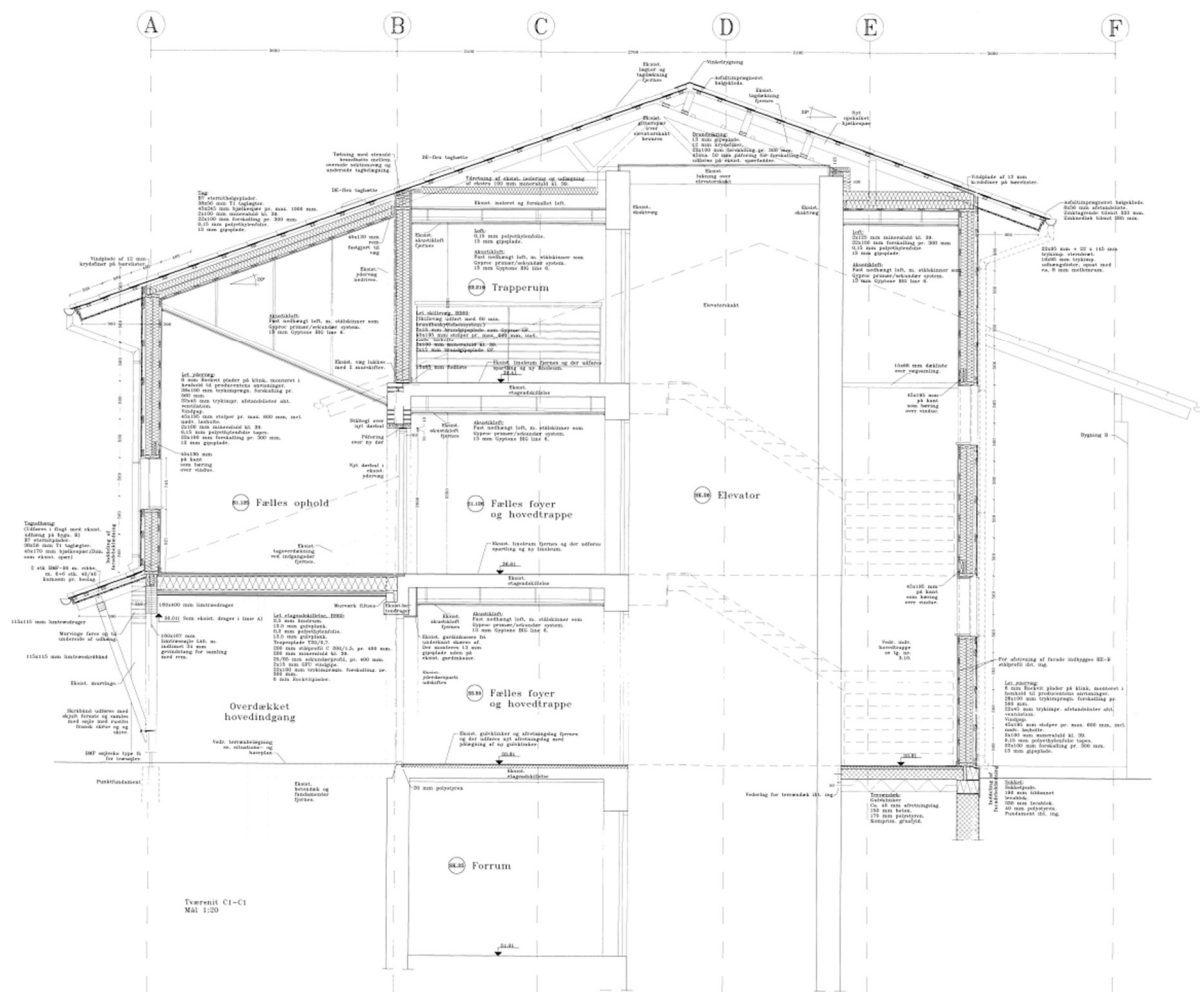
Figur 13 - Facade mod vest.



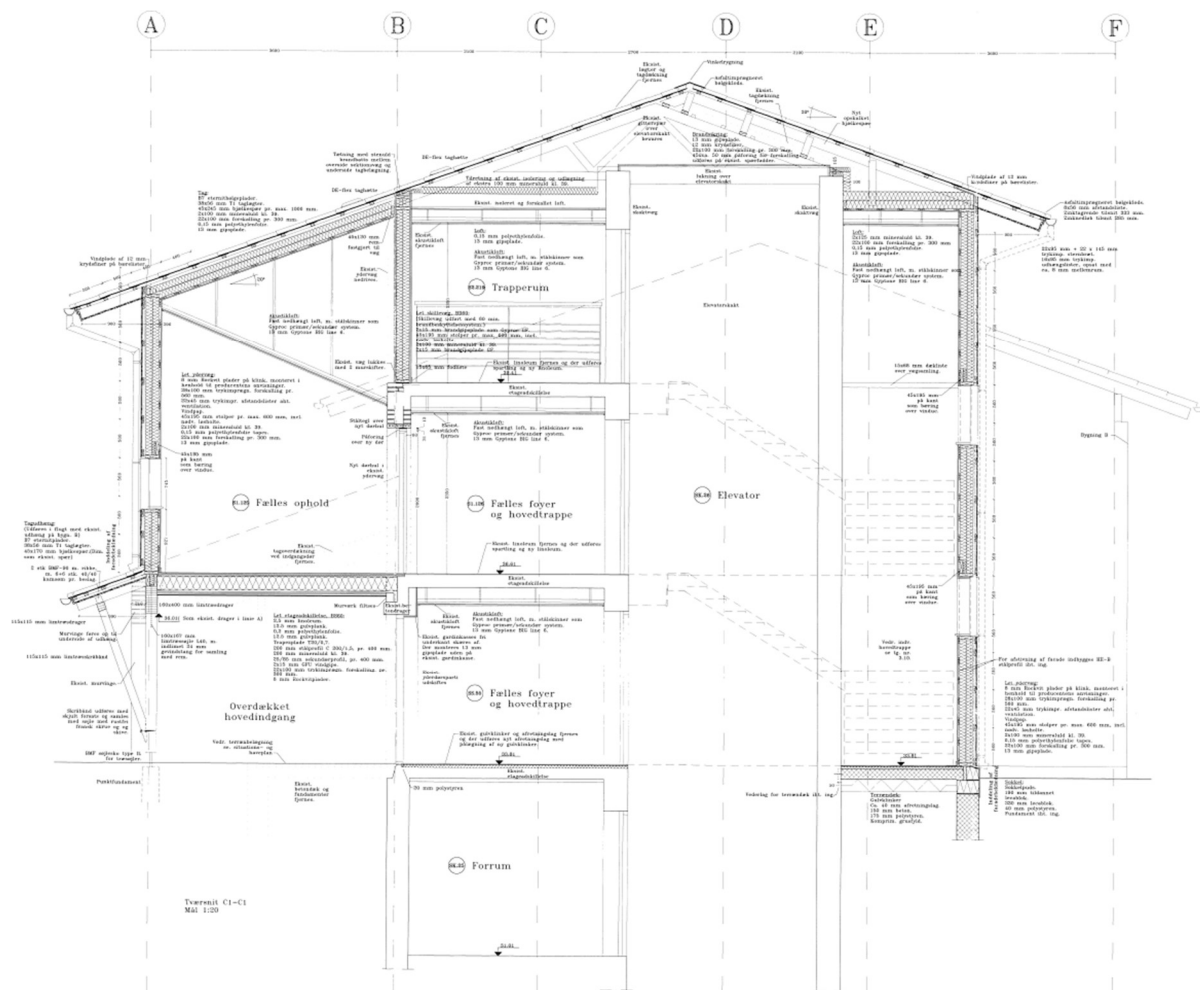
Figur 14 - Tværsnit A2-A2.



Figur 15 - Tværsnit B1-B1.



Figur 16 - Tværsnit C1-C1.



Figur 17 - Tværsnit D1-D1.

2.3 Bygningstyper

Med udgangspunkt i ovenstående beskrivelse, tegningsmaterialet og en visuel besigtigelse, vurderes det, at bygning A er opført efter principperne for "Etagehuset i den funktionelle tradition". (Iversen).

Principperne for denne bygningstype er typisk:

- Fra slutningen af 1930'erne og tre årtier frem prægede en karakteristisk byggestil det danske etagebyggeri.
- Stilarten var forankret i danske byggetraditioner og kombinerede funktionalismens moderne boligprincipper med brugen af nationale byggematerialer.
- Dette resulterede i et arkitektonisk udtryk, der integrerede spisekøkkener og solorienterede opholdsrum, samtidig med at bygningerne bevarede den enkle, murede etagehusstruktur med sadeltag.

Bygningsdesignet var kendetegnet ved stringente former, enkle materialer og et funktionelt formsprog uden historiske referencer. Materialerne bestod primært af blankt murværk i rød eller gul tegl, ofte kombineret med hvide vinduesrammer og diskrete detaljer i træ eller beton. De tidlige eksempler bar spor af nyklassicismens symmetri og funktisstilens kubisme, men udviklede sig gradvist til et mere selvstændigt udtryk.

Den håndværksmæssige udførelse var generelt af høj kvalitet – også da præfabrikerede elementer som trappeløb blev introduceret. Bygningernes holdbarhed har dog medført behov for løbende renoveringer, hvor det oprindelige arkitektoniske udtryk bør respekteres. Ændringer som overdækninger eller moderne pladematerialer kan forstyrre helheden, mens større tilbygninger kan accepteres, hvis de følger bygningens struktur og materialekarakteristik (Iversen).

Bygning B vurderes at være opført efter principperne for "Typeetagehuset". (Iversen). Principperne for denne bygningstype er typisk følgende:

- Bygningernes udseende var præget af enkle og funktionelle linjer.
- Facaderne kunne enten bestå af beton, være beklædt med træ eller skalmuret med tegl.
- Tagene var typisk flade eller havde en svag hældning, mens vinduerne var store og uden sprosser.
- Opdelingen af boligerne var praktisk og fulgte faste principper, hvor de større lejligheder havde værelser placeret mod gadesiden og opholdsrum mod havesiden.
- Materialevalget var økonomisk og robust, hvilket sikrede lang holdbarhed og minimal vedligeholdelse.

Med tiden blev bygningsdesignet mere fleksibelt. Hvor de tidlige byggerier var præget af ensartethed og rationel rumopdeling, åbnede senere tilpasninger for større arkitektonisk variation. Selvom denne byggestil længe blev betragtet som en effektiv løsning på boligmanglen, har mange bygninger siden krævet omfattende renoveringer for at forbedre isolering, holdbarhed og æstetik.

Renoveringerne har generelt søgt at bevare det enkle og funktionelle udtryk, samtidig med at moderne løsninger er blevet integreret. Ofte er facadeelementer udskiftet og tagkonstruktioner forbedret for at leve op til nutidens energikrav. Nye bygningsdele er kun tilføjet, hvor det har kunnet ske med respekt for den oprindelige arkitektoniske helhed (Iversen).

2.4 BBR-oplysninger og fredningsstatus

I Bygnings- og Boligregistret (BBR) fremgår det, at ejendommen har et samlet boligareal på 1.292 m² og et erhvervsareal på 887 m², hvilket giver et samlet bygningsareal på 1.856 m². Derudover er der et udnyttet areal i tagetagen på 323 m², hvilket bringer det samlede bruttoetageareal op på 2.179 m².

Kælderarealet udgør 533 m², men dette indgår ikke i bruttoetagearealet. Det bebyggede areal er 942 m², mens grundens samlede areal er 4.382 m². Den samlede bebyggelsesprocent er

$$\frac{2179 * 100}{4382} = 49,73\%$$

Ifølge (Kulturarv.dk, 2025) har bygningen ingen fredningsstatus og er heller ikke registreret som en bevaringsværdig bygning. Dette betyder, at ejendommen ikke er underlagt de restriktioner og krav, der normalt gælder for fredede eller bevaringsværdige ejendomme. Bygningens udvikling og anvendelse er således alene reguleret af almindelige bygningsregler og lokalplaner.

2.5 Lokalplan og kommuneplanramme

Lokalplan nr. 10 fra 1983 er gældende for området. Planen indeholder ikke mange krav til bygningens ydre fremtræden, bortset fra at eventuelle tilbygninger skal harmonere med de øvrige bygninger for at sikre en god helhedsvirkning (Plandata, 1983).

Da bygningerne er opført i forskellige tidsperioder og stilarter, vurderes det, at der kun er få begrænsninger i forhold til energirenoveringen.

Lokalplanen fastsætter en maksimal bebyggelsesprocent på 45%. Den nuværende bebyggelsesprocent på 49,73% overstiger allerede denne grænse. Det vurderes derfor, at energirenoveringen som udgangspunkt ikke må medføre en forøgelse af bruttoetagearealet.

Området er desuden omfattet af kommuneplanramme St.O 5 – Område ved Skovglimt (Sorø Kommune, 2025).

Kommuneplanrammen understøtter lokalplanens principper ved at fastslå, at der primært kan foretages forbedringer og fornyelser inden for de eksisterende rammer. Derudover angiver kommuneplanrammen, at den maksimale bygningshøjde må være 11,5 meter, og at bebyggelsen ikke må overstige 2,5 etager.

2.6 Afgrænsning

Da projektet omhandler energirenovering af bygningen, afgrænses registreringen og tilstandsvurderingen til udelukkende at omfatte klimaskærmen. Derfor bliver den uopvarmede kælder heller ikke behandlet yderligere i denne rapport, bortset fra etagedækket over kælderen, som vil blive inddraget, som en del af klimaskærmen.

Det samme gælder for 3D-modellen, hvor kun bygningsdele relateret til klimaskærmen vil blive defineret. Dog vil enkelte vægge og etagedæk også indgå, da de har betydning for indeklimasimuleringerne i BSim.

Ved udvendig efterisolering af bygning A er soklen ikke inkluderet, da der er tale om en kældervæg, og kælderen ikke indgår i energirenoveringsprojektet. Kælderrenoveringen vurderes at være en del af den almindelige vedligeholdelse af bygningen. Derfor forventes det, at kælderen alligevel bliver fugtsikret og isoleret, og den vil dermed kunne danne fundament for den udvendige efterisolering.

Simuleringer og vurderinger af det eksisterende indeklima afgrænses til kun at omfatte bolig A.0.1 og bolig B.1.1, da disse boliger, baseret på orientering og data fra indeklimamålere, indikerer de "værste forhold".

2.7 Læsevejledning

Nærværende rapport er struktureret i fire hovedsektioner, der trin for trin gennemgår projektets kontekst, analyser, beregninger og konklusioner. Formålet er at skabe en rød tråd i energirenoveringsprocessen og give en dybdegående forståelse af de anvendte metoder, resultater og perspektiver.

Første sektion introducerer projektet og dets faglige kontekst. Her præsenteres baggrunden for energirenovering med fokus på de skærpede krav i EU's Bygningsdirektiv (EPBD) og Energieffektivitetsdirektiv (EED). Sektionen beskriver desuden den konkrete casebygning, der danner grundlag for analyserne, samt de teorier og metoder, der anvendes i rapporten. Formålet er at etablere en forståelse af projektets udgangspunkt, de centrale problemstillinger og den metodiske tilgang.

Anden sektion foretages en kortlægning af bygningens nuværende energimæssige tilstand for at etablere en baseline. Her analyseres bygningens konstruktioner, materialer og generelle tilstand. Derudover beregnes både det nuværende energibehov og det faktiske energiforbrug, hvilket gør det muligt at vurdere, hvordan bygningen præsterer i forhold til de gældende energikrav. Der foretages også en vurdering af det eksisterende indeklima, herunder temperaturforhold, luftkvalitet og det generelle komfortniveau. Denne sektion danner dermed et grundlag for at identificere de områder, hvor energirenovering vil have størst effekt.

Tredje sektion er rapportens analytiske kerne, hvor de egentlige energirenoveringsforslag præsenteres og evalueres. Her gennemgås de mulige renoveringstiltag, som f.eks. efterisolering, etablering af ventilationssystemer og integration af vedvarende energikilder. Ved hjælp af beregninger og simuleringer vurderes, hvordan de foreslåede løsninger påvirker bygningens energibehov, energiforbrug og indeklima under forskellige klimascenarier. Derudover foretages beregninger af totaløkonomi og livscyklusvurderinger, hvor energirenoveringens økonomiske og miljømæssige konsekvenser analyseres. Denne sektion skal munde ud i et konkret output for energirenoveringen, der viser de forventede energiforbedringer i henhold til EU's direktiver.

Rapportens fjerde og sidste sektion indeholder afsluttende refleksioner over projektets resultater. Her diskuteres de metodiske valg, resultaternes anvendelighed og de eventuelle begrænsninger, der er identificeret undervejs. Sektionen afsluttes med en konklusion, hvor hovedresultaterne opsummeres, samt en perspektivering, der sætter energirenoveringen i et bredere samfundsmæssigt perspektiv.

For at få det optimale udbytte af rapporten anbefales det at læse den i sin helhed, da de enkelte sektioner bygger videre på hinanden. Første sektion giver en nødvendig forståelse af konteksten, mens anden sektion danner grundlaget for analysen af renoveringsmulighederne. Tredje sektion indeholder de konkrete beregninger og vurderinger af de foreslåede tiltag, og fjerde sektion samler konklusionerne og ser fremad. Rapporten henvender sig primært til fagfolk inden for byggebranchen, men kan også anvendes af beslutningstagere, der arbejder med implementering af EU's energikrav i den eksisterende bygningsmasse.

2.8 Definitioner

Alle registrerede bygningsdele i projektet er tildelt et entydigt bygningsdelsnummer efter BIM7AA-standarden. BIM7AA er en dansk klassifikationsstruktur, der grupperer konstruktioner og installationsdele i tre cifre (hovedgruppe → undergruppe → specifik del). Når en bygningsdel har fået sit nummer, følger det samme kode gennem hele rapporten - fra tilstandsregistrering og analyser, til løsningsforslag, økonomi og LCA-opgørelser. Denne konsekvente metode gør det nemt for læseren at genkende og krydshenviser information på tværs af tekst, tegninger og modeller. (Molio, 2025)

3 Teori

3.1 Bygningsreglementet

3.1.1 Historiske bygningsreglementer

Når renovering af ældre bygninger skal vurderes, er det afgørende at kende den oprindelige bygningsopbygning samt eventuelle tidligere renoveringer. Ved at undersøge gamle byggetegninger og dokumentation er det muligt at få en bedre forståelse af, hvordan bygningen er konstrueret, og hvor meget varmeisolering der er i konstruktionerne.

Derudover er det væsentligt at tage højde for de bygningsreglementer, der var gældende på opførelsestidspunktet, da disse har haft stor indflydelse på bygningens konstruktion og energimæssige ydeevne. Med denne viden bliver det lettere at vurdere, hvor det bedst kan betale sig at renovere, samt hvilke energimæssige og økonomiske tiltag der vil have den største effekt. I dette tilfælde er bygning A opført i 1952, bygning B i 1977, og der er gennemført en større renovering samt mindre tilbygninger i 2005.

Skovglimt består af flere bygninger fra forskellige perioder. Bygning A er opført i 1952, hvor Stenlille var underlagt bygningsvedtægter for landkommuner – baseret på byggeloven for landet fra 1932. Der fandtes ikke én samlet national byggelov, men reglerne lå tæt op ad Københavns Byggelov af 1939, som fokuserede på sundhed, holdbarhed og brandsikring – ikke specifikt på energiforbrug. Isolering blev ikke krævet, og bygninger fra denne periode var ofte opført med massive ydervægge og minimale isoleringslag, fx savsmuld eller kork. Kuldebroer var almindelige, og enkeltlags- eller koblede vinduer bidrog til stort varmetab. (Byggeskadefonden, 2025)

Bygning B blev opført i 1977, hvor energikrav først begyndte at vinde indpas. Selvom Bygningsreglement 1977 var gældende, trådte de skærpede energikrav først i kraft i 1979, og det er derfor sandsynligt, at kravene fra Bygningsreglement 1972 blev anvendt. Her blev varmeisolering reguleret gennem DIF-norm nr. 55, og U-værdier for bygningsdele blev introduceret som mål for varmetab. Samtidig blev der stillet krav om, at konstruktioner skulle udføres uden væsentlige kuldebroer og beskyttes mod fugt og vind. (Boligministeriet)

Bygning D og moderniseringen i 2005 er udført under BR95 (version 2004). Her var U-værdikravene klart definerede, og det vurderes, at bygningen på dette tidspunkt er bragt op til gældende minimumsstandard, hvor det var muligt uden omfattende indgreb. Det var først i 2008, at bygningsreglementerne blev samlet i én fælles version (BR08), som integrerede kravene for både etagebyggeri og småhuse.

Sammenfattende repræsenterer *Skovglimts* bygningsmasse en arkitektonisk og teknisk udvikling over flere årtier – fra stort set uisolerede konstruktioner til mere moderne bygningsdele med isoleringskrav og systematiske energivurderinger. Denne historik stiller særlige krav til renoveringsstrategien, som må tage højde for de forskellige konstruktioners termiske egenskaber og deres potentiale for energioptimering.

I Tabel 2 fremgår kravene til varmeisolering iht. BR95.

Bygningsdel	U-værdi [W/m ² K]
Ydervægge med vægt under 100 kg/m ²	0.30
Ydervægge med vægt over 100 kg/m ² og kældervægge mod jord	0.40
Skillevægge mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum	0.60
Etageadskillelser mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum	0.40
Terrændæk, kældergulve mod jord og etageadskillelser over det fri eller ventileret kryberum	0.30
Industrigulve, beregnet for tung belastning	0.60
Loft- og tagkonstruktioner, herunder skunkvægge	0.25
Flade tage og skråvægge direkte mod tag	0.25
Vinduer, yderdøre, ovenlys, glasvægge, porte og lemme mod det fri eller mod rum, der er uopvarmede eller opvarmet til en temperatur, der er mere end 8°C lavere end temperaturen i det aktuelle rum	2.90

Tabel 2 - BR95 (2004), mindstekrav til klimaskærmens bygningsdele, U-værdi [W/m²K].

3.1.2 Bygningsreglementet, BR18

Bygningsreglementet BR18 opdateres som regel to gange om året. I denne rapport er der taget udgangspunkt i BR18 pr. 1/1 2025, som igennem hele rapporten betegnes som "BR18 (2025)."

Minimums-U-værdierne for nybyggeri er fastsat ud fra et fugtteknisk kritisk synspunkt for at sikre, at konstruktionen ikke medfører fugtrelaterede problemer.

Ved energirenovring skal byggeriet overholde BR18 (2025), som stiller krav til blandt andet minimums-U-værdier og linjetab for klimaskærmen. Kravene varierer afhængigt af projektets karakter – fx nybyggeri, renovering, ombygning eller udskiftning af enkelte bygningsdele.

Derudover opererer BR18 (2025) med frivillige renoveringsklasser (1 og 2), hvor energiforbruget dokumenteres gennem Be18-beregninger i henhold til DS 418 og SBI 213.

Hvis enkelte bygningsdele ikke kan overholde U-værdikravene, kan den samlede varmetabsramme anvendes som alternativ. Denne metode vurderer den samlede energieffektivitet for klimaskærmen, hvilket muliggør kompenserende forbedringer i andre bygningsdele.

Tabel 3 og Tabel 4 viser, at U-værdikravene for renovering og ombygning er skærpede sammenlignet med nybyggeri. Det skyldes, at nybyggeri vurderes ud fra en samlet energiramme, hvilket giver større fleksibilitet i bygningsudformningen. Her kan varmetab i én bygningsdel eksempelvis modvirkes af ekstra isolering i en anden.

U-værdi [W/m ² K] Bygningsdel	Renovering/ ombygninge	Tilbygning/ ændrer anvendelse	Nybyg BR18 (2025)
Ydervægge og kældervægge mod jord	0,18	0,15	0,30
Terrændæk, kældergulve mod jord og etageadskillelser over det fri eller ventileret kryberum	0,10	0,40	0,20
Etageadskillelser og skillevægge mod rum, hvor temperaturforskellen mellem rummene er 5 °C eller mere	0,40	Ikke et krav	0,40
Etageadskillelser under gulve med gulvvarme mod rum, der er opvarmede	Ikke et krav	Ikke et krav	0,50
Loft- og tagkonstruktioner, herunder skunkvægge, flade tage og skrånvægge direkte mod tag	0,12	0,40	0,20

Tabel 3 - BR18 (2025) mindstekrav til klimaskærmens U-værdi [W/m²K].

Linjetab [W/mK] Bygningsdel	Renovering/ ombygninge	Tilbygning/ ændrer anvendelse	Nybyg BR18 (2025)
Fundamenter omkring rum, der opvarmes til mindst 5 °C	0,12	0,12	0,4
Samling mellem ydervæg og vinduer eller yderdøre, porte og lemme	0,03	0,03	0,06
Samling mellem tagkonstruktion og ovenlysvinduer eller ovenlyskupler	0,10	0,10	0,20

Tabel 4 - BR18 (2025) mindstekrav til klimaskærm og linjetab [W/mK].

Ved renovering gælder at bygningsdele, der åbnes op – eksempelvis ved udskiftning af et tag – som udgangspunkt skal opfylde kravene til minimums-U-værdier for renovering/ombygning.

Hvis det ikke er muligt at opfylde kravene, eksempelvis på grund af uforholdsmæssigt høje omkostninger, skal det dokumenteres, at kravet ikke er økonomisk rentabelt.

Vinduer og døre

Der stilles også krav til vinduer og døre for at sikre energieffektivitet. Kravene er de samme, uanset om der er tale om renovering, tilbygning eller nybyggeri.

Disse krav omfatter både U-værdier og energibalance.

De gældende U-værdikrav for vinduer og døre fremgår af Tabel 5.

Bygningsdel	U-værdi [W/m ² K]
Vinduer og glasydervægge	1,2
Yderdøre	1,2
Skyde- og foldedøre	1,0
Ovenlyskupler	1,4
Lystunneler	2,0

Tabel 5 - U-værdier for vinduer og døre.

Udover U-værdien sætter BR18 (2025) også krav til energibalancen for vinduer skal være positiv, for at sikre energieffektivitet i bygninger. For et referencevindue skal energibalancen være mindst 0 kWh/m² per år,

mens ovenlysvinduer og glastage skal have en energibalancen på mindst 10 kWh/m² per år. Energibalancen beregnes ved hjælp af følgende formel:

$$E_{ref} = 196,4 \cdot g_w - 90,36 \cdot U_w$$

Hvor:

- g_w = solvarmetransmittansen, der angiver, hvor stor en andel af solindfaldet, der trænger gennem vinduet,
- U_w = U-værdien, som beskriver varmetabet gennem vinduet i W/m²K.

For at opfylde disse krav skal producenterne beregne energibalancen baseret på et referencevindue. Referencevinduet er et standardiseret vindue med en størrelse på 1,23 m × 1,48 m (areal = 1,82 m²), der er sydvendt og ingen skygger fra omgivelserne. Ved at anvende referencevinduet kan producenterne sikre, at deres vinduer lever op til energikravene, uanset forhold.

U-værdien er afgørende for, hvordan energibalancen vurderes, da den beskriver varmetabet gennem vinduet eller døren. Energibalancekravene sigter mod at sikre, at bygninger er energieffektive og bidrager til et lavere energiforbrug. BR18's krav til energibalancen fremgår af Tabel 6.

Bygningsdel	Energibalancen kWh/m ² per år.
Vinduer (Referencevindue)	>0
Ovenlysvinduer og glastage	>10
Glasydervægge (som vinduer)	>0
Yderdør (Glasyder dør som fx terrassedør) *	>0
Ovenlyskupler	>10
Lystunneler	>10

Tabel 6 - Energibalancekrav, BR18 (2025).

**Energibalancekravet for yderdøre varierer afhængigt af dørtypen. Der er ikke et specifikt energibalancemål angivet for døre i BR18, men dørens energiydelse skal overholde de samlede energikrav i bygningen.*

3.1.3 Frivillige renoveringsklasser

De frivillige renoveringsklasser blev indført i Bygningsreglement 2015 (BR15) som en del af strategien for at fremme energirenovering af eksisterende bygninger.

Initiativet er også forankret i det tidligere EU's Bygningsdirektiv (2010/31/EU), som fokuserer på energiberegninger og energimærkning af bygninger med henblik på at forbedre energieffektiviteten i EU. Direktivet stiller krav om, at medlemslandene etablerer metoder til at vurdere bygningers energibehov, herunder for opvarmning, køling, varmt brugsvand og elektricitet.

Formålet med de frivillige renoveringsklasser er at tilbyde bygningsejere et alternativ til de faste komponentkrav i bygningsreglementet, som gælder for ombygninger og renoveringer under BR15 og nu BR18 (2025). Ved at anvende energirammen for eksisterende bygninger opnås større fleksibilitet i renoveringsprojekter. Dette muliggør valg af mere effektive løsninger, såsom øget loftisolering, uden at der skal gøres noget ved facaden, så længe facaden overholder minimumskravet til U-værdi for nybyggeri.

BR18 (2025) stiller forskellige krav til energiforbrug afhængigt af bygningstypen.

- Boliger, kollegier, hoteller og lignende: Disse bygninger kan klassificeres som en type, der har specifikke krav til energibalancen og tilført energi.
- Kontorer, skoler, institutioner og andre bygninger: Disse bygninger er underlagt andre krav, der også varierer afhængigt af energiforbruget og bygningens funktion.

Fælles for begge klasser og bygningstyper er, at behovet for tilført energi skal reduceres med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. Denne reduktion skal dokumenteres i henhold til SBI-anvisning 213, og en del af bygningens samlede energiforsyning skal bestå af vedvarende energi. Ifølge BR18 (2025) anses fjernvarme som en vedvarende energikilde.

For boliger, kollegier, hoteller og lignende er kravet, at det samlede energibehov til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand pr. m² opvarmet etageareal ikke overstiger grænserne i Tabel 7, som er fastsat i BR18 (2025).

Renoveringsklasse for boliger	Energiramme kWh/m ² pr. år
Renoveringsklasse 1	70,0 + 2.200/Areal
Renoveringsklasse 2	52,5 + 1.650/Areal

Tabel 7 - Maksimale energibehov for renoveringsklasse 1 og 2. jf. BR18 (2025).

Renoveringsklasse 2 anvendes til at give en større og bredere frihed til at energirenovere. De specifikke isoleringskrav, der stilles i BR18 (2025) til de enkelte bygningsdele, når de ombygges, er ikke altid en optimal løsning, der giver den største energibesparelse for den økonomi, der er til rådighed. Opfyldes dette krav bortfalder komponentkravene for de specifikke konstruktioners isoleringsniveau (Kragh, 2016).

Renoveringsklasse 1 repræsenterer et mere ambitiøst renoveringsniveau end renoveringsklasse 2, hvor energibehovet er yderligere reduceret, og der skal etableres et sundt indeklima. Dette indebærer, at bygningen skal renoveres i særdeles høj kvalitet, hvilket giver bygherren mulighed for at promovere boligerne over for både beboere og det offentlige. Fokus på energibesparelser og indeklima er centralt i renoveringsklasse 1, hvilket gør det til en attraktiv løsning for moderne byggeri og renovering (Kragh, 2016).

Som et yderligere krav til renoveringsklasse 1 for boliger skal bygningen, udover at overholde de skærpede energikrav, også opfylde kravene til indeklima i henhold til BR18 (2025).

Dette omfatter følgende kapitler i bygningsreglementet:

- Kapitel 18: Lys og udsyn § 382-384.
- Kapitel 19: Termisk indeklima § 386.
- Kapitel 22: Ventilation § 443-449.

3.2 Fugt- og varmeteori

Ved renovering af bygninger er det vigtigt at vurdere bygningens fugtbelastningsklasse for at kunne planlægge korrekte fugttekniske løsninger. Fugtbelastningsklassen angiver, hvor udsat bygningen/rummet er for fugtpåvirkninger, og fungerer som en vejledning i valget af egnede renoveringstiltag. Denne vurdering er vigtig for at minimere risikoen for fugtrelaterede skader, såsom kondens ved kuldebroer.

Fugtbelastningsklasserne anvendes derfor til både risikovurdering og planlægning af renoveringstiltagende. Der er defineret fem forskellige klasser, som kategoriserer fugtpåvirkningen - disse fremgår af Tabel 8.

De fem fugtbelastningsklasser	
1	Ubenyttede bygninger som f.eks. tørre lagerhaller, idrætshaller uden tilskuere, industribygninger uden fugtproduktion.
2	Kontorer, forretninger, boliger med normal beboelsestæthed og ventilation, som er udført iht. bygningsreglementet.
3	Boliger med ukendt beboelsestæthed (mere end to personer) og uden mekanisk ventilation samt idrætshaller med mange tilskuere.
4	Storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum
5	Specielle bygninger f.eks. vaskerier, bryggerier og svømmehaller

Tabel 8 – Oversigt over de fem fugtbelastningsklasser. Tabellen er med inspiration fra (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023)

På baggrund af de fem fugtbelastningsklasser vurderes *Skovglimt* til at være i fugtbelastningsklasse 2. Beboelsestætheden er kendt og består af én person pr. bolig. Dog er det vigtigt at understrege, at beboerne på *Skovglimt* er borgere med særlige behov, der har fået tildelt et botilbud. Deres adfærd kan derfor afvige fra det forventede i en standard bolig, hvilket kan påvirke fugtbelastningen. Den reale fugtbelastningsklasse skal derfor beregnes.

Hver af de fem fugtbelastningsklasser er defineret ud fra fugttilskuddet i indeluften. Figur 18 viser hvordan de fem fugtbelastningsklasser hænger sammen med fugttilskuddet i indeluften, og hvordan fugttilskuddet mindskes i takt med at temperaturen i udeluften stiger. Dette skyldes en antagelse om, at der ved højere udendørstemperaturer vil være en øget naturlig ventilation.

For at bestemme fugtbelastningsklassen for en bygning er det derfor nødvendigt at kende fugttilskuddet i indeluften. Fugttilskuddet udgør forskellen mellem fugtindholdet i inde- og udeluften og beregnes ud fra mætningsdamptrykket i begge miljøer (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023).

Sammenhængen kan beskrives ved følgende parametre og formler:

Parametre:

- g : Fugttilskuddet i indeluften.
- θ : Temperaturen i enten udeluften (θ_{ude}) eller indeluften (θ_{inde}).
- RF_{ude} : Den relative luftfugtighed ude.
- RF_{inde} : Den relative luftfugtighed inde.
- $P_{m,ude}$: Mætningsdamptrykket i udeluften, afhængigt af udetemperaturen.
- $P_{m,inde}$: Mætningsdamptrykket i indeluften, afhængigt af indetemperaturen.
- e : Eulers tal, som har værdien 2,71828.

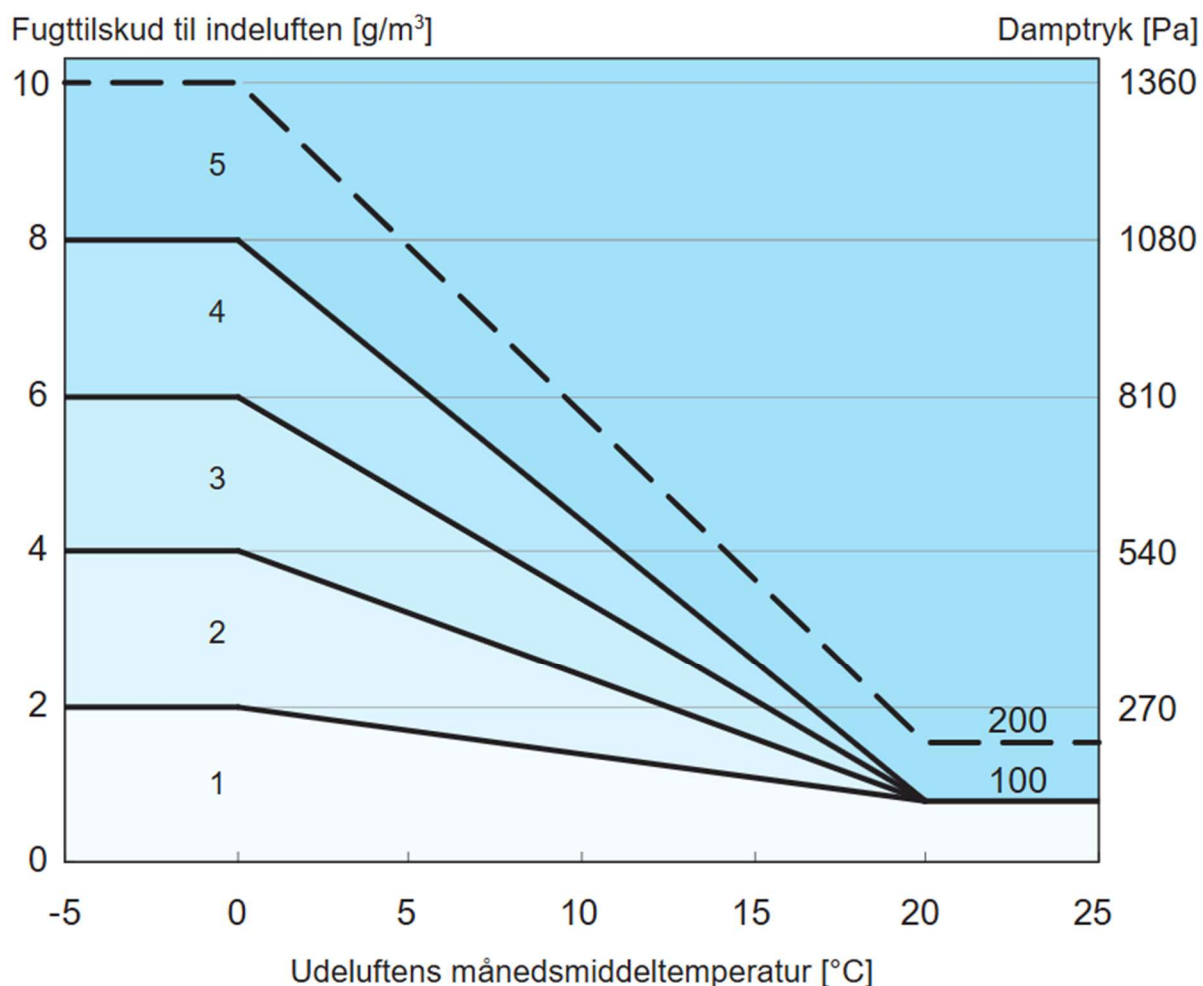
Beregninger:

Mætningsdamptrykket for inde- og udeluften beregnes med følgende formel:

$$P_{m, inde} = 610,5 * e^{\frac{17,269 * \theta}{237,3 + \theta}}$$

Fugttilskuddet, g , findes derefter som forskellen mellem de aktuelle damptryk i hhv. inde- og udeluften:

$$g = (P_{m, inde} * RF_{, inde}) - (P_{m, ude} * RF_{, ude})$$



Figur 18 - Fugttilskud til indeluften i de fem fugtbelastningsklasser [g/m³] (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023)

Fugtindholdet varierer løbende med årstiderne og spiller en væsentlig rolle for bygningers indeklima og konstruktioners holdbarhed. Når der er forskel på luftfugtigheden indenfor og udenfor, opstår der en damptryksforskel, som kan føre til fugtvandring gennem bygningskonstruktionen. Denne damptransport intensiveres især i vintermånederne, hvor udeluften har et lavt fugtindhold på grund af de lave temperaturer.

Når temperaturen falder, søger fugten fra den varmere indeluft ud mod den koldere udeluft. Hvis konstruktionen ikke er tilstrækkeligt beskyttet med et lufttæt lag, kan dette medføre kondensdannelse inde i konstruktionen. Kondens kan opstå, når fugten afkøles til under dugpunktet, hvilket typisk sker ved kuldebroer, hvor overfladetemperaturen falder markant. Der kan dog også opstå fugtrelaterede problemer i konstruktionen, selvom temperaturen ikke når helt ned til dugpunktet. Skimmelsvamp kan eksempelvis begynde at vokse ved relative luftfugtigheder på omkring 75 %, hvis de øvrige vækstbetingelser – temperatur, næring og eksponeringstid – er til stede.

Tabel 9 viser de kritiske indvendige overfladetemperaturer for de fire første fugtbelastningsklasser. Tabellen viser grænserne for skimmelvækst (75 % RF) og dugpunktet (100 % RF). Det er dog vigtigt at bemærke, at tabellen kun bør anvendes som en vejledende principmodel. Baggrunden for beregningerne er en stationær metode, hvilket betyder, at den ikke tager højde for de naturlige temperaturudsving, der forekommer over måneden. Derfor bør der foretages en individuelt vurdering/beregning for hver case (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023).

Fugtbelastningsklasse	Måned	Udetemp.	Indetemp.	Kritisk overfladetemperatur	
		°C	°C	100 % RF, °C	75 % RF, °C
1	December	0,7	20	4,8	9,0
2	December	0,7	20	8,6	13,0
3	December	0,7	20	11,8	16,2
4	December	0,7	20	14,4	18,9

Tabel 9 - Kritiske indvendige overfladetemperaturer. Tabellen er med inspiration fra (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023)

3.3 Fremtidsscenarier/ klimaændringer

Klimaforandringer medfører et stigende behov for, at bygninger kan modstå mere ekstreme vejrforhold – både kortvarige og langvarige. Det handler ikke blot om komfort, men også om at sikre bygningers funktionalitet, indeklima og energimæssige ydeevne under belastende forhold. Sommeren 2018 var usædvanligt varm og viste tydeligt, at de fleste bygninger, som i dag projekteres ud fra et typisk DRY-år, ikke nødvendigvis er forberedt på så ekstreme vejrforhold. Det gør det svært at forudse, hvordan bygninger reagerer i perioder med f.eks. længerevarende hedeølger (Wittchen & Jønsson, 2021).

Rapporten *Vejrdata til fremtidens byggeri* introducerer nye datasæt, som gør det muligt at simulere, hvordan bygninger vil fungere under fremtidens vejrforhold. På baggrund af målinger fra DMI's station i Sjælsmark (2001–2019) er der sammensat fire såkaldte ekstrem-år, hvor hver måned er valgt ud fra særligt ekstreme værdier – som fx den varmeste juli eller den mest solrige april. Derudover indeholder rapporten fremskrivninger for klimaet i 2050 og 2090, baseret på IPCC's scenarie RCP8.5, der antager, at udledningen af drivhusgasser fortsætter som hidtil. Disse data er tilpasset danske forhold og viser, at vi kan forvente højere temperaturer og mindre solindfald fremover. Det har stor betydning for, hvordan vi skal opvarme og køle bygninger, og understreger behovet for at tilpasse byggeriet til et varmere og mere ekstremt klima (Wittchen & Jønsson, 2021).

Klimadataene er tilgængelige i formater, der kan anvendes direkte i simuleringsprogrammer BSim og Be18. Det muliggør detaljerede analyser af energiforbrug, indeklima og bygningers robusthed under fremtidige klimascenarier.

3.4 Økonomi

Selvom energirenovering af bygninger har et stort potentiale for både klima- og komfortforbedringer, er det væsentligt at anerkende, at disse forbedringer også medfører økonomiske investeringer. Det er derfor vigtigt at vurdere, om en energirenovering er økonomisk forsvarlig — ikke blot i anskaffelsesfasen, men over hele bygningens levetid.

3.4.1 Life Cycle Costing (LCC)

Life Cycle Costing (LCC), eller totaløkonomi, er en tilgang til at vurdere de samlede økonomiske konsekvenser af en bygning eller en bygningsdel over dens levetid. I stedet for blot at se på anskaffelsesprisen undersøger LCC de økonomiske aspekter af bygningens samlede livscyklus, herunder omkostninger til drift, vedligehold og eventuel udskiftning. Dette perspektiv sikrer, at økonomiske beslutninger i byggeriet ikke kun fokuserer på kortsigtede udgifter, men også inddrager langsigtede økonomiske fordele og bæredygtige løsninger.

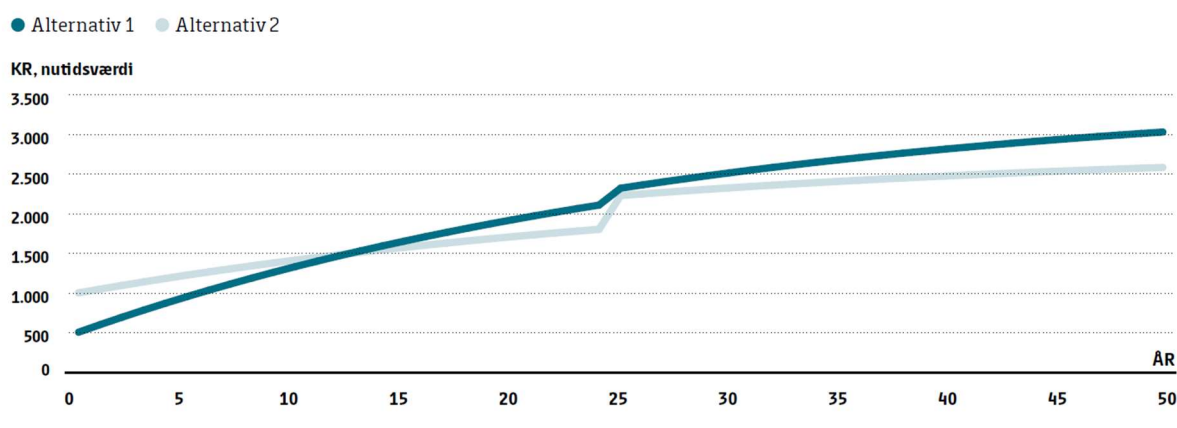
For at sammenligne forskellige investeringsmuligheder anvendes nutidsværdiberegninger. Dette gør det muligt at vurdere, hvordan fremtidige omkostninger kan oversættes til nutidens pengeværdi, hvilket er særligt relevant, når beslutningstagere skal træffe beslutninger om langsigtede investeringer. Her spiller kalkulationsrenten en central rolle, da den påvirker, hvor meget fremtidige besparelser betyder i den samlede analyse (Haugbølle, 2015).

Inddragelse af LCC i byggeprojekter bidrager til mere økonomisk rationelle beslutninger. Blandt fordelene ved denne tilgang er:

- Reducerede driftsudgifter ved valg af materialer med lang levetid og lav vedligeholdelse.
- Økonomiske besparelser for både private og offentlige aktører gennem optimeret energi- og ressourceforbrug.
- En mere bæredygtig og samfundsøkonomisk fordelagtig anvendelse af byggematerialer.

Figur 19 viser et eksempel på, hvordan et materiale, som er dyrere end et andet ved indbygningen, bliver det økonomisk mest fordelagtige efter en periode på omkring 12 år.

Eksempel



Figur 19 - Eksempel på tidshorisontens indflydelse. Figur fra (Haugbølle, 2015)

Når de totaløkonomiske beregninger er gennemført, kan de anvendes i forskellige rentabilitetsberegningsmetoder for at se, om en investering er økonomisk fordelagtig (Ministeriet for By, Bolig og Landdistrikter, 2014).

3.4.2 Rentabilitet

Energirenovering af bygninger er en kompleks økonomisk beslutning, hvor investeringsomkostninger skal afvejes i forhold til potentielle energibesparelser, driftsomkostninger og bygningens samlede levetid. Økonomien bag energirenovering vurderes typisk ud fra faktorer som investeringsbehov, årlige besparelser og teknisk levetid for de valgte energiforbedrende tiltag.

En central udfordring i økonomiske vurderinger af energirenovering er, at rentabiliteten af et givent tiltag afhænger af flere variable faktorer, herunder udviklingen i energipriser, renteændringer og bygningens vedligeholdelsesbehov. En korrekt økonomisk vurdering kræver derfor en detaljeret analyse af både investeringsomkostninger og den forventede økonomiske gevinst over tid.

For at kunne sammenligne forskellige energirenoveringstiltag anvendes forskellige økonomiske vurderingsmetoder. Disse metoder varierer i kompleksitet og præcision og har til formål at identificere, hvilke tiltag der giver den største økonomiske fordel for bygningsejeren.

I forbindelse med energirenovering anvendes forskellige økonomiske modeller til at vurdere rentabiliteten af en investering (Mortensen, et al., 2017) (Simonsen, 2025).

Simpel tilbagebetalingstid

En af de mest anvendte metoder er beregning af simpel tilbagebetalingstid, som beregnes ud fra følgende formel:

$$T = \frac{I}{B}$$

hvor:

- T = er tilbagebetalingstiden i år
- I = er investeringsomkostningen (kr.)
- B = er den årlige energibesparelse (kr./år)

Tilbagebetalingstiden angiver, hvor mange år der går, før investeringen har tjent sig selv hjem. Metoden er letforståelig og anvendelig til en hurtig økonomisk vurdering, men den tager ikke højde for hverken rente, inflation, teknisk levetid eller udviklingen i energipriser (Segs innovation).

3.4.3 Samspil mellem rentabilitet og totaløkonomi

Ved at kombinere totaløkonomiske beregninger med rentabilitetsberegninger opnås et mere nuanceret billede af økonomien bag energirenoveringer. Hvor totaløkonomiske beregninger fokuserer på de samlede udgifter og besparelser over en fast periode, hjælper rentabilitetsberegninger med at afgøre, om en investering kan betale sig i forhold til alternative løsninger (Ministeriet for By, Bolig og Landdistrikter, 2014).

4 Metoder og materialer

4.1 LCA

Livscyklusvurdering (LCA) – overblik

I denne rapport anvendes LCAbyg som livscyklusvurderingsmetode.

Følgende metodebeskrivelse er baseret på (Kanafani, et al., 2021) dog med enkelte tilrettelser, såsom hvilke livscyklusmoduler, der medtages i beregningerne og hvilke EPD-data beregninger bygger på.

Livscyklusvurdering (LCA) anvendes til at vurdere energirenoveringers samlede klimapåvirkning ved at sammenligne energibesparelser med påvirkningen fra de anvendte materialer. Metoden følger EN 15978-standarden og bygger på en 50-årig betragtningsperiode.

LCA'en dækker følgende livscyklusmoduler for beregning af de enkelte tiltag:

- A1-3 (Materialeproduktion): Udvinning, transport og fremstilling af byggematerialer.
- B4 (Udskiftninger): Forventede materialeskift i bygningens levetid baseret på dokumenterede levetider.
- B6 (Driftsenergi): Bygningens energiforbrug efter renovering.
- C3-4 (Affaldsbehandling): Klimapåvirkning fra bortskaffelse og eventuel genanvendelse af materialer.

Ved beregning af den samlede LCA for hele energirenoveringen er byggeprocessen (modulerne A4–A5) ligeledes medtaget. Dette er i tråd med de kommende krav i bygningsreglementet, som fra den 1. juli 2025 stiller krav om maksimalt 1,5 kg CO₂-ækv./m²/år for byggeprocessen. Kravet vil alene gælde for nybyggeri og tilbygninger, som er omfattet af byggetilladelse. Da byggeprocessen imidlertid udgør en væsentlig andel af den samlede CO₂-udledning ved et byggeri, er den medtaget i denne beregning for at sikre en så realistisk og retvisende vurdering som muligt.

Datagrundlag for beregningerne

Der anvendes generiske EPD-data (miljøvaredeklarationer), da import og indtastning af specifikke EPD-data er tidskrævende. Derudover vil specifikke EPD-data i høj grad afhænge af, hvilken leverandør der vælges. De generiske data sikrer derfor en mere gennemsnitlig beregning, dog med en vis risiko for overestimering af materialernes CO₂-udledning.

Derudover påpeger (Kanafani, et al., 2021), at der ikke skal medregnes bortskaffelse af de eksisterende materialer (modulerne C3–C4), da disse indgår i begge scenarier – både ved renovering og ved en situation, hvor der ikke renoveres.

Affaldshåndteringen af de eksisterende materialer indgår således på begge sider af sammenligningen og skal derfor udelades fra beregningen.

Primærenergifaktorer og fremskrivning

Primærenergifaktorer anvendes til at omregne leveret energi (f.eks. el og fjernvarme) til primærenergiforbrug og derved beregne den faktiske CO₂-påvirkning.

I modsætning til (Social- og Boligstyrelsen, 2025) statiske primærenergifaktorer anvendes fremskrevne emissionsfaktorer for energi. Disse tager højde for, at el- og fjernvarmeproduktion forventes at blive grønnere over tid. De fremskrevne emissionsfaktorer er baseret på (COWI, 2020) og viser, at CO₂-påvirkningen fra el og fjernvarme vil falde markant frem mod 2030, hvorefter den stabiliseres på et lavt niveau. Energibesparelser i de første år har derfor større effekt på klimapåvirkningen end besparelser senere i perioden.

Klimaeffektivitet og balancepunkt

For at vurdere energirenoveringers klimamæssige rentabilitet beregnes:

- Nettopåvirkning: Energibesparelse minus materialepåvirkning. En negativ værdi viser en reel reduktion af CO₂-udledning.
- Balancepunkt: Tidspunktet hvor energibesparelsen har udlignet materialernes klimapåvirkning.
- Tilbagebetalingstid: Den tid, det tager for renoveringen at blive klimamæssigt rentabel.

Formålet med beregningen er at bestemme, hvor lang tid der går, før den CO₂-udledning, der er forbundet med at etableringen, er "betalt tilbage" gennem de løbende CO₂-besparelser i bygningens driftsperiode. Kun de parametre, der direkte indgår i denne balance, anvendes – se Tabel 10.

Symbol	Beskrivels	Navn i tabellerne, som vises i forbedringsforslagene
C₀	Total CO ₂ -udgift for optimeringen (kg CO ₂ -ækv) – omfatter de ovenstående faser	"Total CO ₂ -udgift for optimeringen"
C₅₀	Akkumuleret CO ₂ -drifts-besparelse over 50 år (kg CO ₂ -ækv)	"CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år"
C_{årlig}	Årlig CO ₂ -besparelse (kg CO ₂ -eq./år)	Beregnes som C ₅₀ /50 år
T_{CO2}	CO ₂ -tilbagebetalingstid (år)	Resultat, "CO ₂ -afkasttid (år)"

Tabel 10 - Parametre, der indgår i balancen af bygningens driftsperiode.

1. Årlig CO₂-besparelse

$$C_{\text{årlig}} = \frac{C_{50}}{50}$$

Da den opgjorte driftsbesparelse er kumuleret over 50 år, divideres den med analyseperioden (50 år) for at få en gennemsnitlig årlig besparelse.

2. Tilbagebetalingstid for CO₂

$$T_{CO2} = \frac{C_0}{S_{\text{årlig}}}$$

Tilbagebetalingstiden fås ved at dele den samlede indledende CO₂-udgift med den årlige CO₂-besparelse.

- Hvis T_{CO2} er mindre end analyseperioden (50 år), vil forbedringsforslaget reducere CO₂-udledningen inden for dets levetid.
- Hvis T_{CO2} er større end analyseperioden, opnås ingen netto CO₂-gevinst inden for de 50 år (negativ total besparelse angives).

De beregnede tilbagebetalingstider afrundes til nærmeste hele år.

4.2 LCC- og rentabilitet

For at vurdere rentabiliteten af energirenoveringen anvendes en kombineret tilgang, hvor den simple tilbagebetalingstid og Life Cycle Costing (LCC) indgår. Denne kombination sikrer en helhedsorienteret tilgang ved at identificere, analysere og prioritere energiforbedrende tiltag baseret på både kortsigtede og langsigtede økonomiske konsekvenser (Mortensen, et al., 2017).

Indledningsvist er der i beregningerne anvendt simpel tilbagebetalingstid for hvert potentielt energirenoveringstiltag. Metoden er let anvendelig og giver en hurtig vurdering af økonomisk attraktivitet, men tager ikke højde for rente, inflation eller udvikling i energipriser.

Sideløbende med beregningen af simpel tilbagebetalingstid udføres en uafhængig Life Cycle Costing (LCC)-analyse for hvert energirenoveringstiltag. LCC-analysen indebærer beregninger af nutidsværdien af samtlige omkostninger over en levetidsperiode på 50 år. Formålet med LCC-analysen er at sammenligne materialevalg og identificere, hvilket materiale der har den laveste samlede økonomiske belastning på lang sigt, uden at dette påvirker vurderingen af rentabiliteten eller tilbagebetalingstiden direkte.

Samlet vurdering

Afslutningsvis samles de økonomisk mest fordelagtige renoveringstiltag fra både den simple tilbagebetalingstid og LCC-vurderinger i én samlet beregning.

4.3 Be18

Be18 er et beregningsprogram, udviklet af det tidligere Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), nu BUILD under Aalborg Universitet, i samarbejde med Energistyrelsen i Danmark. Programmet anvendes til at bestemme bygningers energibehov i overensstemmelse med det danske bygningsreglement (BR18, 2025), der sætter energikrav for at sikre lavere energiforbrug og øget energieffektivitet. Be18 tager højde for faktorer som varmetab gennem konstruktioner, vinduer og døre, samt energibehov til opvarmning, ventilation, varmt vand og belysning, baseret på bygningens størrelse og orientering.

Be18 muliggør også beregning af klimaskærmens lufttæthed, varmegenvinding i ventilationssystemer og brug af vedvarende energikilder som solceller, solvarme eller vindmøller. Desuden giver programmet en forenklet beregning af risikoen for overtemperatur i bygningen. For boliger kan det også bruges til at dokumentere overtemperatur i det mest kritisk rum. (Aggerholm, 2018)

Energiberegning for Renoveringsklasser

Ved beregning af energibehovet for renoveringsklasse 1 og 2 skal der tages højde for bygningens klimaskærm, placering, orientering, varmeanlæg, varmtvandsforsyning, varmeakkumulering, ventilationsanlæg, køleanlæg, solindfald, solafskærmning, naturlig ventilation og indeklima. Vedvarende energi kan også indgå i beregningen, hvis det etableres i bygningen.

BR18 Energirammer for Renoveringsklasser

For Renoveringsklasse 1 beregnes energirammen efter følgende formel:

$$52,5 + 1.650/A \text{ kWh/m}^2 \text{ pr. år}$$

For Renoveringsklasse 2 beregnes energirammen efter følgende formel:

$$70,0 + 2.200/A \text{ kWh/m}^2 \text{ pr. år}$$

Energi tilføres fra forskellige energiformer, hver med en vægtet energifaktor:

- Elektricitet: 1,9.
- Fjernvarme: 0,85.
- Andre varmekilder: 1,0, samt den pågældende nyttevirkning.

Lufttæthed og Trykprøvning

Luftutætheder i klimaskærmen for nybyggede bygninger må ikke overstige 1,0 liter pr. sekund pr. m² opvarmet etageareal ved en trykforskel på 50 pascal.

Hvis lufttætheden ikke er målt, kan der i beregninger regnes med en værdi på 1,5 liter pr. sekund pr. m² ved samme trykforskel 50 pascal.

Beregning af Transmissionstab og Kuldebroer

Beregninger af bygningers energibehov skal overholde de fastsatte transmissionstab og varmetabsrammer, beregnet i overensstemmelse med DS 418. Kuldebroers effekt skal inkluderes i dokumentationen af U-værdier for de enkelte bygningsdele. (Michalik, et al., 2024)

Vedvarende Energi i energirammen

Vedvarende energi, som solceller og vindmøller, kan medregnes i energirammeberegningen, hvis de er placeret i nærheden af bygningen og forsyning af den pågældende bygning. Højest 25 kWh/m² pr. år kan medregnes som reduktion af energibehovet fra vedvarende energianlæg (Michalik, et al., 2024).

4.4 Wufi

WUFI er et simuleringsværktøj udviklet af Fraunhofer IBP til analyse af varme- og fugttransport i bygningsdele under dynamiske klimaforhold. Programmet anvender målte data som solstråling, nedbør, kapillær fugttransport og konvektion for at levere realistiske vurderinger af materialers og konstruktioners ydeevne over tid. Ved at inkludere faktorer som sollys, temperaturændringer og slagregn kan WUFI simulere fugt- og varmekonforhold, hvilket muliggør en vurdering af bygningsdelenes holdbarhed og robusthed (Michalik, et al., 2024).

Anvendelse af Wufi

I denne rapport anvendes Wufi til simuleringer med henblik på at vurdere fugtforhold i bygningsdele, særligt ved indvendig efterisolering. Der undersøges, om en konstruktionsopbygning medfører risiko for kondens, skimmelvækst eller kritisk ophobning af fugt.

4.5 Heat2

HEAT2 er et beregningsværktøj udviklet af Lunds Tekniska Högskola (Lunds Universitet) til at simulere varmeoverførsel i bygningsmaterialer og konstruktioner. Programmet anvendes til at modellere to-dimensionel varmestrøm og beregne temperaturfordelinger, varmeledningstab, overfladetemperaturer og kuldebroer i bygninger. Det er nyttigt til termisk design og vurdering af energieffektivitet i både nybyggeri og renoveringsprojekter (Nicolai Andersen, 2024).

Beregning af Kuldebroer

Kuldebroer er områder i bygningernes klimaskærm, hvor den termiske modstand er lavere, hvilket fører til øget varmetab. HEAT2 identificerer og kvantificerer disse ved hjælp af lineære kuldebroskoefficienter (Ψ -værdier), som specificeres i DS 418.

Anvendelse af HEAT2:

I denne rapport anvendes HEAT2 til at kvantificere energitab gennem bygningsdele baseret på beregningsgrundlag og værdier ifølge den danske standard DS 418. Programmet leverer data, der danner grundlag for vurdering af bygningskonstruktioners energieffektivitet. HEAT2 bruges til at analysere kuldebroer, beregne U -værdier og Ψ -værdier samt estimere overfladetemperaturer, hvilket er afgørende for at vurdere kondensrisiko i konstruktioner.

4.6 BSim

I denne rapport anvendes BSim (Building Simulation) som et centralt værktøj til at analysere bygningens nuværende og fremtidige indeklima i forbindelse med energirenoveringstiltag. BSim er et simuleringsprogram udviklet af BUILD (Institut for Byggeri, By og Miljø) ved Aalborg Universitet. Det tilbyder en programpakke til bygningsenergidesign, der gør det muligt at udføre dynamiske simuleringer af indeklima, energiforbrug og fugtforhold i bygninger (Kim B. Wittchen, 2013).

BSim anvendes til at opstille en baseline, der beskriver det nuværende indeklima i en udvalgt bolig i *Skovglimt*. Baseline etableres ved at modellere bygningens eksisterende konstruktioner, materialer, tekniske installationer og driftsforhold i BSim. Denne baseline fungerer som et referencepunkt for de efterfølgende analyser, hvor vi vurderer, hvordan forskellige energirenoveringstiltag vil påvirke indeklimaet.

BSim gør det muligt at sammenligne forskellige scenarier og identificere de mest effektive energirenoveringstiltag både i forhold til energimæssige forbedringer og optimering af indeklimaet. Resultaterne fra simuleringerne vil dermed danne grundlag for vurderinger af, hvilke tiltag der bedst balancerer energieffektivitet, komfort og totaløkonomi i samspil med de øvrige metoder og programmer.

Ved at anvende BSim som metodisk redskab sikres en datadrevet tilgang, hvor beslutninger om energirenoveringstiltag baseres på veldokumenterede analyser frem for skøn. Dette er afgørende for at sikre, at de foreslåede løsninger ikke blot opfylder de nye EU-krav, men også skaber et sundt og behageligt indeklima for bygningens brugere (Kim B. Wittchen, 2013).

Der anvendes vejrdata fra DRY 2013, som er en samling af vejrobservationer fra perioden 2001-2010, der er sammenfattet til et kalenderår. Disse data bruges til behandling og simulering af termisk komfort i bygninger i henhold til BR18 (2025). Baselinemodellen kalibreres til med reale vejrdata for lokationen.

4.7 IK-kompasset

IK-kompas er et vurderingsværktøj udviklet til at bedømme kvaliteten af indeklimaet i boliger. Værktøjet fokuserer på bygningens fysiske forhold, som udgør grundlaget for et sundt og komfortabelt indeklima – uden at inddrage beboernes daglige brugsmønstre. I første omgang er programmet målrettet etageboliger og kan anvendes både i forbindelse med nybyggeri og renoveringsprojekter. Derudover kan det benyttes til at vurdere forbedringer af indeklimaet efter en renovering, ved at sammenligne de eksisterende forhold med de nye.

IK-kompasset baserer sin metode delvist på tidligere standarder for frivillig klassificering af indeklima, herunder DS 3033 (Dansk Standard, 2011). Hvor DS 3033 tager udgangspunkt i det aktuelle indeklima i bygningen, fokuserer IK-kompasset på bygningens indeklimapotentiale og muligheder for forbedring.

IK-kompasset foretager vurderinger på boligniveau – det vil sige for enkelte boligheder i en ejendom. Vurderingen baseres på en digital 3D Sketchup-model af boligen, hvor forskellige inputdata om konstruktioner og tekniske løsninger tilføjes. På baggrund af disse oplysninger gennemføres en simulering af indeklimaet ved hjælp af en BSim-beregning.

IK-kompas afgrænser sig fra at vurdere forhold som skimmelvækst, radon samt tilstedeværelsen af skadelige stoffer som PCB, asbest m.m. i bygningen. Der tages heller ikke højde for eventuelle fugtskader.

IK-kompas vurderer indeklimaet ud fra fire hovedområder, hver med underliggende parametre: (Tine Steen Larsen, 2021).

- **Akustisk indeklima (AKU):** Støj fra omgivelserne, naboeligheder og egen bolig.
- **Atmosfærisk indeklima (ATM):** Påvirkning fra udeluft, byggematerialer og aktiviteter i boligen.
- **Termisk indeklima (TER):** Temperaturforhold om sommeren og vinteren samt træk.
- **Visuelt indeklima (VIS):** Dagslys, direkte sollys, udsyn, indkig og mulighed for afskærmning.

For hvert område vurderes desuden beboerens mulighed for at justere indeklimaet, da dette har stor betydning for oplevelsen af kvaliteten.

Tabel 11 giver et overblik over indholdet i IK-kompas hierarkiske struktur, som er opdelt i evalueringsområder, parametre og tilhørende kriterier (Tine Steen Larsen, 2021).

<i>Parameter</i>	<i>Kriterie</i>	<i>Vægtning</i>
AKU1	1.1 Trafikstøj Mulighed for åbning af vindue mod bygningens stille side	35%
AKU2	2.1 Luftlydisolation 2.2 Trinlyd	35%
AKU3	3.1 Tekniske installationer 3.2 Efterklangstid	25%
AKU4	4.1 Mulighed for åbning af vinduer	5%
ATM1	1.1 Kvalitet af udeluft (filtrering/partikelniveau)	15%
ATM2	2.1a Ventilationssystem/serviceaftaler 2.1b Naturlig ventilation 2.2 Ventilation af badeværelse 2.3 Lav-emitterende materialer	35%
ATM3	3.1 Tøjtøringsmuligheder 3.2 Emhætte i køkken 3.3 Komfur og ovn	30%
ATM4	4.1 Mulighed for øget ventilation, naturlig 4.2 Mulighed for øget ventilation, mekanisk 4.3 Mulighed for automatisk styring af ventilation	20%
TER1	1.1 Sommerkomfort Overfladetemperatur, sommer	30%
TER2	2.1 Varmekilder 2.2 Overfladetemperatur, vinter	25%
TER3	3.1 Utætheder 3.2 Kuldenedfald 3.3 Ventilation	20%
TER4	4.1 Mulighed for øget ventilation, naturlig 4.2 Mulighed for øget ventilation, mekanisk 4.3 Mulighed for automatisk styring af ventilation 4.4 Udvendig solafskærmning 4.5 Køling 4.6 Regulering af rumtemperatur ved opvarmningsbehov	25%
VIS1	1.1 Intensitet og fordeling 1.2 Kvalitet	35%
VIS2	2.1 Solskinstimer	25%
VIS3	3.1 Udsyn 3.2 Indkig 3.3 Bevægelig afskærmning	30%
VIS4	4.1 Solafskærmning, justeringsmuligheder 4.2 Solafskærmning, aktiveringsmuligheder	10%

Tabel 11 IK-kompas og IK-kompas' hierarkiske opbygning med evalueringsområder, parametre og kriterier. (Tine Steen Larsen, 2021)

IK-kompasset angiver indeklimaets kvalitet på en skala fra A til G, bogstavkarakteren, for Indeklimas kvalitet bestemmes ud fra den procentvis score, som fremgår af Tabel 11. Den samlede score for boligen beregnes som gennemsnittet af resultaterne for de fire evalueringsområder: AKU, ATM, TER og VIS. Der er dog en begrænsning i, hvor højt det samlede resultat kan være – det må nemlig ikke ligge mere end to niveauer over den laveste score blandt delområderne. For eksempel: Hvis boligen får karakteren F i VIS, men A i de tre andre områder, vil den samlede score maksimalt kunne blive D. Denne regel er indført for at sikre en helhedsorienteret vurdering af indeklimaet. (Tine Steen Larsen, 2021)

På Figur 20 ses en opdeling af bogstavscoren i procentdele.

IndeklimaKvalitet	Score (andel af maksimalt opnåelig score)
	$85\% \leq \text{score} \leq 100\%$
	$75\% \leq \text{score} < 85\%$
	$65\% \leq \text{score} < 75\%$
	$55\% \leq \text{score} < 65\%$
	$45\% \leq \text{score} < 55\%$
	$35\% \leq \text{score} < 45\%$
	$0\% \leq \text{score} < 35\%$

Figur 20 - Omregning fra procentvis score til Indeklimakvalitet (Tine Steen Larsen, 2021).

4.8 Dagslys 10%

For at sikre, at et opholdsrum har tilstrækkeligt dagslys, skal glasarealet udgøre mindst 10 % af gulvarealet. Glasarealet omfatter alle vinduer, der vender ud mod det fri. Hvis der er forhold, der reducerer dagslysadgangen til vinduerne, skal der anvendes korrektionsfaktorer for at tage højde for disse påvirkninger.

Summen af de korrigerede glasarealer skal fortsat udgøre mindst 10 % af gulvarealet i rummet. Beregningerne baseres på standardværdier, som kan opslås i tabellerne i BR18 (2025) *Vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen for dagslys* (Lumbye, 2019).

Beregning af Glasareal (A_G)

Glasarealet, A_G for et vindue defineres som åbningsarealet, hvor ramme-, karm- og sprossearealer ikke medregnes. Formlen for minimum glasareal er:

$$A_{G,min} = 0.1 \times A_{Gulv} (m^2)$$

- $A_{G,min}$: Minimumskrav til glasareal (m^2).
- A_{Gulv} : Netto gulvareal i rummet (m^2).

Korrektionsfaktorer

Forskellige forhold kan reducere dagslysindstrømningen. BR18 (2025) *Vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen for dagslys* (Lumbye, 2019) beskriver de mest almindelige korrektionsfaktorer, som inkluderer:

Vinduesegenskaber

- F_{LT} : Rudens lystransmittans.
- $F_{VÆG}$: Vinduesvæggens tykkelse.

Eksterne Skygger

- F_{OMG} : Skygger fra omgivelserne.
- F_{OH} : Skygger fra udhæng over vinduet.
- F_{SF} : Skygger fra fremspring ved siden af vinduet.
- F_{AFS} : Skygger fra faste solafskærmninger.

Interne Forhold

- F_{ATR} : Korrektion for glas i vinduer mod et atrium.
- F_{RUM} : Korrektion for stor rumdybde.
- F_{FL} : Korrektion for vinduer i flere flader.
- F_{OVLYS} : Korrektionsfaktor for glas i ovenlys.

De relevante korrektionsfaktorer beregnes ved at multiplicere det faktiske glasareal med de respektive faktorer. Hvis præcise værdier ikke er tilgængelige, kan der skønnes ud fra vejledningens tabeller i (Lumbye, 2019).

For visse forhold, der begrænser dagslysadgangen, er korrektionsfaktoren fastsat til minimum 0,5, selvom dagslyset i praksis kan reduceres yderligere. Dette er valgt, fordi den faktiske reduktion sjældent opleves så markant.

Når flere skyggeeffekter overlapper, justeres kun for den del, der ikke overlapper, eksempelvis ved kombinationen af vægtykkelse og vinduesfremspring. Den samlede skyggekorrektion er en tilnærmelse, og i

tilfælde af betydeligt overlap bør der foretages en konkret vurdering eller lysberegning for at sikre et realistisk resultat.

Beregning af Korrigeret Glasareal

Det korrigerede glasareal for hvert vindue beregnes som:

$$A_{Gkor,i} = F_{TL} \cdot F_{væg} \cdot F_{OMG} \cdot F_{OH} \cdot F_{SF} \cdot F_{AFS} \cdot F_{ATR} \cdot F_{RUM} \cdot F_{FL} \cdot F_{OVLYS} \cdot A_{Gvin,i}$$

- **A_{Gkor,i}**: Det aktuelle glasareal for vinduet, korrigeret med alle faktorerne for de skyggende forhold.
- **A_{Gvin,i}**: Faktisk glasareal i vinduet (m²).
- **F_{G,kor,i}**: Resultat af de relevante korrektionsfaktorer for vinduet.

Det totale glasareal, der skal medregnes, udgør summen af alle reelle glasarealer, justeret med faktorer for de specifikke skyggeforhold.

$$A_{Gkor,total} = \sum_{i=1}^n A_{Gkor,i}$$

Samlet vurdering:

For at dagslyset vurderes som tilstrækkeligt, skal summen af de korrigerede glasarealer være lig med eller mere end 10 % af gulvarealet for rummet.

$$\sum_{i=1}^n A_{Gkor,i} \geq A_{G,min}$$

4.9 Brug af dataloggere

For at kortlægge de eksisterende indeklimaforhold i bygningen er der anvendt dataloggere i både beboelseslejligheder og et kontorlokale. Loggerne har løbende registreret temperatur, relativ luftfugtighed og luftkvalitet over en længere periode, hvilket giver et billede af bygningens nuværende tilstand. De indsamlede data anvendes til at opstille en baseline, der danner grundlag for vurderingen af, hvordan forskellige energirenoveringstiltag vil påvirke indeklimaet.

Kalibrering og opsætning

For at sikre pålidelige målinger blev alle dataloggere kalibreret inden brug. Kalibreringen blev udført ved en simpel metode, hvor alle loggere blev placeret i samme klima, hvorefter deres målinger blev sammenlignet. Da alle enheder registrerede ens værdier +/- mindre afvigelser, kunne de anvendes uden yderligere justeringer. Loggerne blev derefter placeret strategisk rundt omkring i rummene for at sikre repræsentative målinger af beboernes daglige indeklima. Målingerne bruges blandt andet til at beregne den aktuelle fugtbelastningsklasse og sikre, at baseline-modellerne i simuleringerne afspejler de reelle forhold i bygningen.

Analoge vs. digitale dataloggere

Der er anvendt både analoge og digitale dataloggere i projektet. De analoge loggere, der registrerer temperatur og relativ luftfugtighed, har vist sig særligt pålidelige, da de fungerer uafhængigt af strømforsyning. De digitale dataloggere har målt CO₂ og TVOC (Total Volatile Organic Compounds), men har været forbundet med udfordringer, da de kræver konstant strøm. Flere beboere har periodevis slukket for stikkontakterne, hvilket har resulteret i periode med manglende data. I denne case har de analoge dataloggere derfor været mere pålidelige, især til langvarige målinger.

Ved at kombinere datalogning med simuleringer opnås en datadrevet tilgang, der sikrer, at de foreslåede energirenoveringstiltag både forbedrer bygningens energieffektivitet og understøtter et sundt indeklima for beboerne.

4.10 Faktormetoden

I denne rapport anvendes faktormetoden til at vurdere, hvilke bygningsdele der har behov for renovering, og hvor længe de resterende komponenter kan forventes at holde. Vurderingen danner grundlag for beslutninger om, hvilke energirenoveringstiltag der skal prioriteres, hvordan LCC- og LCA-beregningerne skal opsættes og hvordan disse kan påvirke bygningens langsigtede holdbarhed.

Faktormetoden bygger på en visuel vurdering af bygningsdelenes nuværende tilstand, hvor de tildeles en score fra 1 til 10, se Tabel 12. En lav score indikerer, at bygningsdelen er i dårlig stand og har behov for akut vedligeholdelse eller udskiftning, mens en høj score betyder, at den er i god stand og kun kræver forebyggende vedligeholdelse (Michalik, et al., 2024). Alle bygningsdele får tilknyttet et bygningsdelsnummer iht. BIM7AA, som går igen igennem hele rapporten.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dårlig tilstand			Middel tilstand				God tilstand		

Tabel 12 - Tabel til vurdering af bygningsdelenes tilstand (Michalik, et al., 2024).

Den estimerede restlevetid (ESL) for en bygningsdel beregnes ved at tage udgangspunkt i dens referencelevetid (RSL) og justere den ud fra en række faktorer, herunder materialekvalitet, udførelse, påvirkninger fra det indendørs og udendørs miljø samt vedligeholdelsesniveau. Formelen for beregningen ser således ud:

$$ESL = RSL \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G$$

Hvor:

- A: Repræsenterer materialekvaliteten, herunder valg af materialer og deres modstandsdygtighed over tid.
- B: Omfatter design og konstruktionsprincipper, der kan påvirke levetiden.
- C: Afspejler kvaliteten af det håndværk, der er anvendt ved opførelsen.
- D og E: Dækker henholdsvis indendørs og udendørs miljøpåvirkninger, såsom fugtniveau, temperaturudsving og forurening.
- F: Tager højde for brugsforhold, herunder mekaniske belastninger og slid.
- G: Handler om vedligeholdelsesniveau og frekvens.

Bygningsdelenes RSL bestemmes ud fra BUILD-levetidstabel, version 2021, fra Aalborg Universitet:

<https://vbn.aau.dk/da/publications/build-levetidstabel-version-2021>

Tabel 13 viser de vejledende faktorer, som multipleres med RSL afhængig af tilstanden af bygningsdelen. Nederst i tabellen er vist et eksempel med en bygningsdel, som har en vurderet RSL på 50 år og hvordan tilstanden påvirker bygningsdelens ESL.

Enheder	Visuelt vurderes tilstand af bygningsdele efter karakterskalaen i Tabel 12									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0,85	0,90	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00	1,05
B	0,80	0,85	0,85	0,90	0,90	0,95	0,95	1,00	1,00	1,05
C	0,85	0,90	0,95	0,95	1,00	1,00	1,05	1,05	1,05	1,10
D	0,90	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00
E	0,85	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00
F	0,90	0,90	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,95
G	0,85	0,85	0,90	0,90	0,95	0,95	1,00	1,05	1,05	1,05
Nøgletal	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
50 år	16,7	21,3	25,2	31,3	36,7	38,7	42,8	49,8	52,4	60,5

Tabel 13 - Metode til at fastlægge restlevetiden efter faktormetoden (Michalik, et al., 2024).

5 Resultater

5.1 Tilstandsvurdering

Tilstandsvurderingen er baseret på en visuel besigtigelse, 3D-opmålingen og gængs viden om materialer og bygningsdele. Der er ikke foretaget nogle destruktive indgreb.

Nedenfor er en beskrivelse af de væsentligste punkter fra tilstandsregistreringen, som har indflydelse på energirenoveringen.

Bygning A (1952)

Bygning A fremstår generelt i middel til god stand. Fundamentet har mindre revner, men forventes fortsat at have en betydelig restlevetid. Terrændækket er generelt velholdt, men der er registreret forhøjede fugtniveauer i betonen, hvilket kan påvirke materialernes langsigtede holdbarhed. Ydervæggene har flere steder kalkudfældninger, og der er observeret lokal opfugtning i hjørner, hvilket på sigt kan medføre fugtproblemer. Tagkonstruktionen er i god stand, men visse inddækninger bør efterses for begyndende slitage, der potentielt kan føre til utætheder. Etageadskillelserne er i god stand, men skimmelvækst i gummifuger i baderum tyder på utilstrækkelig ventilation eller manglende tørring efter brug.

Bygning B og C (1977)

Bygning B og C vurderes at være i middel til god stand. Fundamenterne har flere synlige revner og afskalninger i sokkelpudsen. Terrændækket er generelt velholdt, men kælderens gulv bærer præg af manglende vedligeholdelse, dog uden konstaterede strukturelle svagheder. Ydervæggene fremstår uden tegn på væsentlige skader eller fugtpåvirkning. Tagkonstruktionen er i god stand, men inddækninger bør inspiceres for tegn på slitage. Etageadskillelserne er i god stand, men som i Bygning A er der registreret skimmelvækst i gummifuger i baderum.

Bygning D (2005)

Bygning D vurderes at være i god stand. Fundamentet har enkelte afskalninger af sokkelpudsen, men dette vurderes ikke at udgøre en kritisk problematik. Terrændækket fremstår pænt, dog med mindre ridser i linoleumsoverfladen. Ydervæggene fremstår uden tegn på væsentlige skader eller fugtpåvirkning, mens tagkonstruktionen er i god stand, dog med enkelte slidte rygninger, som bør inspiceres for tegn på slitage. Etageadskillelserne er i god stand, men som i de øvrige bygninger er der registreret skimmelvækst i gummifuger i baderum.

Bygningerne generelt

Vinduer- og døre er generelt i god stand uden nogen synlige problematikker. Det samme gør sig gældende for de tekniske installationer, som alle blev udskiftet ifm. moderniseringen i 2005. De tekniske installationer er dateret til år 2007, hvor moderniseringen formegentlig var afsluttet. På trods af, at mange af materialerne og de tekniske installationer er i god stand, er en del ved at nå afslutningen på den tekniske levetid, hvorfor dette skal tages med i betragtning under energioptimeringsforslagene.

Forbehold vedrørende levetid af dampspærresystemet og bølgeplader

Ifølge (Rasmussen, et al., 2020) viser undersøgelser af dampspærresystemer, at tapen på dampspærresamlingerne kan begynde at slippe allerede efter ca. 15 år. Dette kan betyde, at dampspærresystemets reelle levetid allerede er udløbet, afhængigt af de faktiske forhold.

Bølgeplader fra starten af 2000'erne har ifølge vores egne erfaringer ofte en reel levetid på omkring 20 år, før de begynder at udvikle skader. Dette er væsentligt lavere end de 40 år, som levetidstabellerne angiver. Derfor er det sandsynligt, at de eksisterende bølgeplader allerede nærmer sig slutningen af deres levetid.

Tabel 14 giver et overblik over tilstanden på de forskellige bygningsdele, der udgør klimaskærmen. Bygningen består af mange forskellige typer bygningsdele, og for at gøre tilstandsvurderingen mere simpel og overskuelig er flere bygningsdele inden for samme hovedkategori slået sammen.

Den fulde registrering og opbygning af alle bygningsdele, der indgår i klimaskærmen eller har betydning for de indeklimatiske forhold, findes i *Bilag 2 – Registrering af bygningsdele*.

Hovedkategori	Tilstandsvurdering og restlevetid på bygning A
Fundamenter	
121001 (Eksisterende fundament og kældervæg)	Tilstand: (8) $(120 - (2025 - 1955)) * 1,0 = 50$ år.
121002, 121003, 121004 (Nye fundamenter)	Tilstand: (9) $(120 - (2025 - 2005)) * 1,1 = 110$ år.
Terrændæk	
131001 (Eksisterende terrændæk)	Tilstand: (7) $(120 - (2025 - 1955)) * 0,9 = 45$ år.
131002 (Nyt terrændæk)	Tilstand: (8) $(120 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 100$ år.
Ydervægge	
213001 (Ny kælderydervæg under let facade og installationskanal)	Tilstand: (7) Murværk: $(120 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 90$ år. Fuger: $(80 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 54$ år.
213002 (Eksisterende facade)	Tilstand: (8) Murværk: $(120 - (2025 - 1955)) * 1,0 = 50$ år. Fuger: $(80 - (2025 - 1955)) * 0,9 = 9$ år.
214001 (Ny let facade)	Tilstand: (9) Rockvitplader: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,1 = 44$ år. Vindspærre: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,1 = 44$ år. Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Isolering: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,1 = 22$ år. Gips: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år.
214002, 214003 (Skunkvægge)	Tilstand: (10) Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Isolering: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Gips: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år.
Tage	
271001, 271002, 351001 (Tegltage inkl. loftopbygning under spidsloft)	Tilstand: (9) Tagsten: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 48$ år. Undertag: $(30 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 10$ år (Lavere faktor grundet inddækninger). Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 1955)) * 1,0 = 50$ år ((Lavere faktor grundet manglende historik omkring taget). Isolering: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Gips: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 48$ år.
271003 (Tag på den store kvist)	Tilstand: (8) Bølgeplader: $(30 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 20$ år. Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 1977)) * 1,0 = 72$ år. Isolering: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Gips: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 48$ år.

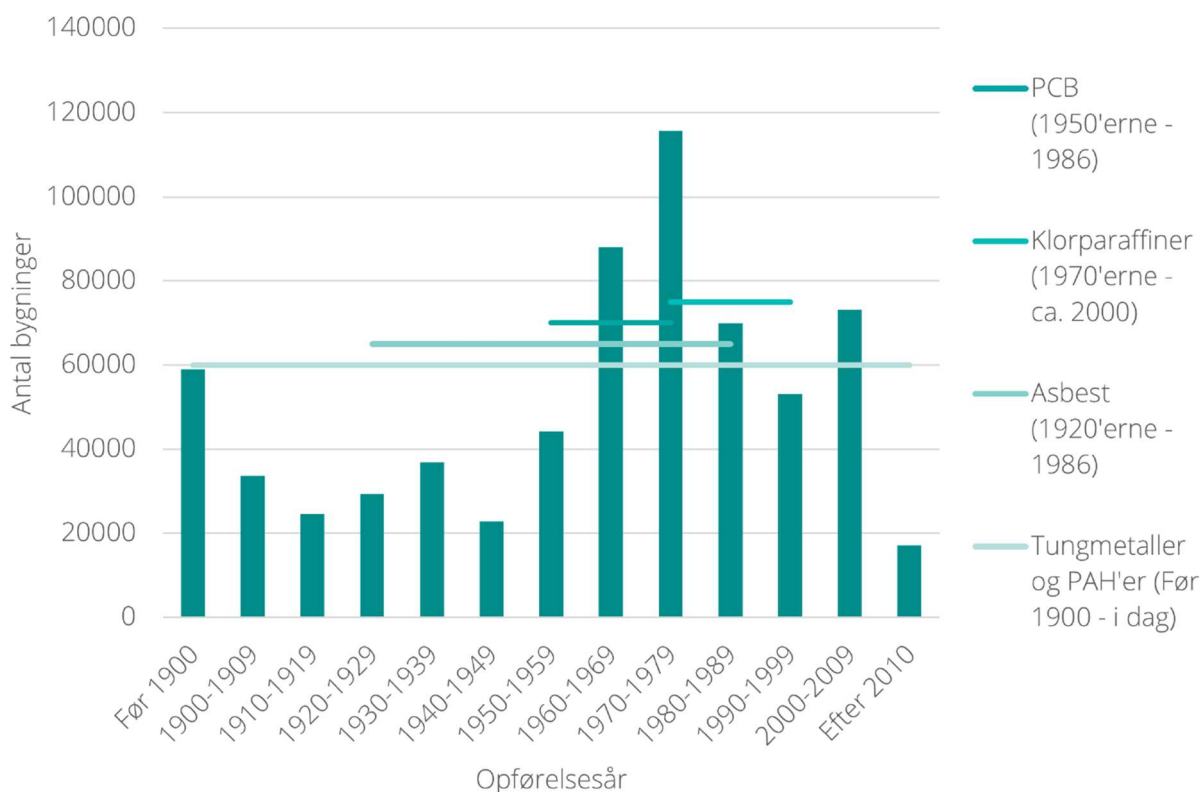
271004 (tag på sammenbygning)	Tilstand: (8) Tagpap: (40-(2025-2005))*1,0= 20 år. Konstruktionstræ: (120-(2025-1977))*1,0= 72 år. Isolering: (50-(2025-2005))*1,2= 36 år. Dampspærre: (40-(2025-2005))*1,2= 24 år. Gips: (60-(2025-2005))*1,2= 48 år.
Etageadskillelser	
334001, 334002, 334003, 334004 (Dæk over kælder)	Tilstand: (8) Gulvklinter: (100-(2025-2005))*0,9= 72 år. Beton: (120-(2025-2005))*1,2= 120 år. Polystyren Mineraluld: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år. Linoleum: (40-(2025-2005))*0,9= 18 år. Gulvspånplader: (80-(2025-2005))*1= 60 år. Gulvstrøer: (120-(2025-2005))*1,2= 120 år. PE-folie: (40-(2025-2005))*1,2= 24 år. Eksisterende betondæk: (120-(2025-1955))*1,2= 60 år.
334009 (Skunkgulv)	Tilstand: (9) PE-folie: (40-(2025-2005))*1,2= 24 år. Mineraluld: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år.
Hovedkategori	Tilstandsvurdering og restlevetid på bygning B og C
Fundamenter	
121004 (Eksisterende fundament)	Tilstand: (5) (120-(2025-1977))*0,7= 50 år.
121005, 121006 (Nye fundamenter)	Tilstand: (6) (120-(2025-1977))*0,8= 58 år. (Nye lecablokke opsat på eksist. Fundament)
Terrændæk	
131003 (Eksisterende Terrændæk i kælder)	Tilstand: (6). (120-(2025-1977))*0,8= 58 år.
131004 (Terrændæk i trapperum)	Tilstand: (8) Gulvklinter: (100-(2025-2005))*0,9= 72 år. Beton: (120-(2025-2005))*1,2= 120 år. Polystyren: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år.
Ydervægge	
213004 (Eksisterende halvstensvæg)	Tilstand: (8) Murværk: (120-(2025-1977))*1,0= 72 år. Fuger: (80-(2025-1977))*1,0= 32 år.
213006, 213007 (Ny letvæg på eksisterende bagvæg)	Tilstand: (9) Rockvitplader: (60-(2025-2005))*1,1= 44 år. Vindspærre: (60-(2025-2005))*1,1= 44 år Konstruktionstræ: (120-(2025-2005))*1,2= 120 år. Isolering: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år. Porebeton: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år
214004, 214005,	Tilstand: (9) Rockvitplader: (60-(2025-2005))*1,1= 44 år. Vindspærre: (60-(2025-2005))*1,1= 44 år Konstruktionstræ: (120-(2025-2005))*1,2= 120 år. Isolering: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år. Dampspærre: (40-(2025-2005))*1,1= 22 år. Gips: (50-(2025-2005))*1,2= 36 år.
215001, 215002, 215003 (Gardinkasse)	Tilstand: (9) Limtræsdrager(120-(2025-2005))*1,2= 120 år. Isolering: (80-(2025-2005))*1,2= 72 år. Gips: (50-(2025-2005))*1,2= 36 år.

Tage	
271005, 271006, 271007 (Bølgeplader)	Tilstand: (8) Bølgeplader: $(30 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 20$ år. Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 1977)) * 1,0 = 72$ år. Isolering: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Gips: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 48$ år.
Etageadskillelser	
334016, 334017, 334018, 334019, 334020	Tilstand: (8) Gulvklinter: $(100 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 72$ år. Beton: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Polystyren: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år. Linoleum: $(40 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 18$ år. Gulvplank: $(80 - (2025 - 2005)) * 1 = 60$ år. Stålfiler: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Polyethylenfolie: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Eksisterende betondæk: $(120 - (2025 - 1997)) * 1,2 = 86$ år.
Hovedkategori	Tilstandsvurdering og restlevetid på bygning D
Fundamenter	
121007, 121008 (Nye fundamenter)	Tilstand: (7) $(120 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 90$ år.
Terrændæk	
131005, 131006, 131007 (Nye terrændæk)	Tilstand: (8) Gulvklinter: $(100 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 72$ år. Beton: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Polystyren Mineraluld: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år. Linoleum: $(40 - (2025 - 2005)) * 0,9 = 18$ år. Gulvspånplader: $(80 - (2025 - 2005)) * 1 = 60$ år. Gulvstrøer: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 120$ år. Polyethylenfolie: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år.
Ydervægge	
213005 (Ny tung ydervæg)	Tilstand: (8) Murværk: $(120 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 100$ år. Fuger: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 60$ år. Isolering: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år. Porebeton: $(80 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 72$ år.
Tage	
271008, 271009 (Bølgeplader)	Tilstand: (8) Bølgeplader: $(30 - (2025 - 2005)) * 1,0 = 20$ år. Konstruktionstræ: $(120 - (2025 - 1977)) * 1,0 = 72$ år. Isolering: $(50 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 36$ år. Dampspærre: $(40 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 24$ år. Gips: $(60 - (2025 - 2005)) * 1,2 = 48$ år.
Generelt for begge bygninger	
312001, (Vinduer og døre)	Tilstand: (9) $(40 - (2025 - 2005)) * 1,1 = 22$ år
531001, 531002, 561001, 561002, 563001 (Gasfyr, varmtvandsbeholder, cirkulationspumpe samt vand- og varmeledninger)	Tilstand: (8) Gasfyr og varmtvandsbeholder: $(30 - (2025 - 2007)) * 1,0 = 12$ år. Cirkulationspumpe: $(30 - (2025 - 2007)) * 1,0 = 12$ år. Vand og varmeledninger: $(60 - (2025 - 2007)) * 1,2 = 50$ år.

Tabel 14 - Tilstandsvurdering af bygningsdele, som indgår i klimaskærmen, samt relevante tekniske installationer.

5.1.1.1 Skadelige stoffer

Bygning A, B og C er opført i en periode (1952-1977), hvor det var almindeligt at anvende byggematerialer indeholdende stoffer, der i dag betragtes som skadelige. Ifølge (Teknologisk institut, VCOB og Realdania, 2021 Juni) blev der særligt i perioden 1950-1980 anvendt skadelige stoffer som PCB, asbest, tungmetaller og PAH'er i byggeriet. Dette fremgår af Figur 21, som viser, hvordan disse stoffer blev anvendt i forskellige byggeperioder.



Figur 21 - Overblik over tidsperioden for brug af forskellige skadelige stoffer (Teknologisk institut, VCOB og Realdania, 2021 Juni).

Bygningerne gennemgik en modernisering i 2005, hvilket sandsynligvis har omfattet fjernelse af nogle af disse skadelige stoffer. Det er dog mulighed for, at rester af skadelige stoffer kan forekomme i eksisterende bygninger, selv efter renovering. Særligt asbest, som ofte findes i isoleringsmaterialer, eternitplader og isolering omkring tekniske installationer, kan være til stede i lukkede konstruktioner eller svært tilgængelige områder, f.eks. i loftrummet. Asbestfibre kan frigives ved mekanisk påvirkning af materialer, hvorfor der skal udvises forsigtighed ved energirenoveringen.

Selvom energirenoveringen ikke direkte involverer fjernelse af skadelige stoffer, er det vigtigt at tage højde for potentielle forureninger i forbindelse med arbejdet. En grundig screening af bygningerne for rester af skadelige stoffer bør derfor iværksættes, før energirenoveringen påbegyndes.

Da de skadelige stoffer ikke direkte påvirker effekten af energirenoveringstiltagene, men kan udgøre en risiko under selve udførelsen, fokuseres der ikke yderligere på dette emne i rapporten.

5.2 Nuværende energiforbrug

I Tabel 15 ses det registrerede energiforbrug for bygningen i 2024, fordelt på månedlig basis for gas, vand og el. Tallene giver et konkret billede af bygningens reelle energiforbrug i drift, hvilket er relevant i forhold til både kalibrering af det beregnede energibehov, så det eksisterende energiforbrug kan beregnes, samt planlægning af renoveringstiltag.

Det ses, at gasforbruget følger en tydelig sæsonvariation med højeste forbrug i vintermånederne (januar, november og december). Gasforbruget toppe i december med over 42.000 kWh og falder markant i sommerperioden, hvor det i maj og juni ligger på under 7.000 kWh.

Elforbruget er relativt stabilt året igennem og varierer kun i mindre grad, hvilket tyder på, at størstedelen af elforbruget relaterer sig til bygningsdrift, belysning og eventuelle tekniske installationer. Der er dog en let stigning i vintermånederne, hvilket kan hænge sammen med længere perioder med kunstigt lys og øget brug af elektriske apparater.

Vandforbruget ligger generelt jævnt hen over året, der ses dog en mindre stigning i sommermånederne samt i februar måned.

Måned (2024)	Gas (kWh)	Vand (m ³)	EL (kWh)
Januar	39.979,61	91,03	3.843,87
Februar	30.526,80	114,31	3.724,94
Marts	21.235,17	96,59	3.851,54
April	11.902,39	91,22	3.588,26
Maj	6.234,80	105,10	3.574,63
Juni	6.839,80	105,12	3.463,62
Juli	8.445,80	106,58	3.308,16
August	23.534,06	89,82	3.528,96
September	23.984,42	90,29	3.596,89
Oktober	34.711,89	93,11	3.765,18
November	41.237,79	79,92	3.732,53
December	42.412,86	96,17	4.120,77
Sum	292.043,26	1.159,25	48.057,57
Forbrug pr. m ² opvarmet etageareal	134,03	0,53	22,05

Tabel 15 - Oversigt over det eksisterende forbrug i bygning.

5.3 Registreret indeklima (Aflæsning af loggere)

I forlængelse af kap. 3.2 *Fugt- og varmeteori*, hvor der blev redegjort for betydningen af at definere den aktuelle fugtbelastningsklasse for bygningen, er der logget data fra udvalgte rum i perioden 14. januar 2025 – 18. februar 2025 ved hjælp af de loggere, der er omtalt i kap. 4.9 *Brug af dataloggere*. En oversigt over placeringen af loggerne fremgår af *Bilag 3 – Placering af loggere*.

Tabel 16 giver et samlet overblik over middelværdierne for temperatur, relativ luftfugtighed, CO₂ og TVOC i de udvalgte rum. De analoge loggere (firecifrede koder) registrerede temperatur og relativ luftfugtighed, mens de digitale loggere (tre- eller tocifrede koder) registrerede CO₂- og TVOC-niveauer.

Alle målinger – inklusiv de højeste og laveste registrerede værdier – er gennemgået og sammenholdt med de niveauer, der normalt anvendes som reference for et tilfredsstillende indeklima iht. (Mette Havgaard Vorre, 2017). På baggrund af denne faglige vurdering vurderes variationerne at være så små, at middelværdierne i tabellen giver et retvisende billede af forholdene i de enkelte rum. Eventuelle kortvarige afvigelser omtales særskilt senere i kapitlet, mens det fulde datamateriale findes i *Bilag 4 - Data og beregninger fra loggere*

Loggerkode	Placering	Temperatur	Relativ luftfugtighed	CO2-niveau	TVOC-niveau
-	-	°C	%	PPM	PPB
5275	Byg. A_Stueplan	23,15	36,25	-----	-----
116	Byg. A_Stueplan	-----	-----	616	118
5204	Byg. A_1.sal	24,11	31,45	-----	-----
5521	Byg. B_Stueplan	22,24	33,31%	-----	-----
7	Byg. B_Stueplan	-----	-----	576	-----
5293	Byg. B_1. sal	22,43	31,93%	-----	-----
3	Byg. B_1. sal	-----	-----	553	65
5354	Byg. B_1. sal	22,57	29,75%	-----	-----
5247	Byg. B_Kontor	22,63	28,15%	-----	-----
5036	Udendørslogger	4,74	74,22%	-----	-----
5364	Udendørslogger	4,64	76,18%	-----	-----

Tabel 16 - Oversigt over loggerresultater.

Ud fra Tabel 16 er der umiddelbart ingen indikationer på indeklimatiske problematikker. Den mest kritiske bolig, baseret på relativ luftfugtighed, CO₂- og TVOC-niveauer, er boligen i Byg. A_Stueplan, som i resten af rapporten benævnes *bolig A.0.1* hvor loggerne 5275 og 116 var placeret.

Vurdering af TVOC-niveau

Ifølge (Erik Bjørn, 2021) skal TVOC-niveauet ligge på:

- 0-65 PPB, hvis niveauet skal betragtes som "rigtig godt".
- 65-220 PPB, hvis niveauet skal betragtes som "godt".
- 220-660 PPB, hvis niveauet skal betragtes som "nogenlunde".
- 660-2200 PPB, hvis niveauet skal betragtes som "dårligt".
- Over 2200 PPB, hvis niveauet skal betragtes som "advarsel".

Set over den samlede periode har boligen ikke væsentlige problemer med TVOC, baseret på gennemsnitsværdierne.

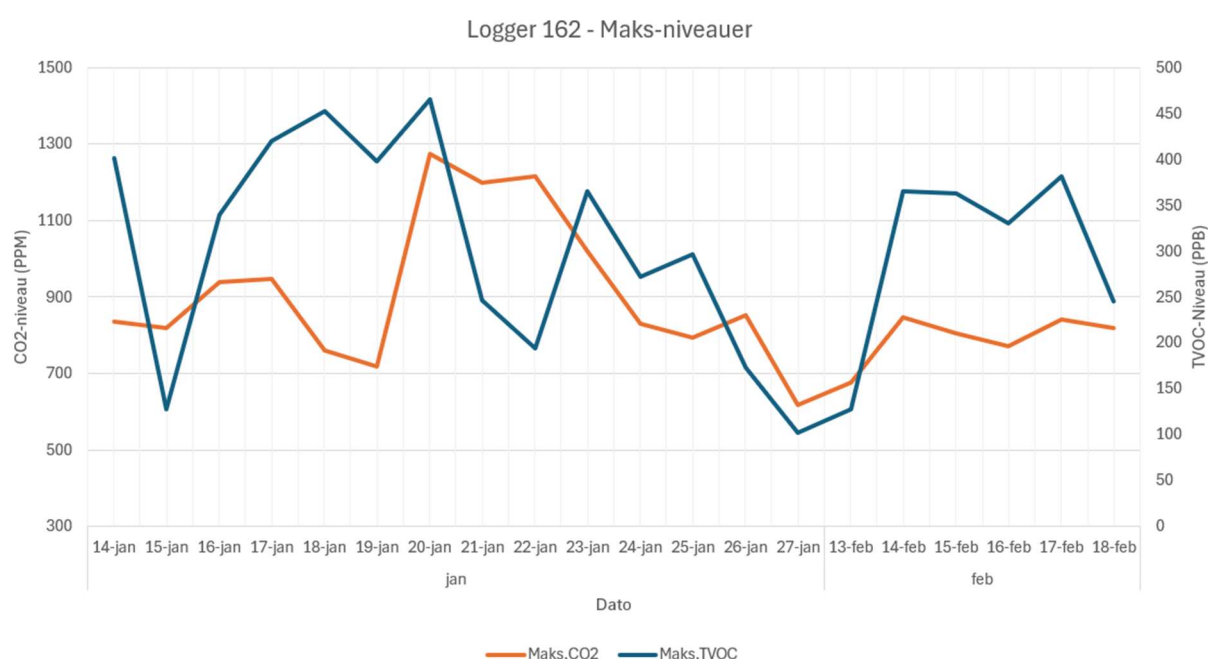
Figur 22 illustrerer de maksimale målinger for CO₂- og TVOC-niveauer i boligen. Det fremgår, at TVOC-niveauet når et maks-niveau på 465 PPB i perioder med de højeste registrerede målinger, hvilket svarer til en "nogenlunde" vurdering.

Vurdering af CO₂-niveauer

Tilsvarende er CO₂-niveauerne vurderet i henhold til (Erik Bjørn, 2021):

- 400-900 PPM, hvis niveauet skal betragtes som "Rigtig godt"
- 900-1200 PPM, hvis niveauet skal betragtes som "Godt"
- 1200-2000 PPM, hvis niveauet skal betragtes som "Nogenlunde"
- 2000-5000 PPM, hvis niveauet skal betragtes som "Dårligt"
- Over 5000 PPM, hvis niveauet skal betragtes som "Advarsel"

Set over gennemsnittet har boligen ingen problemer med CO₂-niveauet, men Figur 22 viser, at maksimummet når 1274 PPM, hvilket placerer indeklimaet i kategorien "nogenlunde".



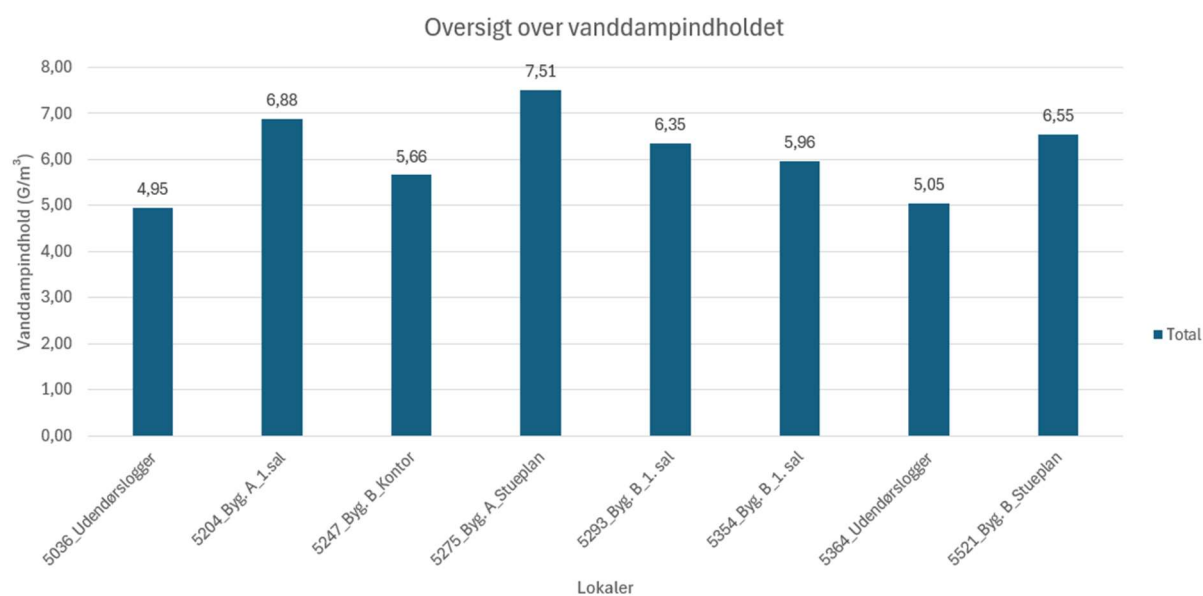
Figur 22 - Oversigt over timeværdier for CO₂-og TVOC-niveau for logger162.

Fugt vurdering

Med udgangspunkt i den relative luftfugtighed og temperaturen er damptrykket beregnet i hver af boligerne for at verificere, at bolig A.0.1 er den mest belastede i forhold til fugtbelastningsklassen. For overskuelighedens skyld er damptrykket omregnet til vanddampindholdet i luften, hvilket fremgår af Figur 23 hvor en samlet oversigt over vanddampindholdet for alle analoge loggere præsenteres. Beregningerne af damptrykket og konverteringen til vanddampindhold kan findes i *Bilag 4 - Data og beregninger fra loggere*.

Resultaterne i Figur 23 bekræfter, at bolig A.0.1 er den mest belastede med hensyn til fugt. Boligen i bygning B, 1. sal, som i resten af rapporten benævnes *Bolig B1.1*, har dog registreret en maksimal relativ luftfugtighed på 71 % ved en temperatur på 22,5 °C, hvilket svarer til et dugpunkt på 17 °C. Dette er markant højere end gennemsnittet for bolig A.0.1, der ligger på 7,32 °C. Dog fastholdes bolig A.0.1, som den mest fugtbelastede bolig, da data fra logger 5521 i Bolig B1.1, viser, at den høje relative luftfugtighed kun var til stede i en kort periode (under en time), hvilket sandsynligvis skyldes badning og efterfølgende udluftning.

Af Figur 23 fremgår det, at vandindholdet i indeluften for Bolig A.0.1 er 7,51 g/m³. Ifølge kap. 3.2 *Fugt- og varmeteor*i findes fugttilskuddet ved at fratrække damptrykket inde med damptrykket ude. Figur 23 viser, at de to udendørsloggere måler et vandindhold i udeluften på henholdsvis 4,95 g/m³ og 5,05 g/m³.

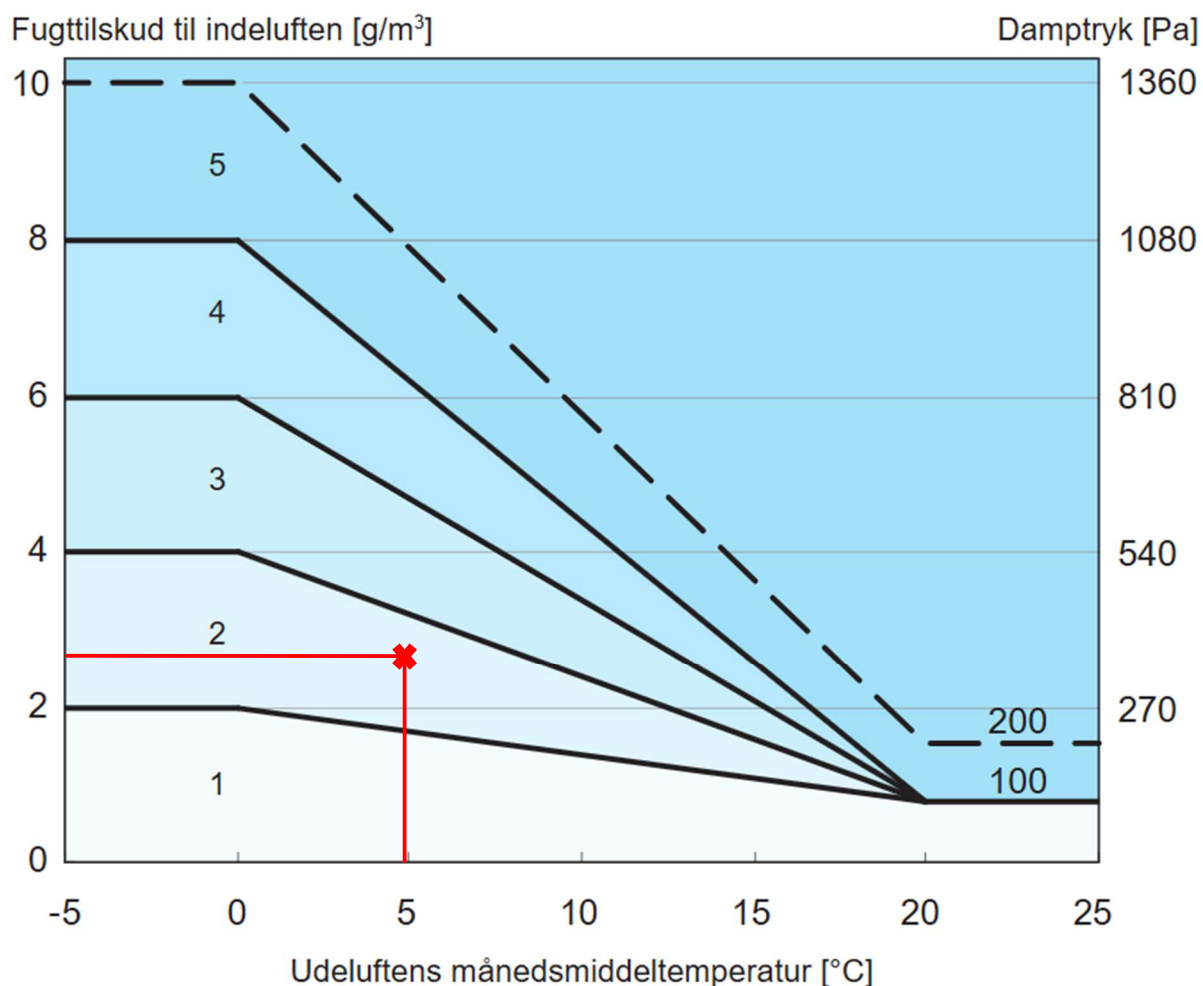


Figur 23 - Oversigt over vanddampindholdet

Fugttilskuddet beregnes som:

$$G = 7,51 - \frac{4,95 + 5,05}{2} = 2,51 \text{ g/m}^3$$

På baggrund af fugttilskuddet og udeluftens månedsmiddeltemperatur, kan fugtbelastningsklassen fastlægges til at være 2. En illustration af dette fremgår af Figur 24.



Figur 24 - Fastlæggelse af fugtbelastningsklasse på baggrund af fugttilskud til indeluften (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023)

Fugtbelastningsklassen er i overensstemmelse med teorien præsenteret i kap. 3.2 *Fugt- og varmeteorier*. Dog kan ændrede brugsmønstre hos beboerne hurtigt påvirke fugtbelastningsklassen, ligesom nytilflyttede beboere kan have et anderledes adfærdsmønster end de nuværende.

Derudover skal det bemærkes, at der alene er samlet data fra fire boliger, hvilket betyder, at det ikke kan udelukkes, at indeklimaet varierer i de øvrige boliger. Netop af denne grund påpeger (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023), at boliger med ukendt beboersammensætning bør placeres i fugtbelastningsklasse 3.

5.4 Teknisk analyse

5.4.1 Termografering og fugtmålinger

Ved gennemgangen af bygningen blev der foretaget termografifotografering samt kapacitive fugtmålinger for at vurdere omfanget af kuldebroer og fugtproblematikker. Undersøgelsen omfattede flere rum end dem, hvor der var placeret indeklimamålere, hvilket har resulteret i et mere omfattende datagrundlag til vurdering af potentielle kuldebroer og fugtproblemer.

Udendørsforholdene på registreringsdagen var følgende:

- Temperatur -0,5 – 0,5 °C.
- Relativ luftfugtighed: 63 – 70%.
- Dugpunkttemperatur: -7,1 – -4,3 °C.
- Middel vindhastighed: 2,6 – 3,6 m/s.
- Vindretning: 284 – 293 ° (Vest - nordvest).
- Vejrlig: Solrigt.

Temperaturmæssigt var forholdene gode, da linjetabene indvendigt fremstår tydeligere jo større temperaturforskellen mellem inde og ude er. Udvendig termografering under solrige forhold medfører dog visse udfordringer:

- Solens stråler absorberes af klimaskærmen og hæver overfladetemperaturen, så billedet ikke afspejler den reelle udetemperatur.
- Glas, metal og blanke overflader reflekterer solstråling og kan dermed forvride målingen af overfladetemperaturen.
- Langvarig solpåvirkning ændrer temperaturforskellen mellem ude og inde over tid og kan derfor skjule de egentlige kuldebroer (Gælder også for indvendig termografering).

Generelle observationer

Generelt ses store kuldebroer i bygningerne. De mest markante kuldebroer optræder ved udvendige hjørnesamlinger, samlinger mellem væg og etagedæk samt omkring gennemgående bjælker. Disse områder er særligt udsatte for varmetab, hvilket kan medføre en forhøjet risiko for kondens og efterfølgende fugtproblematikker.

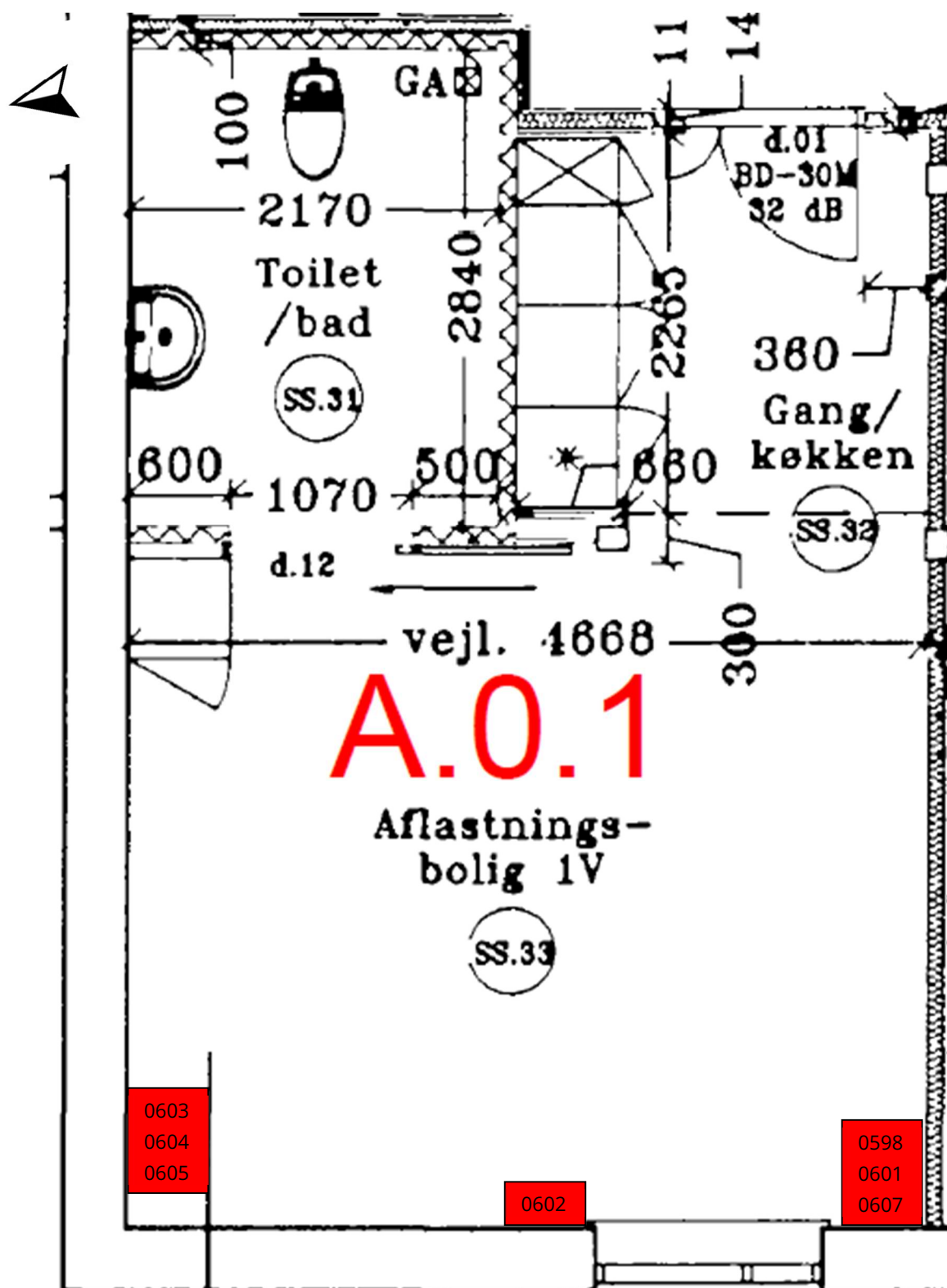
Ved måling af de indvendige overfladetemperaturer er der flere steder registreret temperaturer under 13 °C, som er den kritiske overfladetemperatur for fugtbelastningsklasse 2. For at verificere eventuelle fugtproblemer, er der foretaget kapacitive fugtmålinger på flere af de kritiske områder. Flere af disse målinger har indikeret forhøjede fugtniveauer jf. Tabel 17 og Tabel 19.

På grund af det store antal registrerede kuldebroer er kun et udvalg af de mest markante medtaget i denne rapport. En komplet oversigt over de identificerede kuldebroer kan findes i *Bilag 5 – Billeder fra termografering*.

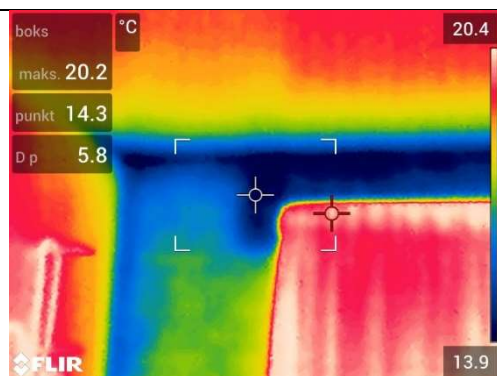
På baggrund af analysen i kap. 5.3 *Registreret indeklima (Aflæsning af loggere)*, er det valgt at præsentere kuldebroerne i bolig A.0.1, da denne bolig vurderes at have det største potentiale for fugtproblematikker relateret til kuldebroer. Derudover præsenteres et udvalg af de mest kritiske kuldebroer i resten af bygningen.

Figur 25 viser termograferingspunkterne i bolig A.0.1, mens Tabel 17 præsenterer et udvalg af de mest kritiske kuldebroer i boligen.

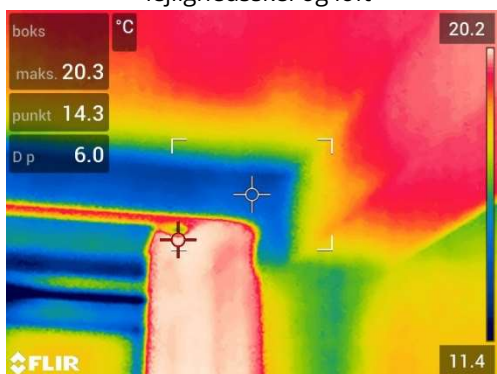
Generelt viser målingerne, at den indvendige overfladetemperatur i bolig A.0.1 er lav ved samlinger mod yder- og gavlvægge. Der er dog ingen registrerede temperaturer under 13 °C.



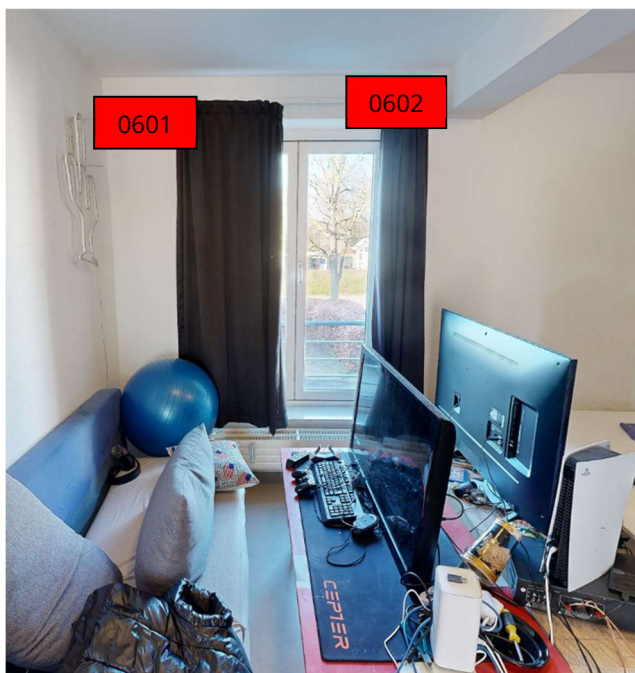
Figur 25 – Termograferingspunkter i bolig A.0.1.



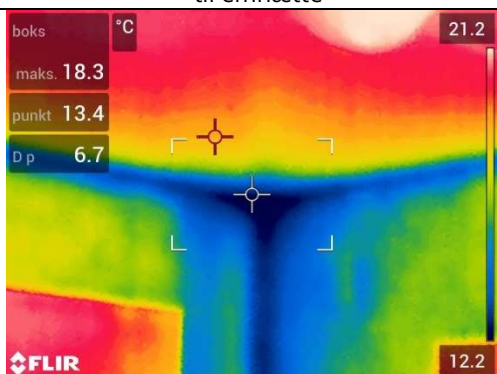
Flir0601 – Hjørnesamling ved ydervæg, lejlighedsskel og loft



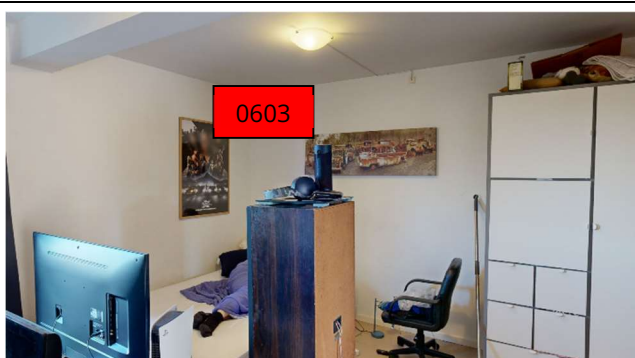
Flir 0602 – Overligger, vindueshul og afkast til emhætte



Billede af bolig



Flir 0603 – Samling ved gavlvæg



Billede af bolig



Kapacitiv fugtmåling. (44,2 digits)



Reference af kapacitiv fugtmåling.
(14,1 digits)

Tabel 17 – Termofotografering og kapacitiv fugtmåling fra bolig A.0.1.

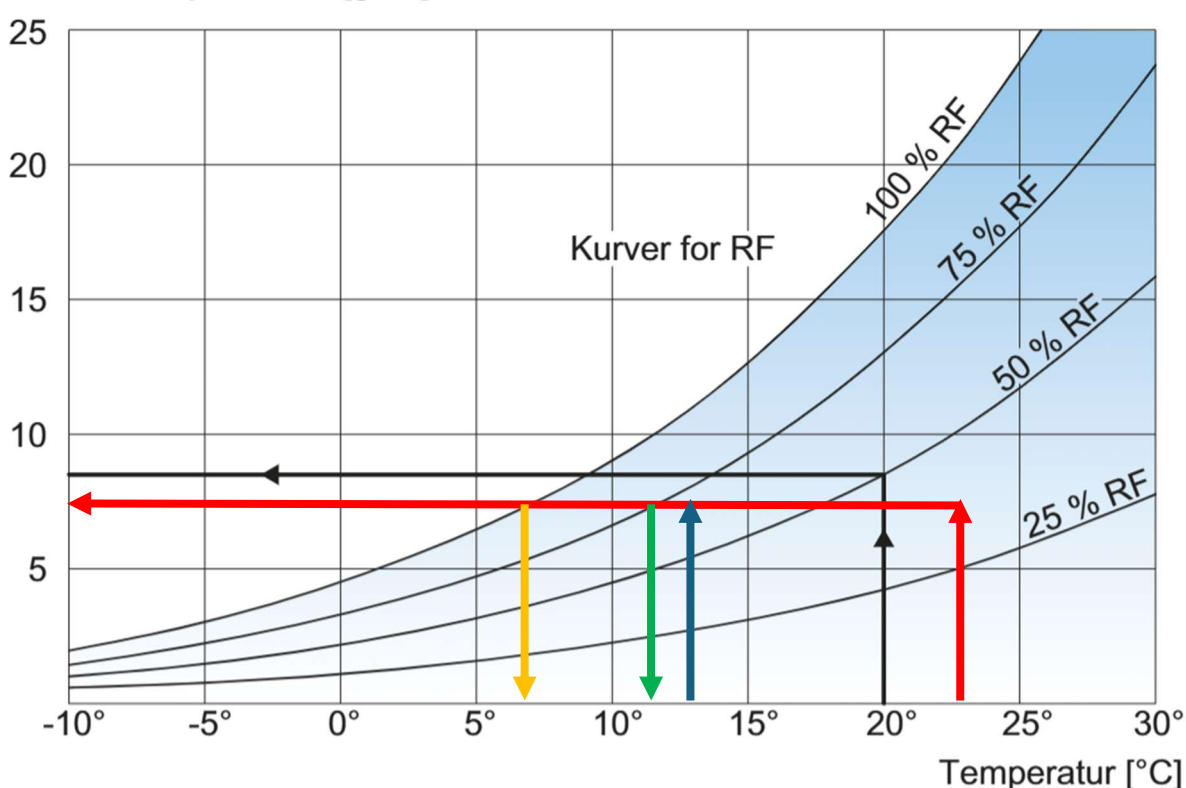
På trods af synlige kuldebroer var der ingen tegn på skimmelvækst eller kondensdannelse på overfladerne. Dette stemmer overens med teorien om den kritiske overfladetemperatur for fugtbelastningsklasse 2.

Figur 26 illustrerer sammenhængen mellem relativ luftfugtighed og rumtemperatur. Udgangspunktet for beregningerne er et vanddampindhold på $7,51 \text{ g/m}^3$, en temperatur på $23,15^\circ\text{C}$ og en relativ luftfugtighed på 36,25 %, hvilket svarer til gennemsnitsværdierne for bolig A.0.1.

Af Figur 26 fremgår det, at den relative luftfugtighed ved den indvendige overflade ved Flir 0603 – samling ved gavlvæg – er cirka 65% (blå pil), hvilket ligger under den teoretiske grænse for skimmelvækst på 75 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023).

Den relative luftfugtighed når først 75 %, når temperaturen falder til omkring 11°C (grøn pil), hvilket er 2°C under grænsen for den kritiske overfladetemperatur for fugtbelastningsklasse 2. Figur 26 viser desuden, at dugpunktstemperaturen er omkring 7°C (orange pil), hvilket bekræftes af målinger fra logger 5275.

Gram vand pr. m^3 luft [g/m^3]



Figur 26 - Viser hvordan den relative luftfugtighed bliver påvirket af temperaturændringer i indetemperaturen (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, 2023)

De teoretiske beregninger stemmer overens med de registrerede data. Det skal dog bemærkes, at forholdene kan ændre sig, hvis temperaturforskellen mellem inde og ude varierer. En faldende udetemperatur vil resultere i lavere indvendige overfladetemperaturer, hvilket kan øge risikoen for kondensdannelse.

Registrering af de mest markante kuldebroer

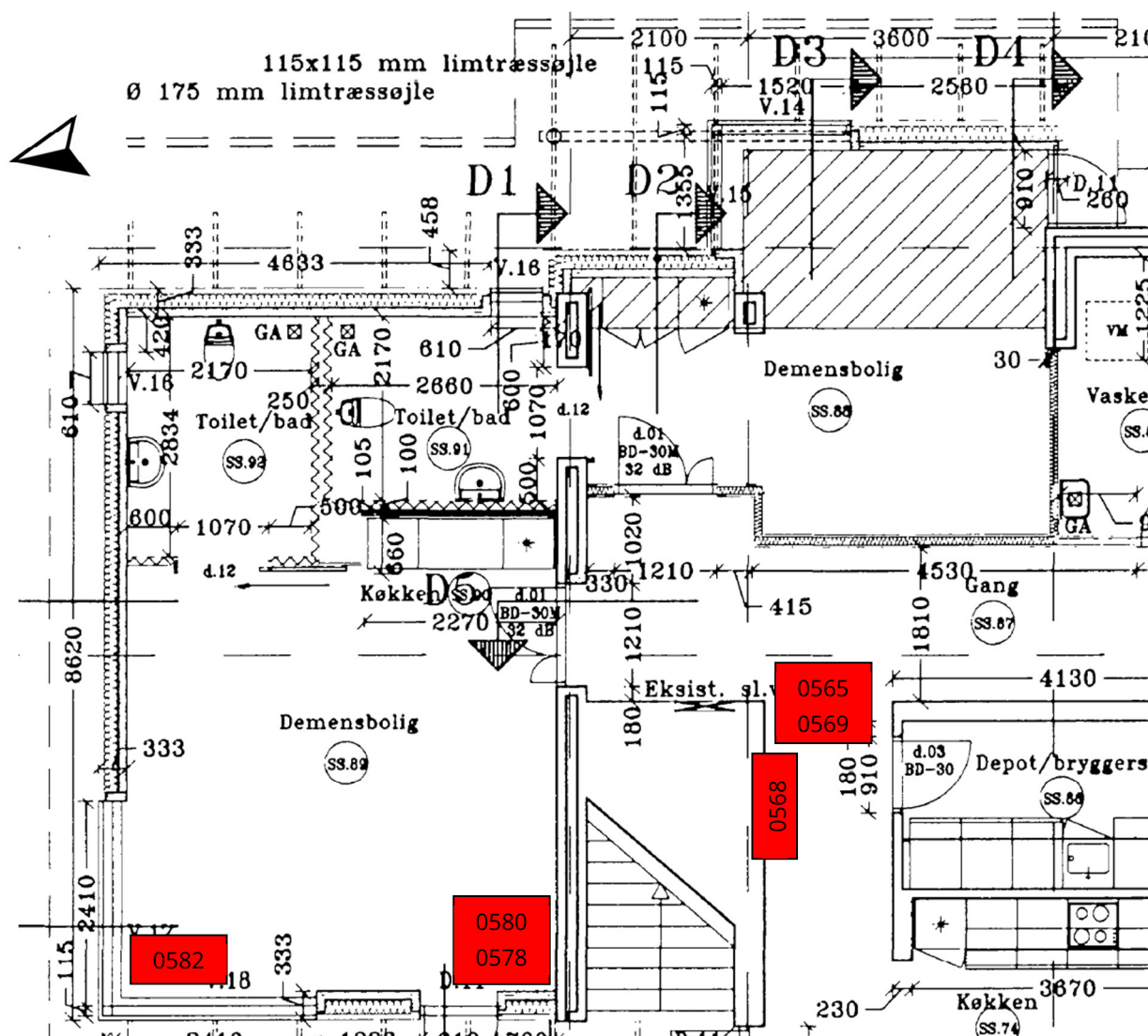
Tabel 18 og Tabel 19 viser nogle af de mest markante kuldebroer i bygningerne, mens Figur 27 viser placeringen af termograferingspunkterne.

Den laveste registrerede overfladetemperatur findes ved *Flir 0569* – *Overligger og gennemgående bjælke*, hvor temperaturen måles til 8,1 °C. Dette er væsentligt lavere end den kritiske overfladetemperatur på 11°C for skimmelvækst i bolig A.0.1

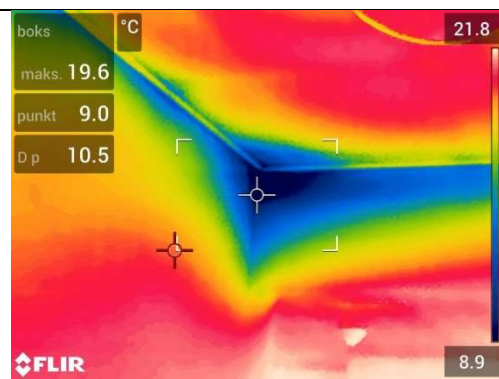
Trods den lave temperatur observeres der ingen tegn på skimmelvækst eller kondensdannelse på overfladen. Dette skyldes sandsynligvis, at termograferingen er foretaget i et rum med et stort volumen i forhold til personbelastningen. Den interne fugtbelastning synes at være markant lavere i fællesarealer og gange sammenlignet med lejlighederne.

Der foreligger dog ingen målinger af fugtforholdene i fællesrummene, som der gør for boligerne. Derfor har vi ikke datagrundlag til at verificere denne antagelse.

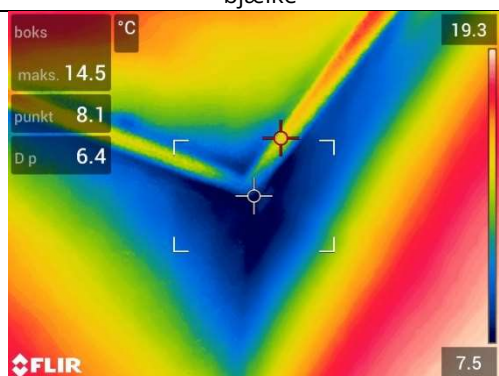
Ikke desto mindre repræsenterer dette område en væsentlig kuldebro, som bør adresseres i forbindelse med planlægningen af energirenoveringstiltagene.



Figur 27 – Termograferingspunkter for nogle af de mest markante kuldebroer i bygningerne.



Flir0565 – Overligger og gennemgående bjælke



Flir 0569 – Overligger og gennemgående bjælke



Flir 0568 – Overligger og gennemgående bjælke

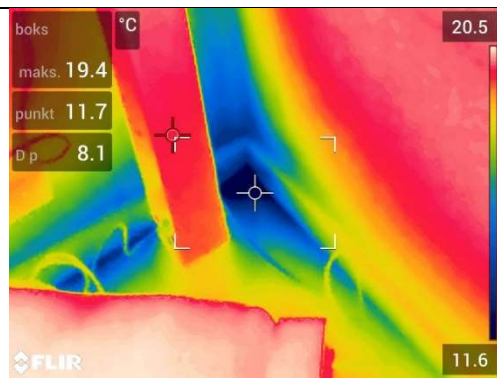


Billede af gang



Billede af gang

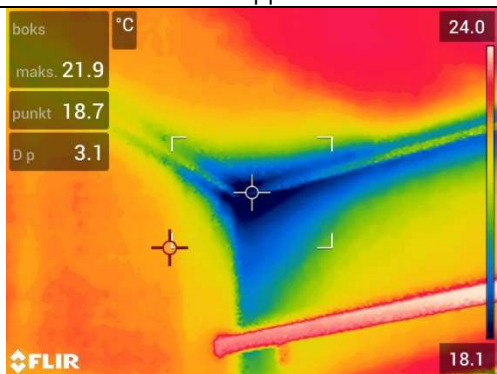
Tabel 18 - Termografering omkring gennemgående bjælke.



Flir0578 - Ydervæg og gulvsamling bag trappe



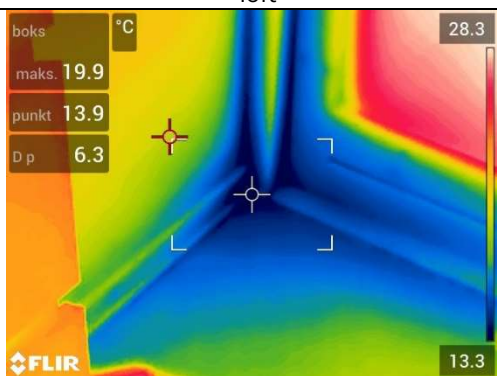
Billede af værelse



Flir 0580 - Hjørnesamling ved ydervæg og loft



Billede af værelse



Flir 0582 - Vinduesfals ved gulv



Kapacitiv fugtmåling ved 0578 (50,4 digits)



Kapacitiv fugtmåling ved 0580 (44,2 digits)

5.4.2 Eksisterende energiramme/energibehov

Ud fra tilstandsregistreringen samt generelle oplysninger om bygningernes opførelsestidspunkt er der fastlagt U-værdier og linjetab, som fremgår af Tabel 20. Disse værdier udgør grundlaget for beregningen af det samlede energibehov for byggeriet.

Energibehovet er beregnet samlet for hele bebyggelsen, idet bygningerne ifølge BBR-oplysningerne betragtes som én enhed.

Som beskrevet i kap. 5.1 *Tilstandsvurdering* består bebyggelsen af en række forskellige bygningsdele med varierende konstruktionstyper. For at gøre energiberegningen mere overskuelig og håndterbar er flere bygningsdele og linjetab derfor blevet sammenlagt. I nogle tilfælde har konstruktioner, såsom terrændæk, identiske U-værdier, men optræder stadig som separate poster. Dette skyldes eksempelvis tilstedeværelsen af gulvvarme i badeværelser, hvilket har betydning for temperaturfaktoren i Be18.

De angivne U-værdier og linjetab i Tabel 20 er udtryk for middelværdier af de sammenlagte konstruktioner og samlinger. Denne tilgang er valgt for at reducere risikoen for over- eller underestimering af det nuværende energibehov – en faktor, der har direkte indflydelse på vurderingen af rentabiliteten ved potentielle energioptimeringstiltag. Samtidig anerkendes det, at gennemsnittet kan skjule lokale varmetab og dermed påvirke beregningen af fremtidige besparelser og indeklimaforhold. Ved detaljeret projektering eller skæv efterisoleringsfordeling anbefales derfor supplerende delopdelte beregninger af U-værdier og kuldebroer.

U-værdierne er beregnet på baggrund af materialelag og konstruktionstyper. Det fulde beregningsgrundlag fremgår af *Bilag 6 – Inputdata til Be18*.

Linjetabene er enten:

- Simuleret i HEAT2, eller
- fundet via tabelopslag i henhold til gældende standarder, som (Dansk standard, 2020), (MOE A/S, Arkitema Architects, NCC NCC Danmark A/S, VIA Byggeri, Energi & Miljø, Center for forskning & udvikling, 2018).

Et overblik over metode og kilder til linjetab findes ligeledes i *Bilag 6 – Inputdata til Be18*.

Alle HEAT2-simuleringer, herunder rapportudtræk og modeldata, kan findes i *Bilag 7 – HEAT2-simuleringer*. Bilaget indeholder også tegningsmateriale, som viser, hvor de enkelte linjetab er placeret og beregnet.

Bygningsdel	Areal	U-værdi	Temperatur-faktor	Dimensionerede temperaturer
Bygning A	m ²	W/m ² k	-	°C
213002 – Facade, Tegl	385	1,49	1	32
214001 – Let facade	32	0,21	1	32
214002/214003 – Skunkvæg	102	0,17	1	32
271001 – Tag/351001 – Loft	232	0,17	1	32
271002 – Tag/skråvægge	114	0,24	1	32
334016/334017 – Dæk over kælder	320	0,47	0,68	15
334004 – Etagedæk over kælder	47	1,57	0,68	25
334009 – Skunkgulv	62	0,16	1	32
371001 – Kvisttag	51	0,24	1	32
371002 – Kvistvæg	51	0,24	1	32
Bygning B	m ²	W/m ² k	-	°C
131005 – Terrændæk	6	0,16	1	20
131007 – Terrændæk	51	0,16	0,7	10
213001 – Helstensvæg	181	0,28	1	32
213005 – Tung ydervæg	15	0,24	1	32
213006 – Let facade	32	0,31	1	32
213007 – Let facade	25	0,24	1	32
214008 – Skunkvæg	61	0,19	1	32
214004 – Let ydervæg	68	0,21	1	32
215001/215002/215003 – Gardinkasse	35	0,32	1	32
261001 – Terrassedæk	17	0,52	1	32
271001 – Tag/353001 – Påbygget loft	399	0,17	1	32
271006 – Tag	30	0,20	1	32
271007 – Tag/351001 – Påbygget loft	37	0,16	1	32
271008 – Tag	49	0,15	1	32
334018 – Dæk over kælder	399	0,94	0,68	15
334019 – Dæk over kælder	41	1,51	0,68	25
334020 – Dæk over indgang	22	0,17	1	32
Linjetab for alle bygningerne	Længde (lbm)	Linjetab (W/mk)	-	°C
Vindue i helstensvæg	222	0,129	1	32
Vindueshjørner	14	0,340	1	32
Dæksamling ved ydervæg	87	0,099	1	32
Sålbænk	55	0,142	1	32
Væg under vinduesparti ved altan	18	0,006	1	32
Betonbjælke under brystningsvæg ved altan	28	0,109	1	32
Vinduessamling ved limtræsbjælke	25	0,042	1	32
Vinduessamling ved sålbænk	14	0,010	1	32
Sokkel ved krybekælder_N01	34	0,244	1	32
Sokkel ved krybekælder_N02	45	0,467	1	32

Sokkel ved trævæg	5	0,250	1	32
Fundament, hammerhoved	23	0,410	1	32
Skillevægsgfundament	15	0,410	1	10
Linjetab under dør	10	0,010	1	32
Linjetab ved vinduesbånd	24	0,080	1	32
Ovenlysvinduer i tag	36	0,45	1	32

Tabel 20 - Overblik eksisterende U-værdier og linjetab i bygningerne.

Resultater

På baggrund af energirammeberegningen samt de opgjorte U-værdier og linjetab er det samlede dimensionerende transmissionstab for bygningen beregnet til 26,6 W/m². Dette niveau er væsentligt højere end, hvis bebyggelsen skulle have været opført efter nutidens standarder – hvor kravet ville have været 14,7 W/m². Selvom bygningen ikke er underlagt kravene for nybyggeri, indikerer denne forskel et betydeligt forbedringspotentiale, særligt i forhold til klimaskærmens isoleringsevne og omfanget af kuldebroer.

Beregningen er baseret på middelværdier for sammenlagte konstruktioner og linjetab. Flere bygningsdele – herunder ydervægge, og dæk over kælder – har U-værdier, der overstiger 1,0 W/m²K, hvilket vidner om en utilstrækkelig isoleringsgrad. Derudover viser de beregnede og tabelbaserede linjetab, at en række samlinger er særligt kritiske, eksempelvis ved fundamenter, vindueshjørner samt overgange mellem væg og dæk, hvor linjetabet i flere tilfælde overstiger 0,30–0,40 W/mK.

Resultater stemmer overens med fundene fra termograferingen, hvor der blev identificeret flere markante kuldebroer.

Termograferingen, de supplerende fugtmålinger og transmissionstabet bekræfter, at der er væsentlige varmetekniske svagheder i klimaskærmen. Disse bør indgå som et centralt fokuspunkt i den kommende energirenovering. Forbedringer af kuldebroer og hævnning af overfladetemperaturen ved kritiske samlinger vurderes samtidig at kunne bidrage til et bedre indeklima.

Beregning af energirammen

Det eksisterende energibehov for bebyggelsen er jf. Figur28 beregnet til 156,2 kWh/m² pr. år, hvilket ligger markant over niveauet for renoveringsklasse 1 og 2. Til sammenligning er grænseværdierne for:

- Renoveringsklasse 1: 53,3 kWh/m².
- Renoveringsklasse 2: 71,0 kWh/m².

Det høje energibehov skyldes primært rumopvarmning, som udgør 102,9 kWh/m² – svarende til omkring 66% af det samlede energibehov.

Ud fra det samlede energibehov kan energimærket for bebyggelsen fastlægges til energimærke E, se Figur 29. Klassifikationen følger energimærkeskalaen for boliger, som er fastlagt i Håndbog for energikonsulenter (Energistyrelsen, 2025).

Nøgletal, kWh/m² år			
Renoveringsklasse 2			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
71,0	0,0	71,0	
Samlet energibehov		156,2	
Renoveringsklasse 1			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
53,3	0,0	53,3	
Samlet energibehov		156,2	
Energiramme BR 2018			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
30,5	0,0	30,5	
Samlet energibehov		156,2	
Energiramme lavenergi			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
27,0	0,0	27,0	
Samlet energibehov		156,2	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	134,4	Rumopvarmning	102,9
El til bygningsdrift	11,5	Varmt brugsvand	18,1
Overtemp. i rum	0,0	Køling	0,0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	10,1
Opvarmning af rum	0,0	Varmt brugsvand	4,9
Opvarmning af vbv	0,1	Ydelse fra særlige kilder	
Varmepumpe	0,0	Solvarme	0,0
Ventilatorer	10,9	Varmepumpe	0,0
Pumper	0,3	Solceller	0,0
Køling	0,0	Vindmøller	0,0
Totalt elforbrug	42,1		

Figur28 - Nøgletal for beregning af energibehov.

5.4.3 Beregning af energiforbruget

På baggrund af det beregnede energibehov og de målte data fra bygningen er det reelle energiforbrug i den kalibrerede model beregnet til 164,1 kWh/m² pr. år. Dette er højere end energibehovet i standardmodellen.

I standardmodellen anvendes et temperatursetpunkt på 20,0 °C, mens setpunktet i den kalibrerede model – som er tilpasset de faktiske temperaturmålinger – er hævet til 22,85 °C. Denne temperaturstigning medfører en stigning i varmebehovet til rumopvarmning fra 102,9 kWh/m² i standardmodellen til 126 kWh/m² i den kalibrerede model.

I standardmodellen er forbruget af varmt brugsvand sat til 250 liter/m²/år, svarende til ca. 62,5 liter/m²/år pr. person i en gennemsnitlig husstand med fire personer. I den kalibrerede model er forbruget reduceret til 62,5 liter/m²/år. Dette er baseret ud fra et skøn af at bygningen bebos af relativt få personer, som fordeler sig over mange kvadratmeter. Det vurderes desuden, at beboerne ikke nødvendigvis bader dagligt, hvilket adskiller sig fra forbrugsmønstret i en almindelig familiebolig. Dertil kommer, at kun en del af det samlede etageareal er beboet, og at tilstedeværelsen af personale ikke nødvendigvis medfører et tilsvarende varmtvandsforbrug.

Skala for boliger

Energimærkningsskala for en- og flerfamiliehuse - gældende

Hent tabellen

Skalatrin	Grænseværdi i kWh/m ² år
A2020	27,0
A2015	< 30,0 + 1000/A
A2010	< 52,5 + 1650/A
B	< 70,0 + 2200/A
C	< 110 + 3200/A
D	< 150 + 4200/A
E	< 190 + 5200/A
F	< 240 + 6500/A
G	> 240 + 6500/A

Figur 29– Energimærkeskala (Energistyrelsen, 2025).

Elforbruget er ligeledes reduceret i den kalibrerede model. Hvor apparatbelastningen i standardmodellen er sat til 3,5 W/m², er den i den kalibrerede model justeret til 1,52 W/m² for at matche det målte elforbrug (en del af elforbruget går til udendørs belysning, det vides dog ikke hvor meget). Det samme gør sig gældende for personbelastningen, som er reduceret fra 1,5 W/m² i standardmodellen til 1 W/m² i den kalibrerede model. Dette afspejler bygningens anvendelse, hvor få beboere på stort areal medfører færre elektriske apparater i drift.

Ventilationsraten er også blevet justeret. Den dimensionerende værdi i standardmodellen er 0,62 l/s/m², men er i den kalibrerede model reduceret til omkring 0,46 l/s/m² (Der er en lille forskel på luftskiftet mellem sommer og vinter). Dette er ligeledes et skøn, som er fortaget i forbindelse med justeringen af kalibreringsprocessen for at skabe overensstemmelse mellem modellens beregnede el- og varmekonsum og de faktiske målinger.

Nøgletallene for det kalibrerede forbrug fremgår af Figur 30.

Nøgletal, kWh/m² år

Renoveringsklasse 2		
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme
71,0	0,0	71,0
Samlet energibehov		164,1

Renoveringsklasse 1		
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme
53,3	0,0	53,3
Samlet energibehov		164,1

Energiramme BR 2018		
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme
30,5	0,0	30,5
Samlet energibehov		164,1

Energiramme lavenergi		
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme
27,0	0,0	27,0
Samlet energibehov		164,1

Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	147,6	Rumopvarmning	126,0
El til bygningsdrift	8,7	Varmt brugsvand	8,0
Overtemp. i rum	0,0	Køling	0,0

Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	9,6
Opvarmning af rum	0,0	Varmt brugsvand	4,7
Opvarmning af vbv	0,1		
Varmepumpe	0,0		
Ventilatorer	8,1		
Pumper	0,3		
Køling	0,0		
Totalt elforbrug	22,0		

Ydelse fra særlige kilder	
Solvarme	0,0
Varmepumpe	0,0
Solceller	0,0
Vindmøller	0,0

Figur 30- Nøgletal for beregning af det faktiske forbrug.

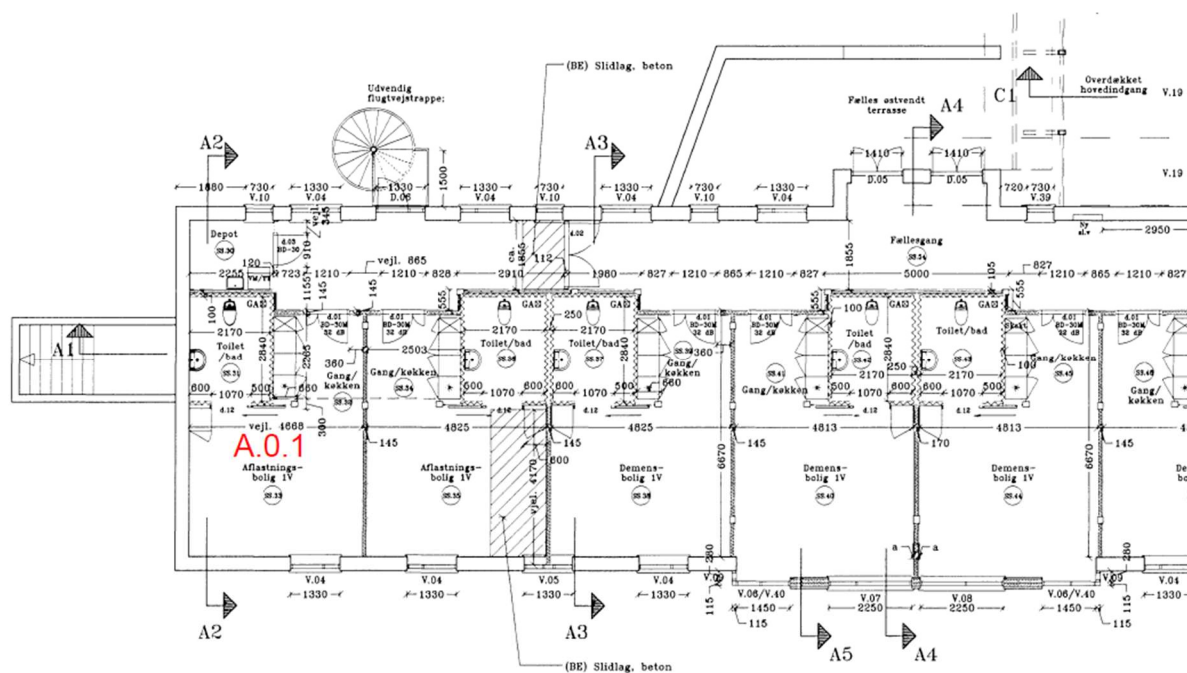
5.4.4 Eksisterende nuværende indeklima

Ud fra de målte indeklimadata i kap. 5.3 *Registreret indeklima (Aflæsning af loggere)* er der gennemført en række BSim-simuleringer med henblik på at vurdere sommerkomforten i to udvalgte boliger;

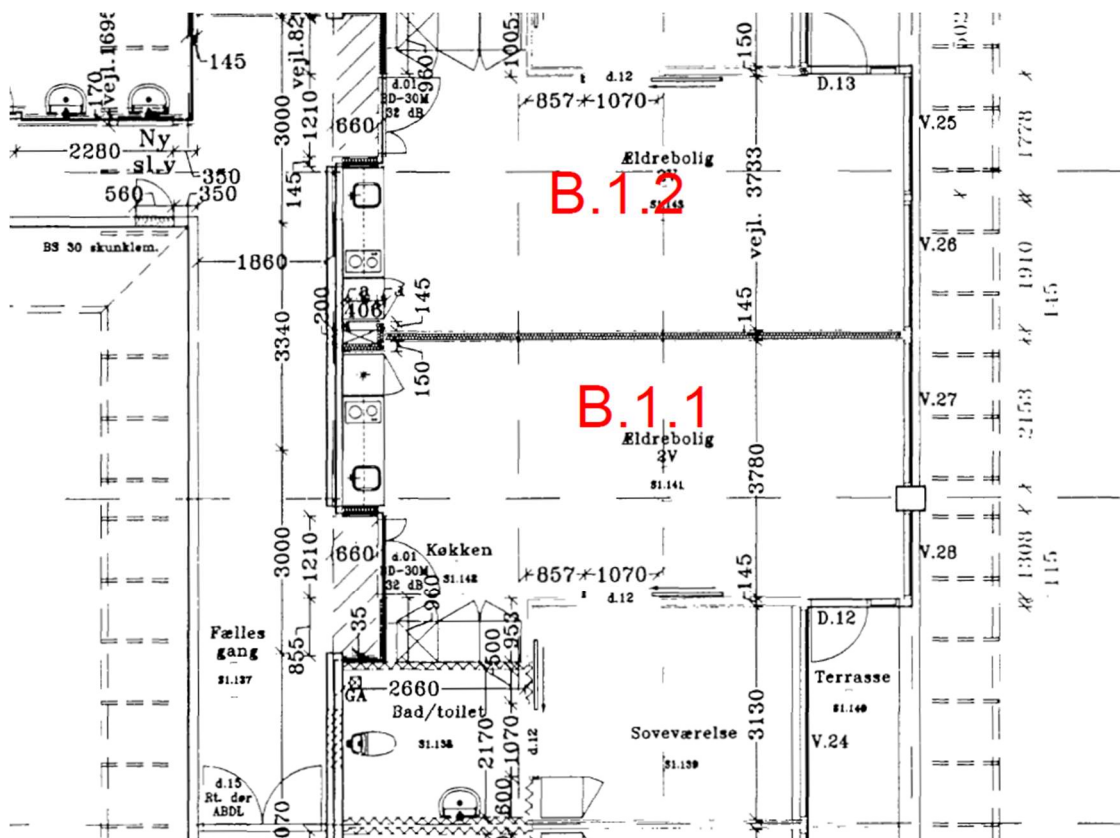
- Bolig A.0.1, blev udvalgt som repræsentant for den mest fugtbelastede bolig,
- mens bolig B.1.1, blev valgt grundet sine store sydvendte vinduespartier og det potentielt høje solindfald i sommermånederne. Rummenes placering fremgår af Figur31 og Figur 32.

Kalibrering af model

Da de tilgængelige målinger kun dækker perioden 14. januar til 18. februar 2025, blev det vurderet nødvendigt at kalibrere modellerne mod faktiske klimadata frem for at anvende standardiserede vejrdata som Design Reference Year (DRY 2013).



Figur31 - Placering af bolig A.0.1.



Figur 32- Placering af Bolig B.1.1.

Til dette formål blev der indhentet data fra DMI's vejstation i Flakkebjerg, som er den nærmeste station i forhold til lokaliteten. På baggrund af disse data blev der udarbejdet en vejrdatabil, som blev anvendt i kalibreringsprocessen for at sikre overensstemmelse mellem model og virkelige forhold.

Kalibreringen blev primært gennemført ved at justere de interne varmebelastninger fra personer og elektriske apparater samt styringen af varmforsyningen til rummene, indtil der blev opnået god overensstemmelse mellem de simulerede og målte data for temperatur og relativ luftfugtighed. CO₂-niveauet blev ligeledes forsøgt tilpasset i det omfang, det ikke påvirkede temperatur- og fugtforholdene i rummene.

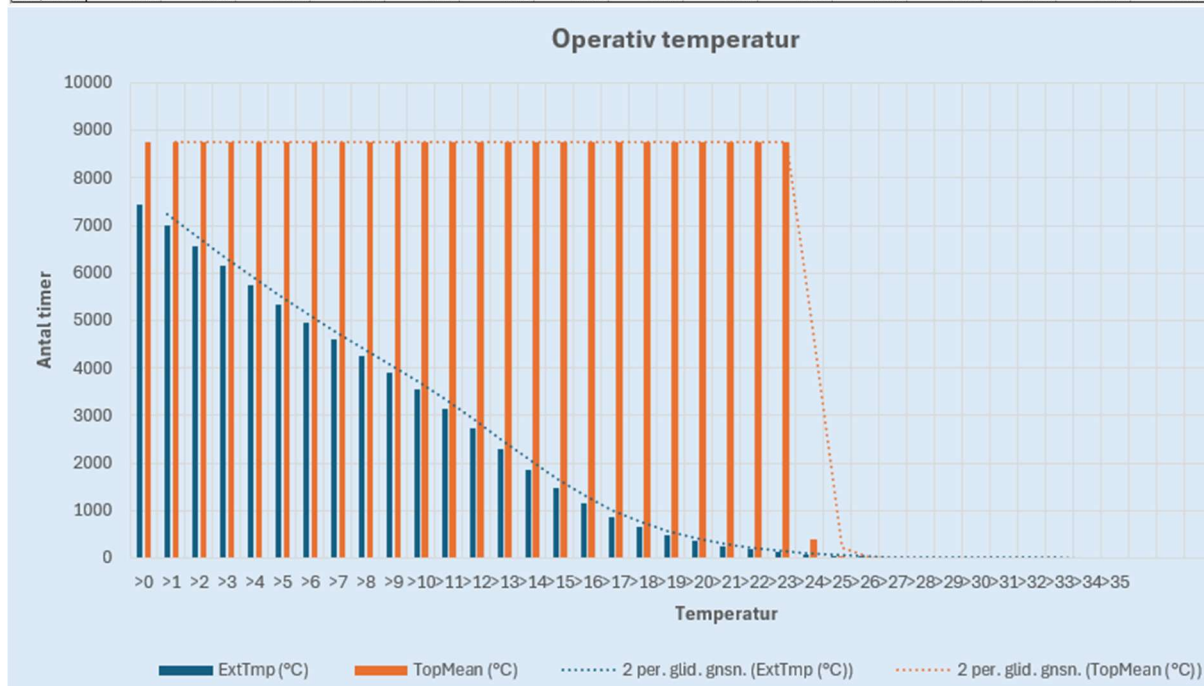
Efter afsluttet kalibrering blev den foreskrevne DRY-vejrdatabil for kalenderåret 2010, som angivet i BR18 (2025), anvendt til simulering af et helt kalenderår. Dette muliggør en vurdering af sommerkomforten under standardbetingelser og danner grundlag for at identificere eventuelle perioder med overtemperatur.

Simuleringsresultater

I bolig A.0.1, viser simuleringen, at der ikke forekommer temperaturer over 27 °C i løbet af året. Der observeres således ingen tegn på overophedning, hvilket kan tilskrives det lave solindfald og den begrænsede mængde glasareal i lejligheden. Figur 34 viser hvordan den operative temperatur, den relative luftfugtighed og hvordan CO₂-niveauet er i lejligheden.

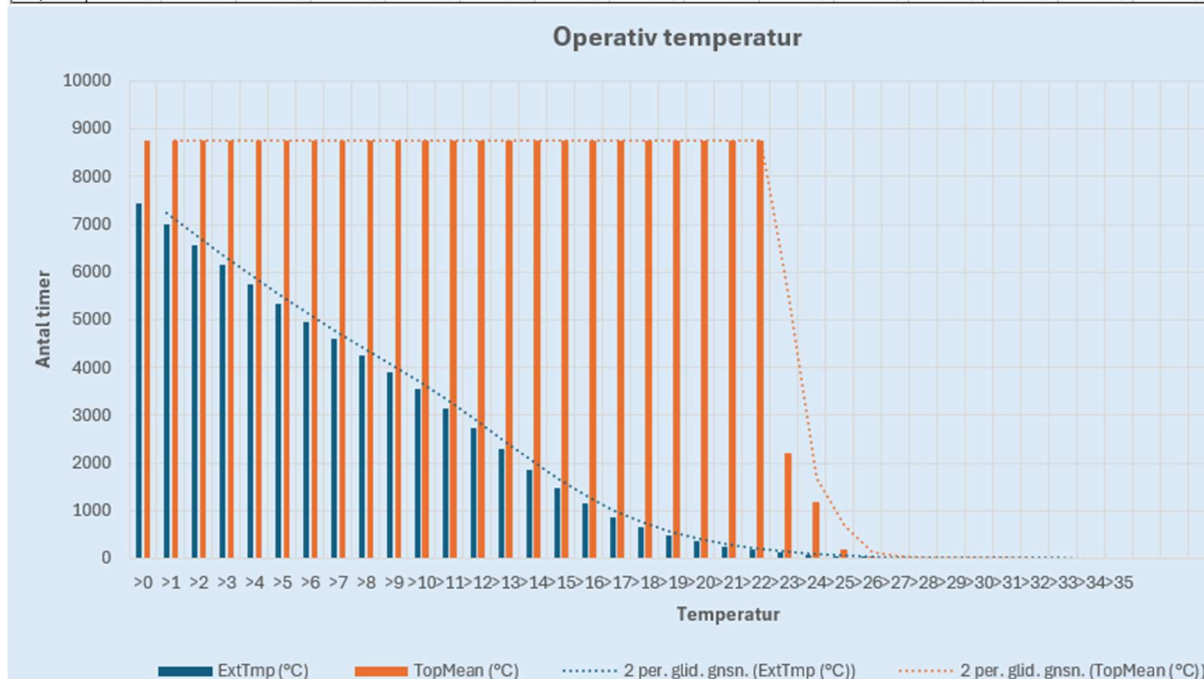
I bolig B.1.1, registreres et samlet antal på 29 timer med temperaturer over 27 °C, heraf 7 timer over 28 °C. Ifølge (Mette Havgaard Vorre, 2017) anses op til 100 timer over 27 °C og 25 timer over 28 °C årligt som acceptable niveauer. Resultaterne indikerer derfor, at selv under forhold med højt solindfald forbliver det termiske indeklima inden for de anbefalede komfortgrænser. Det relativt store udhæng over de sydvendte vinduespartier vurderes at have en positiv effekt i forhold til at reducere risikoen for overophedning i bolig B.1.1. Figur 33 viser hvordan den operative temperatur, den relative luftfugtighed og hvordan CO₂-niveauet er i lejligheden.

2010	Min	Mean	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TopMean(Ti)	22,74	23,25	25,73	23,15	23,15	23,15	23,15	23,17	23,51	23,62	23,47	23,16	23,15	23,15	23,15
RelHumid(Ti)	11,70	45,83	88,91	33,15	31,56	34,06	38,94	47,76	58,37	63,23	61,29	58,12	46,89	41,53	34,10
Co2(Termisk)	400,0	621,6	675,6	622,4	624,9	623,9	623,4	623,0	618,1	617,1	620,4	621,9	622,4	619,6	621,6



Figur 34– Oversigt over bolig A.0.1. Tabellen viser den gennemsnitlige operative temperatur, relativ luftfugtighed og CO2-niveau pr. måned, mens figuren vis antal timer over en temperaturdifference, som går fra 0 til 35°C.

2010	Min	Mean	Max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TopMean(Ti)	22,10	22,68	30,02	22,11	22,15	22,16	22,35	22,79	23,46	23,83	23,86	22,76	22,34	22,14	22,11
RelHumid(Ti)	10,25	41,71	83,22	29,78	27,95	30,63	35,45	43,48	53,13	57,06	54,34	54,41	43,96	38,70	30,78
Co2(Therma)	400,0	532,6	1096,1	530,8	533,1	531,9	531,5	536,5	531,7	533,6	540,3	531,3	529,5	530,5	529,9



Figur 33 – Oversigt over bolig B.1.1. Tabellen viser den gennemsnitlige operative temperatur, relativ luftfugtighed og CO2-niveau pr. måned, mens figuren vis antal timer over en temperaturdifference, som går fra 0 til 35°C.

5.4.4.1 Dagslys

Til vurdering af de eksisterende dagslysforhold anvendes 10 %-reglen, som beskrevet i kap. 4.8 *Dagslys 10%*.

bolig A.0.1

Boligen er en etværelses bolig, hvor stue og soveplads er samlet i ét opholdsrum. Der er placeret ét vindue/fransk altan i vestlig retning. Lejligheden har et gulvareal på 25 m².

Vinduet, V4, har et samlet vinduesareal på 2,51 m². Vinduerne beregnes med en glasandel (FF) på 64 %, hvilket er beregnet ud fra *bilag 6 – Inputdata til Be18*, da der ikke foreligger præcise oplysninger om de eksisterende vinduer.

Da vi ikke kender den præcise type glas, anvendes en standardværdi for almindeligt vinduesglas uden solafskærmning med en lystransmittans (LT) på 0,74, iht (Energistyrelsen, 2025).

Der er ingen nævneværdige skyggegivende omgivelser, bortset fra et træ udenfor bygningen. På grund af træets afstand vurderes det dog, at dets skyggevirksomhed er så begrænset, at det ikke skal medregnes i beregningen.

Derudover er der et lille udhæng, som medfører en korrektionsfaktor på 0,02, samt et mindre fremspring mod syd fra karnappen, som bidrager med en korrektionsfaktor på 0,01.

Da rumdybden overstiger 6,1 meter, tilføjes yderligere en korrektionsfaktor på 0,10.

Med de nævnte korrektioner resulterer beregningen i et korrigeret glasareal på 1,29 m², hvilket giver et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 5,2 %.

Dette svarer til et meget lavt dagslysniveau, hvilket dog var forventet, da der kun er ét enkelt vindue i et så stort rum.

B.1.1

Boligen er en toværelses bolig med et separat soveværelse og et opholdsrum bestående af stue og køkken. Soveværelset har et areal på 12 m², og opholdsrummet (stuen) har et areal på 32 m².

Stuen har to vinduer mod syd samt en altandør:

- Vindue V27 har et areal på 2,78 m² og en glasandel (FF) på 77 %.
- Vindue V28 har et areal på 1,8 m² og en glasandel (FF) på 83 %.
- Altandøren har et areal på 2,75 m² og en glasandel (FF) på 52 %.

De to sydvendte vinduer er placeret under et større udhæng, hvilket giver en samlet korrektionsfaktor på 0,50. Altandøren påvirkes af både udhæng (korrektionsfaktor 0,48) og et fremspring fra soveværelset bag altanen (korrektionsfaktor 0,14).

Med disse korrektioner resulterer det i et korrigeret glasareal på 2,45 m², hvilket giver et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 7,7 %.

Soveværelset har ét vindue, V24, med et areal på 7,83 m² og en glasandel (FF) på 81 %. Vinduet er trukket tilbage bag en indbygget altan, hvilket medfører et dybere udhæng og dermed en korrektionsfaktor på 0,5. Derudover påvirkes vinduet af et fremspring fra stuen (korrektionsfaktor 0,14) samt en sideafskærmning mod naboen (korrektionsfaktor 0,10). Da rumdybden i soveværelset kun er 4 meter, tilføjes der ikke korrektionsfaktor for rumdybde.

Med disse korrektioner resulterer det i et korrigeret glasareal på 2,28 m², hvilket giver et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 19 %.

Samlet set overholder boligen B.1.1 ikke dagslyskravet på 10 % korrigeret glasareal i forhold til gulvarealet, selvom soveværelset opfylder kravet.

Opfyldelse af dagslyskravet i soveværelset kan dog ikke anvendes som kompensation for manglende opfyldelse i stuen.

På trods af, at næsten hele facaden i stuen består af glas, er dagslysniveauet ikke tilstrækkeligt. Rummets dybde samt det store udhæng påvirker forholdet negativt og gør det besværligt at opfylde kravet om 10 % korrigeret glasareal i forhold til gulvarealet.

Dagslysberegningerne kan ses i *bilag 8 - Dagslysberegninger*

5.4.4.2 IK-Kompas

Til vurdering af de eksisterende indeklimaforhold og de tekniske analyser er der anvendt IK-Kompas, som beskrevet i kap. 4.7 *IK-kompasset*.

De scorer, der præsenteres i denne rapport, er fastlagt med udgangspunkt i resultaterne fra dagslysanalysen (10 %-reglen) samt sommerkomfortsimuleringer i Be18 og BSim.

I arbejdet med modellen viste det sig, at IK-Kompas ikke simulerede udhæng og skyggeforhold tilstrækkeligt præcist, hvilket påvirkede vurderingerne af både dagslys og sommerkomfort. Derfor er scorerne ikke præsenteret direkte ud fra IK-Kompas, men i stedet justeret manuelt med afsæt i værktøjets dokumenterede scoringskriterier (Tine Steen Larsen, 2021), for at sikre overensstemmelse med de tekniske analyser. Den oprindelige score kan findes i *bilag 9 – IK-kompas*.

Bolig A.0.1

Boligen har en samlet IK-Kompas-score på 66 point, hvilket placerer den i klasse "C" i forhold til indeklimakvalitet. Dette indikerer, at boligen overordnet har gode forudsætninger for et sundt og komfortabelt indeklima, men at der samtidig er områder med forbedringspotentiale.

- **Akustisk indeklima:** Akustikken er en af de mest udfordrende aspekter. Lejligheden scorer lavt på både luftlydisolation og efterklangstid, hvilket tyder på lydgennemtrængning mellem boliger og ringe lydabsorbering i rummene. Det kan føre til støjgener og manglende ro. Dog er der god beskyttelse mod trafikstøj, og trinlydniveauet er lavt, hvilket øger komforten.
- **Atmosfærisk indeklima:** Er hvor bolig scorer dårligst, men her er billedet blandet. Udeluften vurderes som værende af høj kvalitet, hvilket tyder på god filtrering og lavt partikelindhold. Til gengæld er den naturlige ventilation begrænset, og der findes kun udsugningsventilation uden tilførsel af frisk luft. Det kan føre til utilstrækkeligt luftskifte og dermed forringet luftfriskhed, hvilket kan påvirke både komfort og sundhed negativt.
- **Termisk indeklima:** Generelt godt. Lejligheden scorer højt på både sommerkomfort og vinterkomfort, hvilket betyder, at temperaturforholdene er stabile og behagelige året rundt. Varmekilderne fungerer effektivt. Dog er mulighederne for brugerregulering af temperaturen begrænsede, fx mangler der både mekanisk ventilation og automatisk temperaturstyring.
- **Visuelt indeklima:** Dagslysforholdene vurderes som svage, hvilket skyldes kun et vindue/fransk altan på kun 2,51 m² som uden nogen form for korrektionsfaktor lige præcis ville kunne overholde kravet.

Lejligheden har et godt udgangspunkt, men der er tydeligt behov for forbedringer, særligt i forhold til dagslys og ventilationsforhold. Det er vigtigt at have fokus på at sikre et tilstrækkeligt luftskifte og forbedre det naturlige lysindfald.

Bolig B.1.1

Boligen opnår en samlet IK-Kompas-score på 68 point hvilket er en smule højere end bolig A.0.1. men er

også indeklimakvalitet klasse "C". Det peger på et lidt bedre samlet indeklimapotentiale, særligt i forhold til dagslys og termiske forhold.

- **Akustisk indeklima:** Udfordringerne er de samme som i bolig A.0.1 – lav score på luftlydisolation og efterklangstid vidner om ringe lydafsørmning mellem lejlighederne. Til gengæld er lydforholdene fra tekniske installationer og trinlyd lidt bedre, hvilket mindsker gener fra bevægelse og aktivitet i boligen.
- **Atmosfærisk indeklima:** Næsten identisk med bolig A.0.1. Kvaliteten af udeluften er høj, men der mangler både naturlig og mekanisk ventilation samt mulighed for automatisk styring. Det begrænser brugernes muligheder for at tilpasse luftskiftet og komfort efter behov.
- **Termisk indeklima:** Dette område er særligt stærkt i bolig B.1.1. boligen opnår høje scorer for både sommer- og vinterkomfort, og varmekilderne – fx hurtig reagerende radiatorer – sikrer en stabil og komfortabel temperaturregulering. Dog mangler der, som i bolig A.0.1, køling og automatisk styring.
- **Visuelt indeklima:** Her adskiller boligerne sig positivt sammenlignet med andre, idet dagslysforholdene generelt er bedre – om end stadig i den lave ende. Vurderingen af udsyn, indkig og afsørmning fremstår mere balanceret. Dog er udhængene markante og har en negativ indvirkning på dagslysforholdene, særligt i stuen, hvor de reducerer lysindfaldet betydeligt.

Bolig B.1.1 har en mere balanceret indeklimaprofil end bolig A.0.1, især på det visuelle og termiske plan, hvor boligen performer bedre. Der er dog fortsat behov for forbedringer i forhold til ventilationsmuligheder og dagslysforhold for at løfte den samlede indeklimakvalitet yderligere.

IK-kompas-modellerne, deres udtræk og de justeret score kan ses i *bilag 9 – IK-kompas*.

5.5 Delkonklusion af eksisterende forhold

Bygningens tilstand

På baggrund af tilstandsvurderingen kan det konkluderes, at bygningsdelene generelt er i god stand for hele bebyggelsen. Der blev dog identificeret enkelte forhold, som kræver særlig opmærksomhed:

- Opfugtning og saltudfældninger i murværk.
- Begyndende slid på taginddækninger.
- Formegentlig utilstrækkelig ventilation i baderum, eller manglende aftørring efter bad.
- Mindre skader på sokkelpuds.

Derudover vurderes det, at flere af de tekniske installationer nærmer sig afslutningen på deres forventede tekniske levetid, og de bør derfor inddrages som en del af den kommende energirenovering.

Et særligt opmærksomhedspunkt vedrører dampspærresystemet og fibercementbølgepladerne. Både teoretiske levetidsstudier og praktiske erfaringer indikerer, at disse komponenter kan være tæt på – eller i visse tilfælde have overskredet – deres tekniske levetid, selvom levetidstabeller angiver en længere forventet holdbarhed.

Selvom bygningerne blev moderniseret i 2005, kan der stadig være rester af skadelige stoffer som asbest i lukkede eller svært tilgængelige konstruktioner. Derfor anbefales det, at der gennemføres en grundig screening for miljøskadelige stoffer inden energirenoveringsarbejdet påbegyndes.

Indeklima og fugt

På baggrund af de indsamlede data blev der ikke identificeret umiddelbare indeklimaproblemer i de undersøgte boliger. Dog blev bolig A.0.1 vurderet som den mest belastede. På baggrund af dette blev den aktuelle fugtbelastningsklasse for bebyggelsen fastlagt til klasse 2, hvilket stemmer overens med de oprindelige forudsætninger.

Det bemærkes, at resultaterne bør tolkes med forbehold, da undersøgelsen kun omfatter et begrænset antal boliger, og fordi beboeradfærd kan variere betydeligt og ændre sig over tid.

Da dataloggerne kun har været aktive i omkring en måned, foreligger der ikke målinger, som dækker sommerperioden. Derfor blev der udført BSim-simuleringer i to udvalgte boliger, kalibreret med data fra dataloggerne og lokale vejrforhold. Ingen af simuleringerne viste tegn på sommerkomfortproblematikker. Dette blev yderligere bekræftet af Be18-modellen, som viste resultater tilsvarende dem fra BSim.

For at identificere potentielle kuldebroer og fugtproblematikker blev der endvidere gennemført termografifotografering og capacitive fugtmålinger. Undersøgelsen omfattede flere rum end dem med indeklimamålinger, hvilket har resulteret i et bredere og mere detaljeret datagrundlag.

Der blev generelt registreret markante kuldebroer – særligt ved udvendige hjørnesamlinger, samlinger mellem væg og etagedæk samt omkring gennemgående bjælker. I flere af disse områder blev der målt overfladetemperaturer under den kritiske grænseværdi for fugtbelastningsklasse 2 (13 °C) – i enkelte tilfælde helt ned til 8,1 °C. De capacitive fugtmålinger viste forhøjede fugtniveauer i samme områder, men der blev ikke observeret skimmelvækst eller kondensdannelse ved måletidspunktet.

Energibehov og simuleringer

Det samlede energibehov er beregnet til 156,2 kWh/m² pr. år, hvilket placerer bebyggelsen i energimærke E. Beregningen er baseret på sammenlagte U-værdier og linjetab, fastlagt ud fra tilstandsregistreringen og simulerede data.

Transmissionstabet er beregnet til 26,6 W/m², hvilket er væsentligt højere end kravene for nybyggeri. Resultaterne stemmer overens med observationerne fra termograferingen og peger samlet set på et betydeligt energimæssigt forbedringspotentiale – både i forhold til klimaskærmens isoleringsevne og reduktion af kuldebroer.

På baggrund af energiforbruget i bebyggelsen, leveret fra forsyningen, og en kalibreret Be18-model er det reelle energiforbrug beregnet til 164,1 kWh/m² pr. år. Det højere forbrug skyldes bl.a. justerede forbrugsprofiler, færre beboere pr. m² og et højere varmekonsum end forudsat i standardmodellen. På trods af en højere rumtemperatur i den kalibrerede model fastholdes energimærke E, da forskellen i forbrug ikke er tilstrækkelig til at ændre på energimærket.

Dagslys og samlet indeklima

Dagslysforholdene blev vurderet for de to udvalgte lejligheder efter 10 %-reglen. Ingen af boligerne overholder kravene, når alle korrektionsfaktorer medregnes.

Bolig A.0.1 opnår en dagslysfaktor på 5,2 %, mens bolig B.1.1 opnår 7,7 % for stuen og 19 % for soveværelset. På trods af den høje værdi for soveværelset resulterer dette i, at den samlede bolig ikke overholder dagslyskravet.

Dette sker på trods af relativt store glasarealer og skyldes blandt andet et stort udhæng mod syd, som har en negativ indflydelse på lysindfaldet.

Endelig blev det samlede indeklima vurderet ved hjælp af IK Kompasset for de to udvalgte boliger. Simuleringerne kombinerer alle de målte og beregnede parametre, og modellerne er kalibreret herefter. Resultatet var en samlet indeklimascore "C" for begge boliger.

5.6 Forbedringsforslag

Følgende kapitel behandler og analyserer de væsentligste energirenoveringstiltag, som har til formål at reducere det samlede energibehov for *Skovglimt* og dermed muliggøre en opgradering til energimærke A2010.

Forudsætninger for analyserne

Alle priser i LCC-beregningerne er AI-genererede og baseret på markedspriser fundet online.

Da projektet udføres for en offentlig bygherre, er beregningerne af totaløkonomi (LCC) udarbejdet i overensstemmelse med Finansministeriets retningslinjer for kalkulationsrente. Der anvendes en rentetrappe med faldende realrente over projektets 50-årige levetid (Finansministeriet, 2021).

Større teglflader, såsom bygning A og gavlene på bygning B, forsøges så vidt muligt holdt i samme udtryk for at være tro mod bygningernes arkitektoniske fremtoning i landskabet.

Forudsætningerne for beregninger er følgende:

- Bruttoetagearealet er 2.179 m².
- Energifrisen på gas er 1,14 kr./kWh iht. (Forsyningstilsynet, 2024), som er blevet benyttet på alle klimaskærmens forbedringstiltag.
- Energifrisen på el er 2,6 kr./kWh iht. (Forsyningstilsynet, 2024), som er blevet benyttet på casen omkring konvertering til varmepumpe.
- Energifrisen på fjernvarme er 0,88 kr./kWh iht. (Forsyningstilsynet, 2024), som er blevet benyttet på casen omkring konvertering til fjernvarme.
- Betragtningssperioden er 50 år.

Alle forbedringsforslag er baseret på energibehovet, da det er dette grundlag, energimærket beregnes ud fra.

Den samlede pakke af de mest fordelagtige forbedringsforslag bliver efterfølgende beregnet på baggrund af energiforbruget, for at give en bedre indikation af de reale besparelser – både ift. til økonomi og CO₂-udledning.

Når der i dette kapitel refereres til CO₂-besparelser, er der tale om CO₂-ækvivalenter (CO₂e).

Alle hotspotanalyser i dette kapitel viser kun CO₂-udgiften for løsningerne.

De samlede besparelser vil være lavere, hvis alle energitiltag implementeres samtidig i Be18. Dette skyldes, at varmetabet ikke er lineært additivt, og at interne varmetilskud og temperaturbalance påvirker den samlede effekt ved helhedsoptimering.

Under udarbejdelsen af tilstandsrapporten blev det påpeget, at dampspærren i konstruktionerne muligvis allerede har overskredet den tekniske levetid, selvom levetidstabellerne angiver, at der stadig burde være omkring 24 år tilbage af den forventede levetid.

På denne baggrund tager alle forbedringsforslag udgangspunkt i, at dampspærren udskiftes og erstattes med en ny.

Dette sker på trods af, at BYG-ERFA fortæller, at efterisolering i tage kan gennemføres selv med et utilstrækkeligt dampspærre, så længe loftskonstruktionen vurderes som lufttæt, der ikke foreligger tegn på fugtproblemer i loftrummet og der er tilstrækkelig med ventilation i loftrummet (Eva B. Møller, 2021).

Da der i denne case ikke har været adgang til loftrummet, og der heller ikke har været mulighed for at vurdere lufttætheden, er denne løsning ikke blevet undersøgt nærmere – selvom løsningen potentielt kunne være mere rentabel, både økonomisk og i forhold til livscyklusvurderingen.

Udgangspunktet for forbedringsforslagene er, at der sigtes efter U-værdierne for ombygning, som fremgår af Tabel 4 i kap. 3.1 *Bygningsreglementet*, hvis dette er fugtteknisk muligt.

Alle LCA-beregninger fremgår af bilag 10 – *LCA-beregninger*

Alle LCC-beregninger fremgår af bilag 11 – *LCC-beregninger*

5.6.1 Forbedring af bygningsdele

I det følgende kapitel gennemgås og præsenteres alle analyserne til forbedringsforslagene.

5.6.1.1 Ydervægge.

5.6.1.1.1 213002 – Facade

Dette forbedringsforslag vurderer mulighederne for udvendig efterisolering af bygning A, der i dag består af en 370 mm massiv helstensfacade på i alt 385 m². Målet er at reducere bygningens varmetab og klimaaftryk, samtidig med at facaden bevarer sit eksisterende tegludtryk og ikke bidrager til en forøgelse af etagearealet. Den nuværende helstensfacade har en U-værdi på 1,49 W/m²K.

Følgende betingelser danner grundlaget for forbedringsforslagene:

- **Energikrav** – efterisoleringen skal nedbringe U-værdien til $\leq 0,30$ W/m²K i henhold til BR18 2025 for renovering (klasse 1 og 2).
- **Konstruktionsdybde** – den samlede udvendige opbygning må maksimalt være 250 mm (BR18 § 5, stk. 4), så projektet ikke udløser etagearealforøgelse.
- **Fugtsikkerhed** – indvendig isolering er fravalgt, da helstensvægge har høj risiko for fugtophobning (Michalik, et al., 2024), og fordi kravet til U-værdi ikke kan opnås inden for anbefalingen på 75 mm $\lambda 37$ iht. (Hansen, Høegh, Jensen, & Møller, 2022).
- **Arkitektur** – facaden skal visuelt harmonere med den eksisterende bebyggelse, selv om bygningen ikke er fredet eller registreret som bevaringsværdig.

I alle scenarier er de økonomiske og klimamæssige omkostninger til reduktion af linjetabet medregnet.

På den baggrund er der analyseret på to udvendige løsninger:

1. Skalmur med 125 mm mineraluld (samlet tykkelse ~ 240–250 mm).
2. Ophængt skærmtegl med 200 mm mineraluld (samlet tykkelse ~ 245 mm).

For begge løsninger gælder, at lambda-værdien på mineralulden er 0,034 W/mK.

Begge forslag er vurderet ud fra LCC- og LCA-beregninger over 50 år, herunder anlægspris, energibesparelse og CO₂-afkasttid.

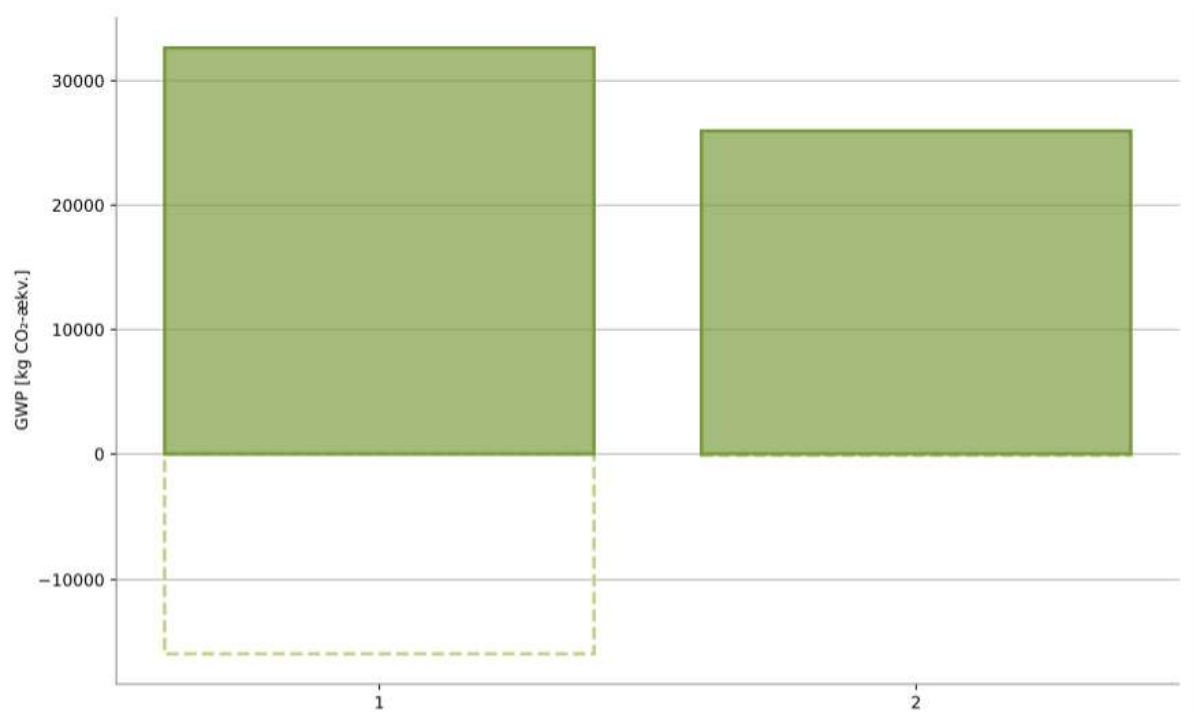
Tabel 21 viser og sammenligner alle nøgletallene for de to forskellige løsninger.

Variant	Løsning 1 Skalmur + 125 mm isolering	Løsning 2 Skærmtegl + 200 mm isolering
U-værdi (W/m ² K)	0,22	0,15
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	21,1	22,2
Anskaffelse (kr.)	1.400.000,00	1.800.000,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	1.600.303,00	2.057.392,00
Årlig besparelse (Kr.)	52.414	55.146
Tilbagebetalingstid (år)	27	33
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	274.384	287.370
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	25.965	32.641
CO ₂ -afkasttid (år)	5	6
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	248.419	254.729
Rentabel (LCC)	✓	✓
Rentabel (LCA)	✓	✓

Tabel 21 - Samlet overblik over de to løsninger.

Begge løsninger opfylder de tekniske krav, holder sig inden for 250 mm og fjerner kuldebroerne. Skærmtegl opnår den laveste U-værdi og den største kumulerede CO₂-besparelse, men den 26 % højere anlægspris, længere tilbagebetalingstid og større indlejret CO₂ taler imod den. Skalmursløsningen bevarer facadens oprindelige tegludtryk, har lavest indlejret CO₂ og når break-even et år hurtigere, mens den årlige energibesparelse kun er marginalt lavere. Skalmur med 125 mm mineraluld vurderes derfor som den mest optimale løsning, da den giver den bedste balance mellem økonomi, klima og arkitektonisk hensyn.

Figur 35 illustrerer grafisk, hvordan de to løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 35 - Hotspot for de to løsninger

- 1: Skalmur med 125 mm mineraluld – 25.965 Kg CO₂-ækv.
- 2: Ophængt skærmtegl med 200 mm mineraluld – 32.641 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.1.2 213006 - Let facade bygning B

Der er foretaget en vurdering af mulighederne for efterisolering af de lette facader på bygning B. De eksisterende lette facader står på en 73 cm høj skalmur, som fjernes. Den nye lette beklædning trækkes ud i samme plan som den tidligere teglvæg, hvilket giver plads til ekstra isolering. Den oprindelige konstruktion består af:

- 100 mm porebeton bagvæg
- 110 mm mineraluld i træskelet c/c 600
- vindpap, 25 mm afstandslister og Rockvitplader

Rockvitplader, afstandslister og vindpap udskiftes til 9 mm vindgips, nye afstandslister og en ny let facadeplade. Træskelletet påføres til samlet 240 mm og føres helt ned til soklen. Det nye facadeareal udgør 111 m².

Den oprindelige U-værdi var 0,31 W/m²K for den lette del og 0,25 W/m²K for skalmuren.

På den baggrund er der analyseret på tre løsninger:

1. 240 mm ny mineraluld (samlet tykkelse ~ 240mm). Alt isoleringen udskiftes.
2. Eksist. + ny isolering (samlet tykkelse ~ 220mm). Der bibeholdes 110 mm isolering med tilføjelse af 110 mm ny mineraluld.
3. 240 mm papiruld (samlet tykkelse ~ 240mm). Alt isoleringen udskiftes til papiruld.

For løsningsforslag 1 og 2 gælder, at lambda-værdien på den nye mineraluld er 0,034 W/mK. Lambda-værdien for papirulden er 0,36 W/mK.

Tabel 22 viser og sammenligner nøgletallene for de tre løsninger.

Variant	Løsning 1 240 mm ny mineraluld	Løsning 2 Eksist. og ny isolering	Løsning 3 Papiruld
U-værdi (W/m ² K)	0,14	0,16	0,15
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,6	0,5	0,6
Anskaffelse (kr.)	246.989,00	230.400,00	266.957,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	325.870,00	293.596,00	369.098,00
Årlig besparelse (Kr.)	1.490	1.242	1.490
Tilbagebetalingstid (år)	166	186	179
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	7.083	7.083	7.083
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	2.579	2.037	1.546
CO ₂ -afkasttid (år)	18	14	11
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	4.505	5.046	5.537
Rentabel (LCC)	×	×	×
Rentabel (LCA)	✓	✓	✓

Tabel 22 - Samlet overblik over de tre løsninger.

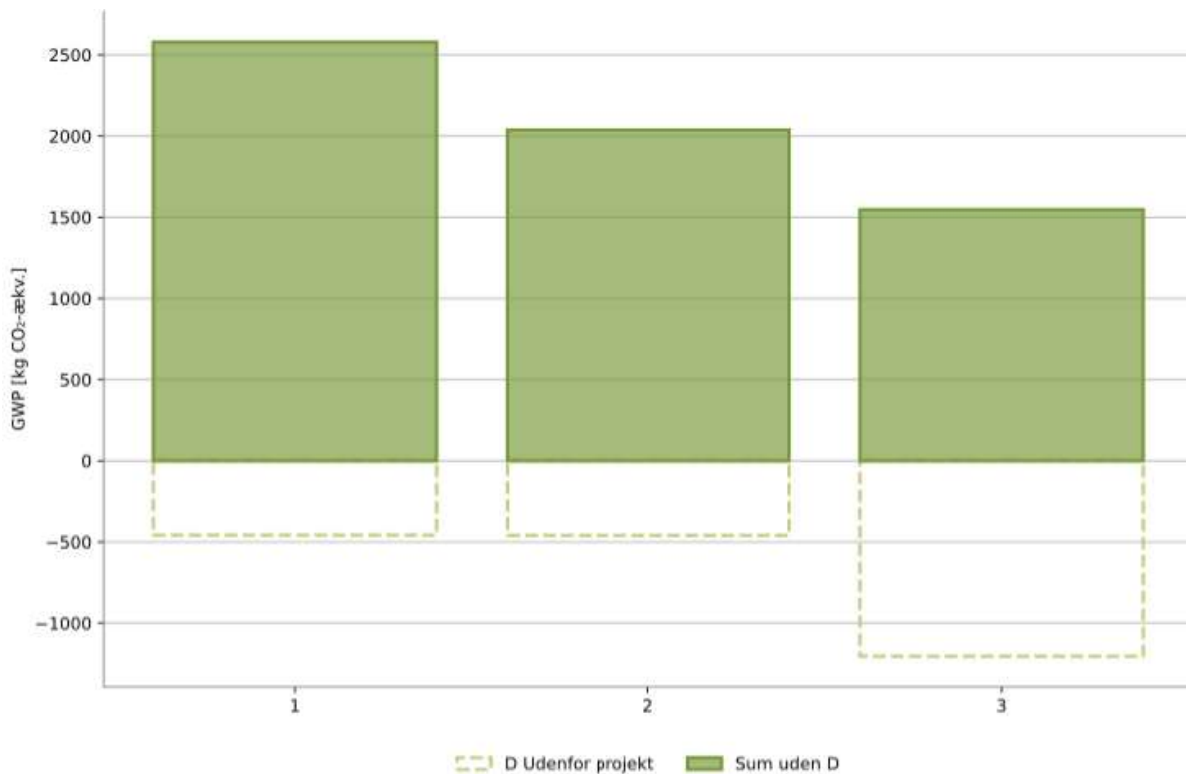
Alle tre løsninger reducerer varmetabet uden at ændre facadeplanet. *Løsning 1* opnår den laveste U-værdi og ca. 20 % højere energibesparelse end *løsning 2*, men har samtidig en 7 % højere anlægsudgift og en CO₂-afkasttid, der er ca. 30 % længere.

Løsning 3 har den korteste CO₂-afkasttid – ca. 20 % hurtigere end *løsning 2* – samt den laveste indlejrede CO₂-belastning, men er samtidig den dyreste med 16 % højere anskaffelsesomkostninger.

Løsning 2 ligger kun marginalt over de bedste værdier for U-værdi og energibesparelse, har den laveste investering og næst korteste CO₂-afkasttid.

Selv om ingen af løsningerne opnår økonomisk-rentabilitet inden for en 50-årig analyseperiode, vurderes løsning 2 til at give den bedste helhedsbalance mellem økonomi, klimabelastning og teknisk ydeevne.

Figur 36 illustrerer grafisk, hvordan de tre løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 36 - - Hotspot for de tre forskellige løsninger

1: 240 mm ny mineraluld – 2.579 Kg CO₂-ækv.

2: Eksist. og ny isolering – 2.037 Kg CO₂-ækv.

3: Papiruld – 1.546 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.1.3 213004 - Halvstensvæg - gavl og brystning 1 sal bygning b

Der er foretaget en vurdering af mulighederne for efterisolering af halvstensvæggen på Bygning B (gavle, brystningsvægge på 1. sal samt facaden omkring den udvendige trappe). Som ved Bygning A skal det oprindelige tegludtryk bibeholdes efter renoveringen.

Den nuværende halvstensvæg består af:

- 100 mm lecablokke,
- 110 mm mineraluld ($\lambda = 0,042 \text{ W/mK}$) og
- 108 mm skalmur i tegl.

Den oprindelige U-værdi er $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

På den baggrund er der analyseret på to løsninger:

1. Indvendig efterisolering med 75 mm mineraluld i stålskelet (c/c 600 mm) og dampspærre. (samlet tykkelse ~ 100mm).
2. Ny skalmur med 108 mm tegl og 125 mm mineraluld (samlet tykkelse ~ 240mm).

Indvendig efterisolering vurderes som en relevant løsning, da den eksisterende væg allerede har en forholdsvis lav U-værdi og er opbygget som en hulmur. Det er dog vigtigt at bemærke, at denne type løsning kan øge risikoen for skimmelvækst, jf. (Michalik, et al., 2024). Risikoen opstår primært som følge af lavere indvendige overfladetemperaturer og reduceret udtørningspotentiale, hvilket stiller særlige krav til den fugttekniske udformning.

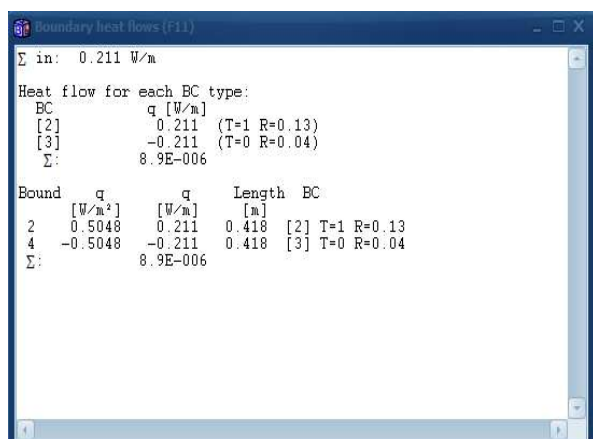
Trods den teoretiske risiko vurderes løsningen som fugtteknisk forsvarlig, netop fordi konstruktionen er en hulmur: Slagregn trænger ikke længere ind end hulrummet, og murværket beskyttes dermed mod gennemfugtning. Simuleringer udført i WUFI – herunder både WUFI Bio og VTT-modellen, se Figur 37 – viser, at hverken forsiden af isoleringen eller den indvendige vægoverflade når kritiske niveauer for temperatur eller relativ fugtighed. Der observeres derfor ingen risiko for skimmelvækst, hvilket yderligere dokumenteres i bilag 12 – Wufi-simuleringer.



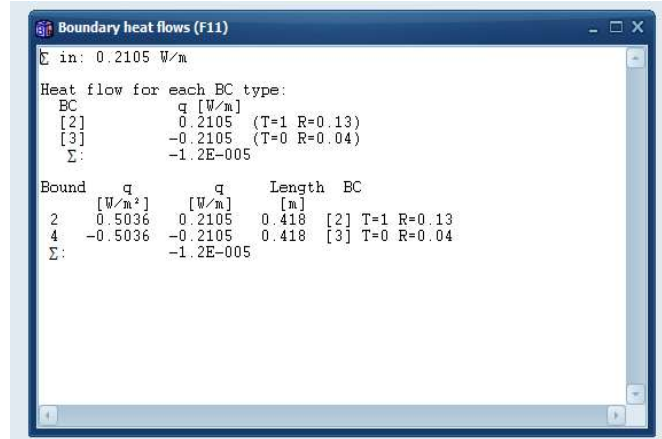
Figur 37 - WUFI Bio og WUFI VTT viser, at der ikke er skimmelproblematikker i isoleringslaget.

Disse resultater er i overensstemmelse med anbefalingerne i (Hansen, Høegh, Jensen, & Møller, 2022), hvor det fremhæves, at korrekt udført indvendig isolering ikke nødvendigvis fører til skimmelproblemer.

U-værdien for den samlede vægopbygning med indvendig efterisolering er beregnet ved hjælp af HEAT2, da væggen indeholder et stålskelet, hvilket nødvendiggør en todimensionel beregning. Beregningerne viser, at anvendelse af 75 mm mineraluld – uanset om



Figur 38 - mineraluld lambda 37.



Figur 39 - mineraluld lambda 34.

lambdaværdien er 0,034 eller 0,037 W/mK – resulterer i en samlet U-værdi på 0,21 W/m²K. Dette indikerer, at forskellen i lambdaværdien mellem de to isoleringstyper ikke har nogen væsentlig indflydelse på varmetransmissionen gennem konstruktionen. Resultaterne fremgår af Figur 38 og Figur 39. Beregningen kan ligeledes findes i *Bilag 7 – HEAT2-simuleringer*.

Tabel 23 viser og sammenligner nøgletallene for de to løsninger.

Variant	Løsning 1 75 mm indvendig iso.	Løsning 3 Skalmur
U-værdi (W/m²K)	0,21	0,13
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,3	0,7
Anskaffelse (kr.)	186.258	403.636
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	366.894	461.340
Årlig besparelse (Kkr.)	745	1.739
Tilbagebetalingstid (år)	250	232
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	3.542	8.264
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	976	7.576
CO ₂ -afkasttid (år)	14	46
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	2.566	688
Rentabel (LCC)	✗	✗
Rentabel (LCA)	✓	✓

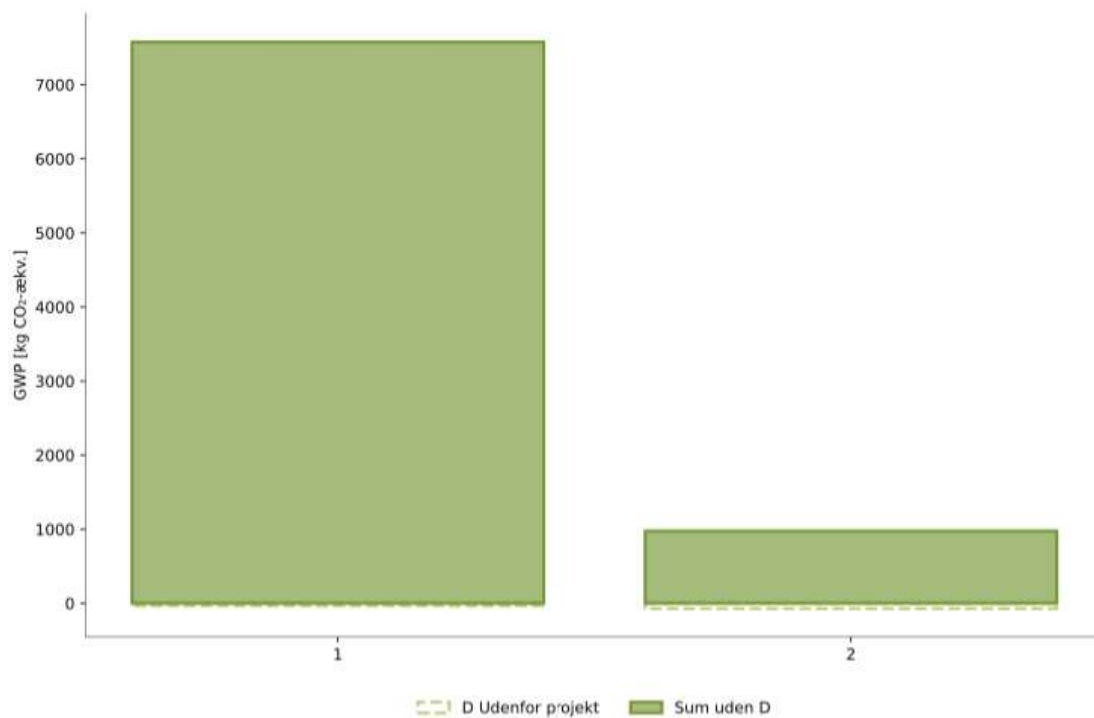
Tabel 23 - Samlet overblik over de to løsninger.

Begge løsninger reducerer varmetabet uden at ændre facadeplanet. Løsningen med skalmur opnår den laveste U-værdi og ca. 40 % højere energibesparelse sammenlignet med den indvendige efterisolering. Til gengæld er anlægsudgiften mere end 120 % højere, og CO₂-afkasttiden er over tre gange så lang.

Den indvendige løsning kræver den laveste investering og opnår den korteste CO₂-afkasttid.

Selvom ingen af løsningerne er økonomisk rentable inden for en 50-årig analyseperiode, vurderes den indvendige efterisolering at give den bedste helhedsbalance mellem økonomi, klimaaftryk og teknisk ydeevne.

Figur 40 illustrerer grafisk, hvordan de to løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 40 - Hotspot for de to løsninger

1: Skalmur – 976 Kg CO₂-ækv.

2: 75 mm indvendig iso.– 7.576 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.1.4 214001/214004 - Let facade, bygning A og Let ydervæg, bygning C

Der er foretaget en vurdering af mulighederne for efterisolering af de lette facader på bygning A (karnap) og bygning C (tilbygning). Konstruktionerne er ens, og de 32 m² + 68 m² behandles derfor samlet som én væg på 100 m².

Den oprindelige konstruktion består af:

- 12 mm gips
- 22 mm forskalling c/c 300 mm
- 0,15 mm PE-folie (dampspærre)
- 195 mm mineraluld med bærende træskelet c/c 600 mm
- vindpap, 25 mm afstandslister
- Rockvit-facadeplade

Den nuværende U-værdi er 0,21 W/m²K.

Baggrund for forbedring

Dampspærren udskiftes til ny PE-folie, vindpappen erstattes af vindgips, og der monteres en ny facadebeklædning for at sikre lufttæthed. Vægtykkelsen kan ikke øges, så analysen handler om, hvorvidt det kan betale sig at udskifte den eksisterende isolering.

På den baggrund er der analyseret på tre løsninger:

1. Beholde den eksisterende 195 mm mineraluld ($\lambda = 0,042$ W/mK).
2. Udskifte til 195 mm ny mineraluld ($\lambda = 0,034$ W/mK).
3. Udskifte til 195 mm papiruld ($\lambda = 0,036$ W/mK).

Tabel 24 viser og sammenligner nøgletallene for de tre løsninger.

Variant	Løsning 1 Eksist. isolering	Løsning 2 Mineraluld, 195 mm	Løsning 3 Papiruld, 195 mm
U-værdi (W/m ² K)	0,21	0,18	0,19
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	-	0,2	0,2
Anskaffelse (kr.)	220.800	260.300	278.800
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	416.814	474.965	514.254
Årlig besparelse (Kr.)	-	497	497
Tilbagebetalingstid (år)	-	524	561
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	-	1181	1181
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	1.581	2.389	2.083
CO ₂ -afkasttid (år)		101	88
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	-1.581	-1.208	-902
Rentabel (LCC)	X	X	X
Rentabel (LCA)	X	X	X

Tabel 24 - Samlet overblik over de tre løsninger.

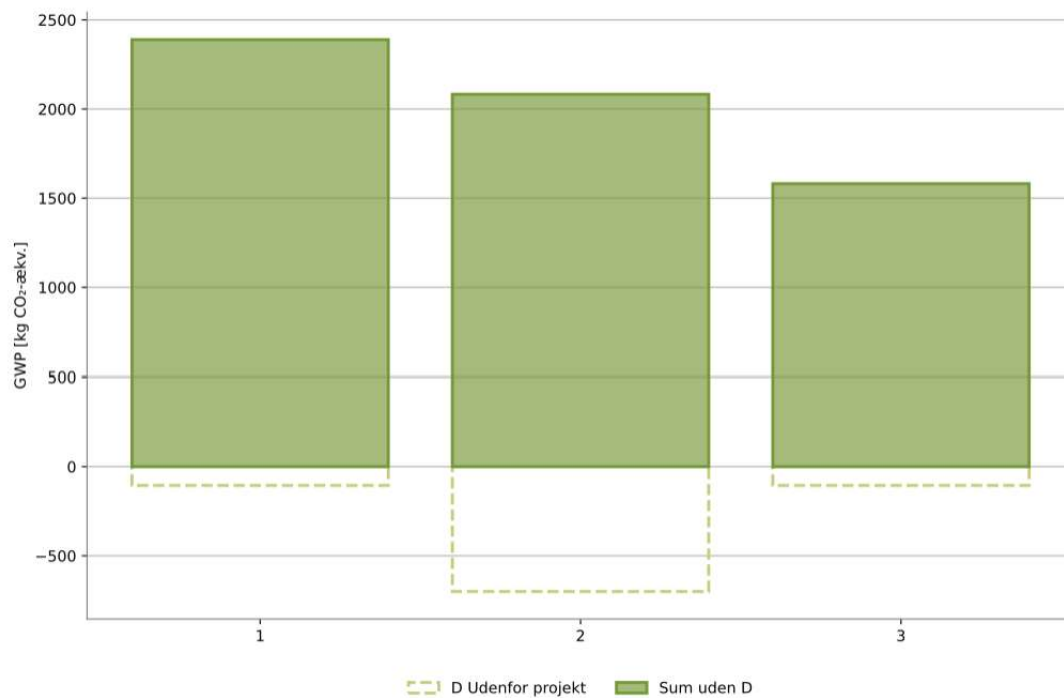
Alle tre løsninger fastholder vægtykkelsen og ændrer ikke facadeplanet. *Løsning 2* opnår den laveste U-værdi, men kræver en anlægsudgift, der er ca. 18 % højere end *løsning 1*, og har en CO₂-afkasttid på omkring 100 år.

Løsning 3 har den korteste CO₂-afkasttid – cirka 13 % hurtigere end *løsning 2* – og en lidt lavere indlejret CO₂-belastning. Til gengæld er anlægsprisen yderligere ≈ 7 % højere, og forbedringen af U-værdien er mindre.

Løsning 1 er den billigste, men medfører ingen energibesparelse og giver en negativ CO₂-balance, da der ikke opnås nogen reduktion i driftsrelateret CO₂-udledning.

Da ingen af de tre løsningsforslag vurderes rentable – hverken økonomisk eller klimamæssigt – inden for en 50-årig analyseperiode, anbefales det at bevare den eksisterende isolering. Der kan dog foretages udskiftning af dampspærre, vindspærre og facadebeklædning, hvis det viser sig, at dampspærrens levetid er overskredet.

Figur 41 illustrerer grafisk, hvordan de tre løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 41 - Hotspot for de tre løsninger
1: Mineraluld, 195 mm – 2.389 Kg CO₂-ækv.
2: Papiruld, 195 mm.– 2.083Kg CO₂-ækv.
3: Eksist. isolering - 1.581 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.1.5 213005 og 213007 bygning D

Der er foretaget en vurdering af mulighederne for efterisolering af de lette facader på bygning D. Som på bygning B står den eksisterende lette væg oven på en 73 cm fremskudt skalmur, som fjernes, hvorefter den nye facade trækkes ud i samme plan som teglvæggen. Dermed kan isoleringstykkelsen øges, mens facadeplanet bevarer.

Den oprindelige konstruktion består af:

- 100 mm porebetonblokke.
- 150 mm mineraluld (klasse 39) i træskelet 145 mm, stolper c/c 1000 mm.
- Vindpap.
- 45 mm afstandslister.
- 28 mm forskalling.
- 8 mm Rockvitplader.

Den oprindelige U-værdi er 0,24 W/m²K med et facadeareal på 40 m².

Baggrund for forbedring

Rockvitplader, afstandslister og vindpap udskiftes til 9 mm vindgips, nye afstandslister og en ny facadeplade, mens tegl fra skalmuren nedtages og deponeres til fremtidige reparationer. Træskelletet udbygges med 95 mm, så den samlede isoleringstykkelse bliver 240 mm ned til sokkel.

På den baggrund er der analyseret på tre løsninger:

1. Gammel + ny isolering – 145 mm eksisterende mineraluld suppleres med 95 mm ny mineraluld ($\lambda = 0,034$ W/mK).
2. Ny mineraluld, klasse 34 – al isolering udskiftes til 240 mm ny mineraluld.
3. Papiruld – al isolering udskiftes til 240 mm papiruld ($\lambda = 0,036$ W/mK).

Tabel 25 viser og sammenligner nøgletallene for de tre løsninger.

Variant	Løsning 1 Gammel og ny isolering	Løsning 2 Ny klasse 34	Løsning 3 Papiruld
U-værdi (W/m²K)	0,15	0,14	0,15
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,1	0,1	0,1
Anskaffelse (kr.)	113.720	118.000	125.800
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	200.482	210.574	227.460
Årlig besparelse (Kr.)	248	248	248
Tilbagebetalingstid (år)	458	475	506
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	1181	1181	1181
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	809	1030	899
CO₂-afkasttid (år)	34	44	38
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	371	150	282
Rentabel (LCC)	✗	✗	✗
Rentabel (LCA)	✓	✓	✓

Tabel 25 - Samlet overblik over de tre forskellige varianter.

Alle tre løsninger reducerer U-værdien til omkring 0,15 W/m²K og medfører dermed samme energibesparelse. Forskellene ligger i anlægsomkostninger og CO₂-profil.

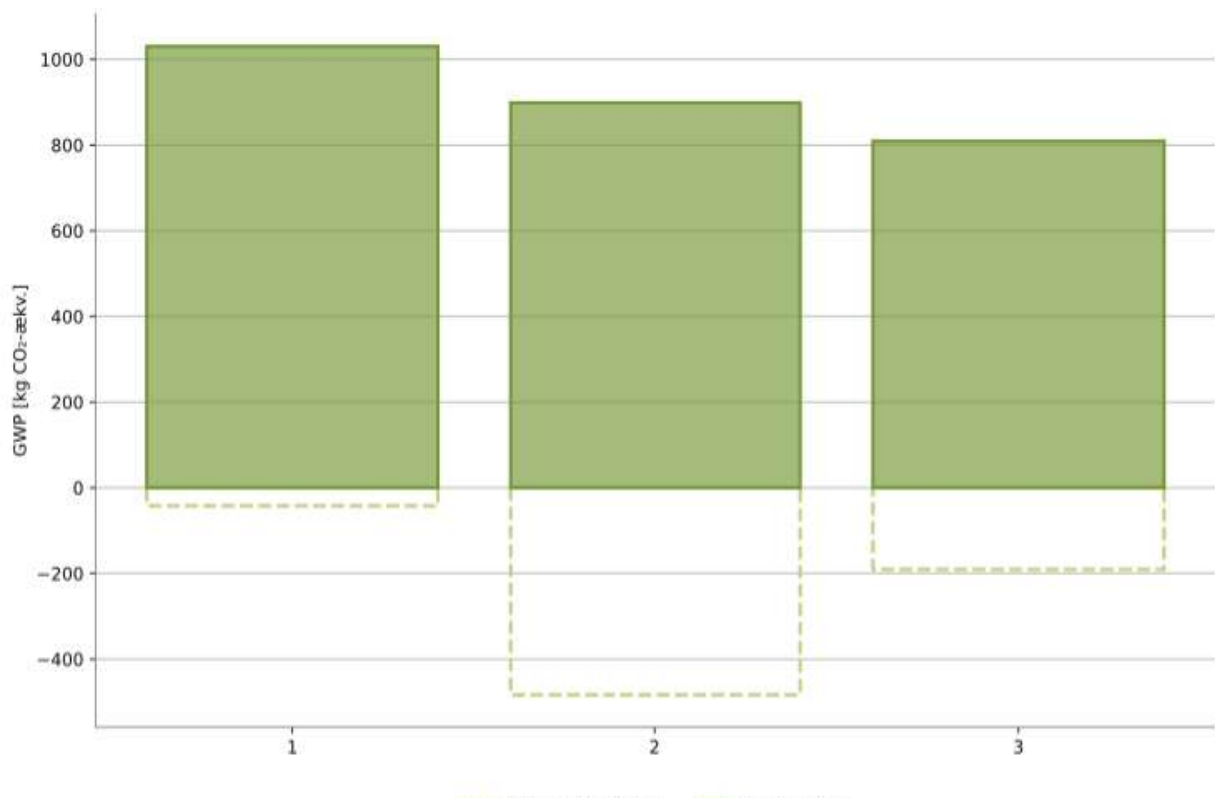
Løsning 2 isolerer marginalt bedre, men har en ca. 4 % højere anlægspris og en CO₂-afkasttid, der er 10 år længere end løsning 1.

Løsning 3 har næst korteste CO₂-afkasttid og lavere indlejret CO₂ end løsning 2, men er cirka 11 % dyrere end løsning 1 og medfører ingen forbedring af U-værdien.

Løsning 1 kombinerer laveste investering, korteste CO₂-afkasttid og den største samlede CO₂-besparelse over en 50-årig periode. U-værdien er kun marginalt højere end de to andre løsninger.

Da ingen af løsningsforslagene opnår økonomisk rentabilitet inden for analyseperioden, vurderes *løsning 1* som den løsning, der giver den mest fordelagtige balance mellem økonomi, CO₂-afkast og teknisk ydeevne.

Figur 42 illustrerer grafisk, hvordan de tre løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 42 - Hotspot for de tre løsninger

1: Ny klasse 34 – 1030 Kg CO₂-ækv.

2: Papiruld – 899 Kg CO₂-ækv.

3: Gammel og ny isolering - 809 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.2 Tage

5.6.1.2.1 Byg. A_ 271001 - Tag / 351001 – Loft

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af spidsloftet i bygning A (232 m²). Eksisterende isolering, dampspærre og gips nedtages; der lægges ny dampspærre, ny isolering og nye gipslofter. Målet er at bringe U-værdien fra 0,17 ned til 0,12 W/m²K.

På den baggrund er der analyseret på fire løsninger:

1. 300 mm mineraluld ($\lambda = 0,034$ W/mK).
2. 325 mm papiruld ($\lambda = 0,036$ W/mK).
3. 325 mm træfiber ($\lambda = 0,036$ W/mK).
4. 200 mm PIR-isolering ($\lambda = 0,022$ W/mK).

Tabel 26 viser og sammenligner nøgletallene for de fire løsninger.

Variant	Løsning 1 Mineraluld	Løsning 2 Træfiber	Løsning 3 Papiruld	Løsning 4 Pir-isolering
U-værdi (W/m²K)	0,12	0,12	0,12	0,12
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,5	0,5	0,5	0,5
Anskaffelse (kr.)	446.600	530.700	484.300	649.600
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	708.390	856.016	786.439	1.034.309
Årlig besparelse (Kr.)	1.242	1.242	1.242	1.242
Tilbagebetalingstid (år)	360	427	390	523
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	5.903	5.903	5.903	5.903
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	5.405	14.021	4.460	68.688
CO₂-afkasttid (år)	46	119	38	582
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	498	-8.118	1.443	-62.785
Rentabel (LCC)	✗	✗	✗	✗
Rentabel (LCA)	✓	✗	✓	✗

Tabel 26 - Samlet overblik over de fire løsninger.

Alle løsninger har samme energibesparelse. Forskellene findes derfor alene i anlægspris og klimaprofil.

Mineraluld er den billigste løsning og har den korteste økonomiske tilbagebetalingstid samt næstlaveste CO₂-afkasttid.

Papiruld er 8 % dyrere end mineraluld, men har en lavere indlejrede CO₂ med ca. 18 % og forkorter CO₂-afkasttiden til 38 år – den laveste blandt alle fire løsninger.

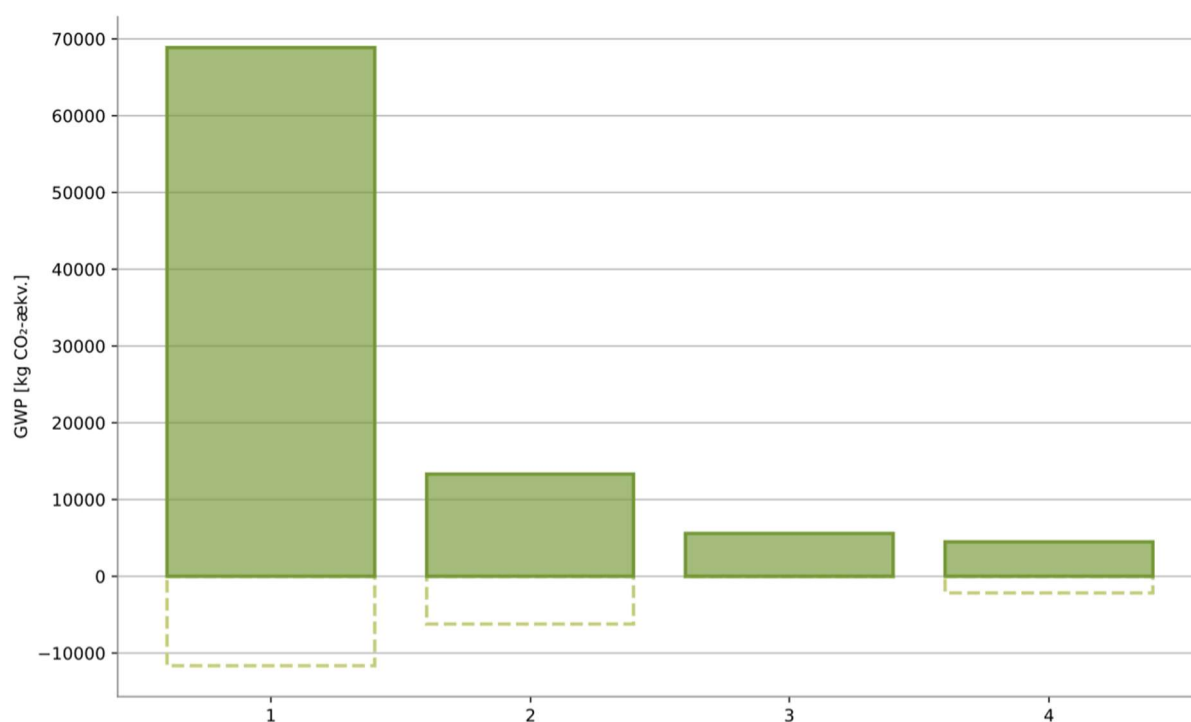
Træfiberisolering har en investering, der er 19 % højere end papiruld og den næst længste CO₂-afkasttid. Den negative klimabalance skyldes antagelsen om forbrænding som end-of-life-behandling.

PIR-isolering har den højeste anlægspris (ca. 46 % højere end mineraluld) og den største indlejrede CO₂-belastning, hvilket medfører en CO₂-afkasttid på over 500 år.

Ingen af materialerne opnår økonomisk rentabilitet inden for analyseperioden. Dog vurderes både papiruld og mineraluld at være LCA-rentable.

Papiruld vurderes at have den bedste samlede klimaprofil og næstlaveste anlægsomkostning og vurderes derfor at have den bedste balance mellem økonomi og CO₂-afkast. Mineraluld kan dog anvendes som et acceptabelt alternativ, hvis økonomiske hensyn vægtes højere end CO₂-afkast.

Figur 43 illustrerer grafisk, hvordan de fire løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 43 - Hotspot for de fire løsninger

1: Pir-isolering – 68.688 Kg CO₂-ækv.

2: Træfiber – 14.021 Kg CO₂-ækv.

3: Mineraluld – 5.405 Kg CO₂-ækv.

4: Papiruld – 4.460 Kg CO₂-ækv.

Mellemdiskussion

Det er dog vigtigt at gøre opmærksom på en metodisk usikkerhed i de generiske EPD-data, der er anvendt for træfiberisolering. Den relativt høje CO₂-belastning for træfiber (14.021 kg CO₂-ækv.) skyldes ifølge datagrundlaget primært antagelsen om, at materialet bliver brændt ved livscyklussens afslutning. Denne behandling medfører en frigivelse af den biogene kulstof, som materialet ellers har lagret i brugsfasen. Hvis der i stedet antages en affaldsstrategi, hvor træfiberisolering deponeres eller genanvendes uden forbrænding, vil denne biogene CO₂ ikke nødvendigvis frigives, og det samlede klimabidrag kunne derfor være lavere.

Til sammenligning antager EPD'en for mineraluld, som i analysen har et lavere GWP-bidrag (5.405 kg CO₂-ækv.), at materialet deponeres uden væsentlig kulstoffrigivelse ved slutningen af levetiden. Det betyder, at forskellen i klimabelastning mellem træfiber og mineraluld afhænger af, hvordan de respektive materialer håndteres i affaldsfasen.

Selvom papiruld stadig vurderes som det bedste valg på baggrund af de tilgængelige data, bør det nævnes, at resultaterne for træfiber kan være påvirket af usikkerheder i slutbehandlingsantagelserne. En ændret affaldshåndtering for træfiber kan potentielt forbedre dens klimaprofil og ændre den relative rangering mellem materialerne.

I de følgende scenarier for tagkonstruktionerne anvendes derfor papiruld som standardisolering, og der sammenlignes ikke på tværs af flere isoleringsmaterialer, medmindre det vurderes relevant i forhold til den enkelte konstruktionens opbygning.

5.6.1.2.2 Byg. A_271002 Tag/skråvægge

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af skråvæggene i bygning A på 114 m² med en eksisterende U-værdi på 0,24 W/m²K. I forbindelse med tiltaget fjernes den eksisterende gipsbeklædning, dampspærre og mineraluldsisolering. Den nuværende forskalling genbruges.

Der er regnet på fire forskellige scenarier, hvor to løsninger øger tykkelsen på den eksisterende konstruktion ved at øge nedstropningen og tilføje mere isolering, mens konstruktionen bevares på de to andre scenarier. Der regnes på både papiruld og pir-isolering i begge konstruktionsvarianter.

Ved udskiftning til isolering i klasse 36 kan U-værdien forbedres til 0,22 W/m²K. Alternativt kan der opnås en U-værdi på 0,15 W/m²K ved brug af PIR-isolering. Hvis loftet i stedet nedstropes til 225 mm (fra nuværende 75 mm), kan der installeres yderligere 150 mm isolering, hvilket giver en U-værdi på 0,12 W/m²K. Ved brug af PIR-isolering kan nedstropningen reduceres til 120 mm (en forøgelse på 45 mm) og stadig opnå samme U-værdi.

På den baggrund er der analyseret på fire løsninger:

1. Papiruld (1) – U = 0,22 W/m²K (Ingen nedstropning).
2. Papiruld (2) – U = 0,12 W/m²K (Nedstropning).
3. PIR-isolering (1) – U = 0,15 W/m²K (Ingen nedstropning).
4. PIR-isolering (2) – U = 0,12 W/m²K (Nedstropning).

Tabel 27 viser og sammenligner nøgletallene for de fire løsninger.

Variant	Løsning 1 Papiruld (1)	Løsning 2 Papiruld (2)	Løsning 3 Pir - isolering (1)	Løsning 4 Pir-isolering (2)
U-værdi (W/m²K)	0,22	0,12	0,15	0,12
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,1	0,7	0,4	0,7
Anskaffelse (kr.)	307.088	353.400	388.313	434.625
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	478.618	540.429	600.415	662.226
Årlig besparelse (Kr.)	248	1.739	994	1.739
Tilbagebetalingstid (år)	1.236	203	391	250
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	1.181	7.083	4.722	7.083
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	1.825	2.302	33.752	41.078
CO₂-afkasttid (år)	77	16	357	290
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	-645	4.782	-29.030	-33.995
Rentabel (LCC)	✗	✗	✗	✗
Rentabel (LCA)	✗	✓	✗	✗

Tabel 27 - Samlet overblik over de fire forskellige varianter.

Alle løsninger medfører kun marginale energibesparelser, forskellene ses derfor primært ud fra anlægskostning og CO₂-profil.

Papiruld (variant 2) har den korteste CO₂-afkasttid og den største samlede CO₂-besparelse. Anlægsprisen er kun ca. 15 % højere end den billigste løsning. Derudover er løsningen den eneste som opnår LCA-rentabilitet.

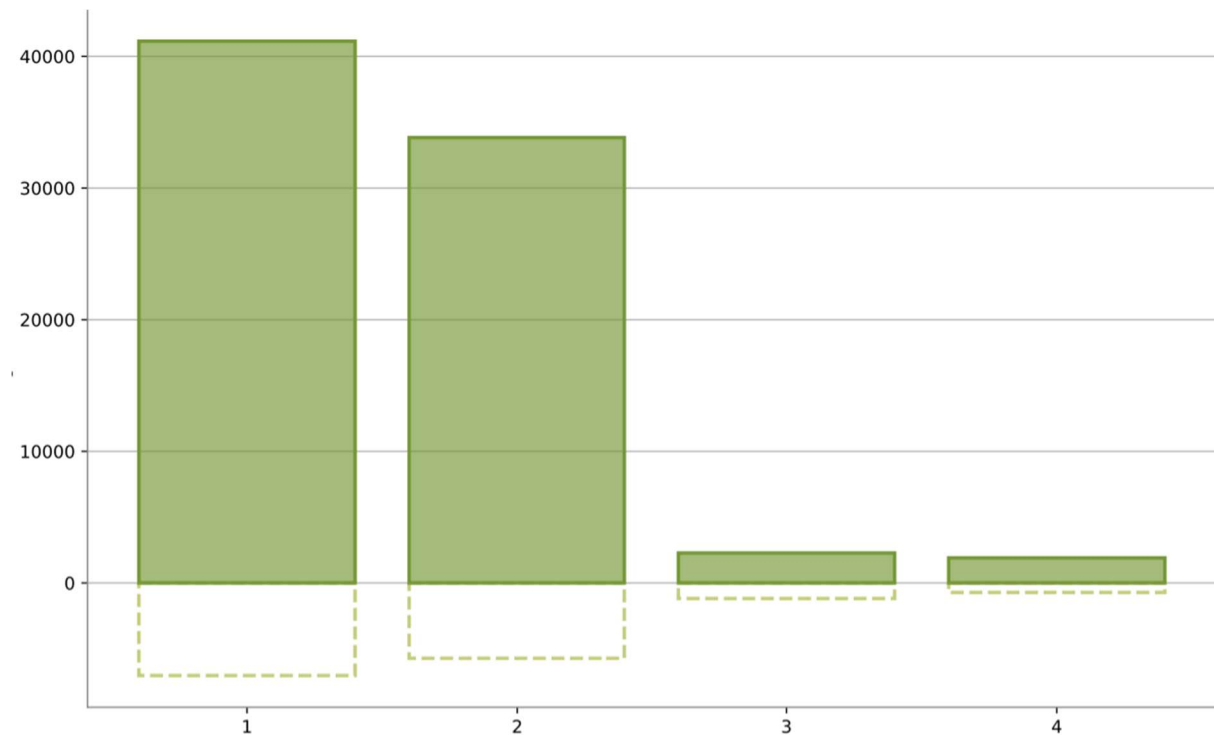
Papiruld (variant 1) er den billigste løsning, men giver den mindst effektive U-værdi-forbedring og har en CO₂-afkasttid, der er næsten fem gange længere end variant 2.

Begge PIR-varianter kræver mindst 25 % højere investering end papiruld (variant 2) og har høje indlejrede CO₂-udledninger, hvilket resulterer i lange CO₂-afkasttider.

Ingen af løsningerne er økonomisk rentable inden for analyseperioden.

Papiruld med nedstropning (variant 2) vurderes at give den bedste balance mellem teknisk ydeevne, anlægspris og klimaeffekt.

Figur 44 illustrerer grafisk, hvordan de fire løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 44 - Hotspot for de fire forskellige varianter

1: Pir-isolering (2) – 41.078 Kg CO₂-ækv.

2: Pir-isolering (1) – 33.752 Kg CO₂-ækv.

3: Papiruld (2) – 2.302 Kg CO₂-ækv.

4: Papiruld (1) – 1.825 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.2.3 Byg. A_371001 – Kvisttag / 371002 - Kvistvæg

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af kvisttage og kvistvægge i bygning A, som samlet dækker et areal på 102 m², fordelt med 51 m² på henholdsvis tag- og vægkonstruktionerne. Den eksisterende U-værdi for begge konstruktionstyper er 0,24 W/m²K. I forbindelse med tiltaget fjernes den eksisterende gipsbeklædning, dampspærre og mineraluldsisolering. Den nuværende forskalling genbruges.

Da der ikke er mulighed for nedstropning i konstruktionen, fokuserer analysen udelukkende på optimering af den eksisterende isoleringstykkelse ved anvendelse af materialer med lavere lambdaværdi. PIR-isolering er udeladt af analysen, da tidligere undersøgelser (jf. *kap.5.6.1.2.2 Byg. A_271002 Tag/skråvægge*) har vist, at løsningen ikke er rentabel hverken økonomisk eller klimamæssigt. Der sammenlignes derfor kun mellem papiruld i klasse 37 og mineraluld i klasse 34.

Ved brug af mineraluld kan U-værdien forbedres til 0,21 W/m²K for kvisttagene og 0,20 W/m²K for kvistvæggene. Ved brug af papiruld kan der opnås en U-værdi på 0,22 W/m²K for begge konstruktioner. Forskellen i U-værdierne ved mineraluldsløsningen skyldes variationer i overgangsisolanserne mellem de to konstruktionstyper.

Efter indtastning af de forbedrede U-værdier i Be18, kan det bestemmes, at det ikke har nogen betydning for energibehovet, at U-værdien bliver reduceret til 0,22 W/m²K. På den baggrund udgår papiruld for den resterende del af analysen.

Tabel 28 viser nøgletallene for løsningen med mineraluld.

Variant	Mineraluld
U-værdi (W/m ² K)	0,20
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,1
Anskaffelse (kr.)	210.375
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	333.679
Årlig besparelse (Kr.)	248
Tilbagebetalingstid (år)	847
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	1.181
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	1.954
CO ₂ -afkasttid (år)	83
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	-773
Rentabel (LCC)	✗
Rentabel (LCA)	✗

Tabel 28 - Samlet overblik over mineraluldsløsningen.

Udskiftning til klasse 34-mineraluld reducerer U-værdien med ca. 17 %, men den resulterende energibesparelse er næsten ubetydelig. Investeringen er estimeret til ca. 210.000 kr., hvilket medfører en tilbagebetalingstid på over 800 år.

CO₂-afkasttiden er beregnet til 83 år, og den samlede nettoeffekt over en 50-årig periode er dermed negativ.

Løsningen vurderes derfor at være hverken økonomisk- eller LCA-rentabel.

Da der ikke er nogle alternativer at sammenligne med, er der ikke indsat nogen Hotspotanalyse for dette tiltag.

5.6.1.2.4 Byg. A_214003 – Skunkvæg / 334009 – Skunkgulv

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af skunkvægge og skunkgulve i bygning A. Skunkvæggen udgør et areal på 102 m² og har en eksisterende U-værdi på 0,17 W/m²K, mens skunkgulvet udgør 62 m² med en eksisterende U-værdi på 0,16 W/m²K.

Skunkgulvet er opbygget på et betondæk, dampspærren er derfor overflødig. Her bibeholdes den eksisterende 250 mm isolering, og der efterisoleres med 70 mm papiruld. Denne løsning giver en samlet U-værdi på 0,12 W/m²K og er medtaget i begge scenarier, da tidligere analyser har vist, at papiruld i lignende efterisoleringsscases er den mest fordelagtige løsning set ud fra et LCA-perspektiv.

I forbindelse med tiltaget på skunkvæggen fjernes den eksisterende gipsbeklædning, dampspærre og mineraluldsisolering. Den eksisterende forskalling genbruges.

Der sammenlignes imellem to løsninger:

1. Udskiftning til mineraluld i klasse 34.
2. Udskiftning til papiruld med forøgelse af vægtykkelsen.

Ved mineraluld kan U-værdien forbedres til 0,14 W/m²K. Ved papiruld forøges vægtykkelsen med 95 mm, hvilket giver en U-værdi på 0,11 W/m²K.

Tabel 29 viser og sammenligner nøgletallene for de to løsninger.

Variant	Løsning 1 Mineraluld	Løsning 2 Papiruld
U-værdi (W/m²K)	0,14	0,12
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,2	0,3
Anskaffelse (kr.)	216.188	237.608
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	342.394	447.979
Årlig besparelse (Kr.)	497	745
Tilbagebetalingstid (år)	435	319
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	2.361	4.722
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	2.296	2.178
CO₂-afkasttid (år)	49	23
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	65	2.544
Rentabel (LCC)	✗	✗
Rentabel (LCA)	✓	✓

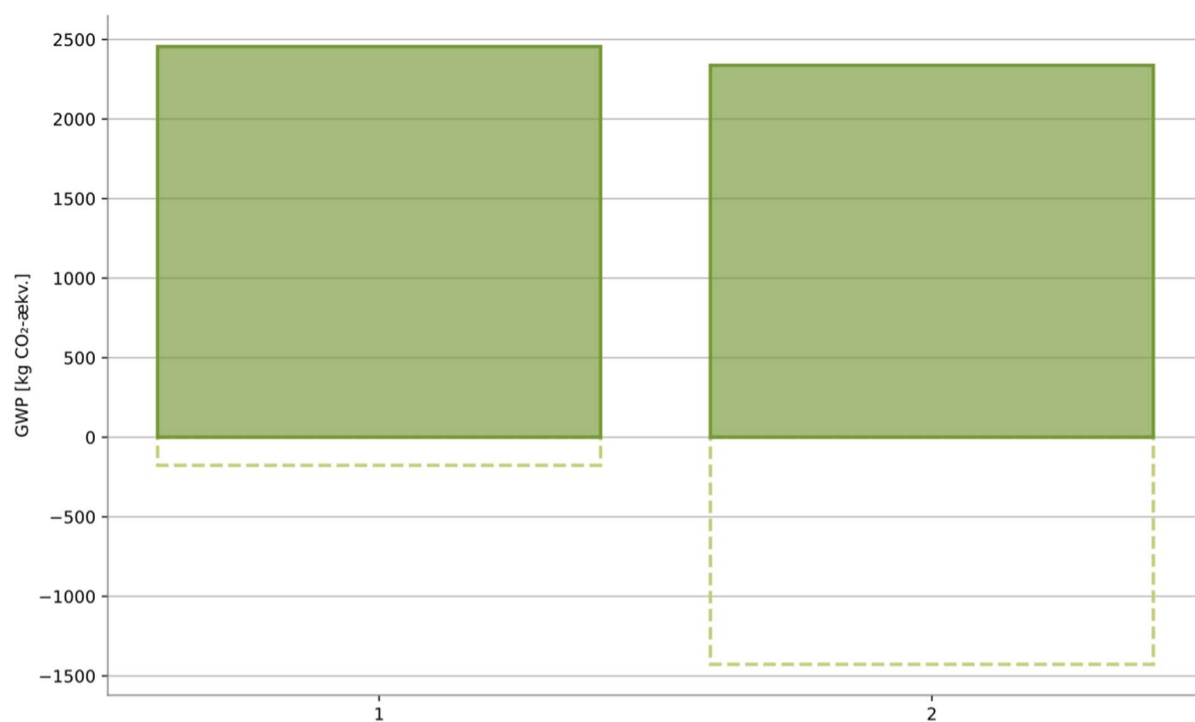
Tabel 29 - Samlet overblik over de to løsninger.

Løsningen med papiruld har en mere fordelagtig klimaprofil end løsningen med mineraluld. Energibesparelsen er højere, og CO₂-besparelsen i driftsfasen fordobles. Samtidig er den indlejrede CO₂-belastning en smule lavere end ved anvendelse af mineraluld.

Selvom anlægsomkostningerne for papiruld er en smule højere, opvejes dette af en kortere tilbagebetalingstid – både økonomisk og klimamæssigt. Den klimarelaterede tilbagebetalingstid reduceres til under det halve sammenlignet med mineralulds-løsningen.

På baggrund vurderes papiruld at give den bedste balance mellem teknisk ydeevne, anlægspris og klimaeffekt.

Figur 45 illustrerer grafisk, hvordan de to løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 45 - Hotspot for de to forskellige varianter

1:Mineraluld – 2.296 Kg CO₂-ækv.

2:Papiruld – 2.178 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.2.5 Byg. B, C, D_271005, 271006, 271007, 271008 - Tage

Tagene i bygning B, C og D er behandlet samlet i én analyse, da konstruktionerne alle kan sammenlignes med spidsloftet i bygning A. Der er derfor anvendt samme metode for efterisolering, hvor eksisterende gipsbeklædning, forskalling, dampspærre og isolering fjernes (forskalling genbruges), og der efterfølgende udfyldes med papiruld, indtil en samlet U-værdi på 0,12 W/m²K er opnået.

271005 – Tag / 353001 – Påbygget loft

Denne tagkonstruktion er udført som en gitterspærskonstruktion, hvor efterisoleringen foretages uden behov for yderligere konstruktive tiltag. For at opnå en U-værdi på 0,12 W/m²K udskiftes den eksisterende isolering, og der tilføjes yderligere 50 mm isolering, således at den samlede isoleringstykkelse på loftet bliver 300 mm. Det samlede areal udgør 399 m².

271006 – Tag

Denne tagkonstruktion er udført som en bjælkespærskonstruktion med et større nedhængt loft. For at opnå den ønskede U-værdi nedstropes loftet med 125 mm, således at den samlede isoleringstykkelse bliver 325 mm. Det samlede areal udgør 30 m².

271007 – Tag / Nedhængt loft

Denne tagkonstruktion er ligeledes udført som en gitterspærskonstruktion, hvor efterisoleringen kan foretages uden yderligere konstruktive tiltag. Den eksisterende isolering udskiftes, og der tilføjes yderligere 50 mm isolering, således at den samlede isoleringstykkelse bliver 300 mm. Det samlede areal udgør 37 m².

271008 – Tag

Denne tagkonstruktion er udført som en saksespærskonstruktion og efterisoleres på samme måde som de øvrige gitterspærskonstruktioner, uden behov for yderligere konstruktive tiltag. Den eksisterende isolering udskiftes, og der tilføjes yderligere 50 mm isolering, således at den samlede isoleringstykkelse bliver 300 mm. Det samlede areal udgør 49 m².

På baggrund af det beregnede energibehov udgår bygningsdelene 271007 og 271008 for den resterende del af analysen, da forbedringen af disse bygningsdele ikke viser nogen målbar effekt på energibehovet.

Tabel 30 viser og sammenligner nøgletallene for de to bygningsdele.

Bygningsdel	Løsning 1 271005	Løsning 2 271006
U-værdi (W/m ² K)	0,12	0,12
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,8	0,1
Anskaffelse (kr.)	832.913	90.700
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	1.352.540	134.200
Årlig besparelse (Kr.)	1.987	248
Tilbagebetalingstid (år)	419	365
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	9.445	1.181
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	7.414	604
CO ₂ -afkasttid (år)	39	26
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	2.031	576
Rentabel (LCC)	×	×
Rentabel (LCA)	✓	✓

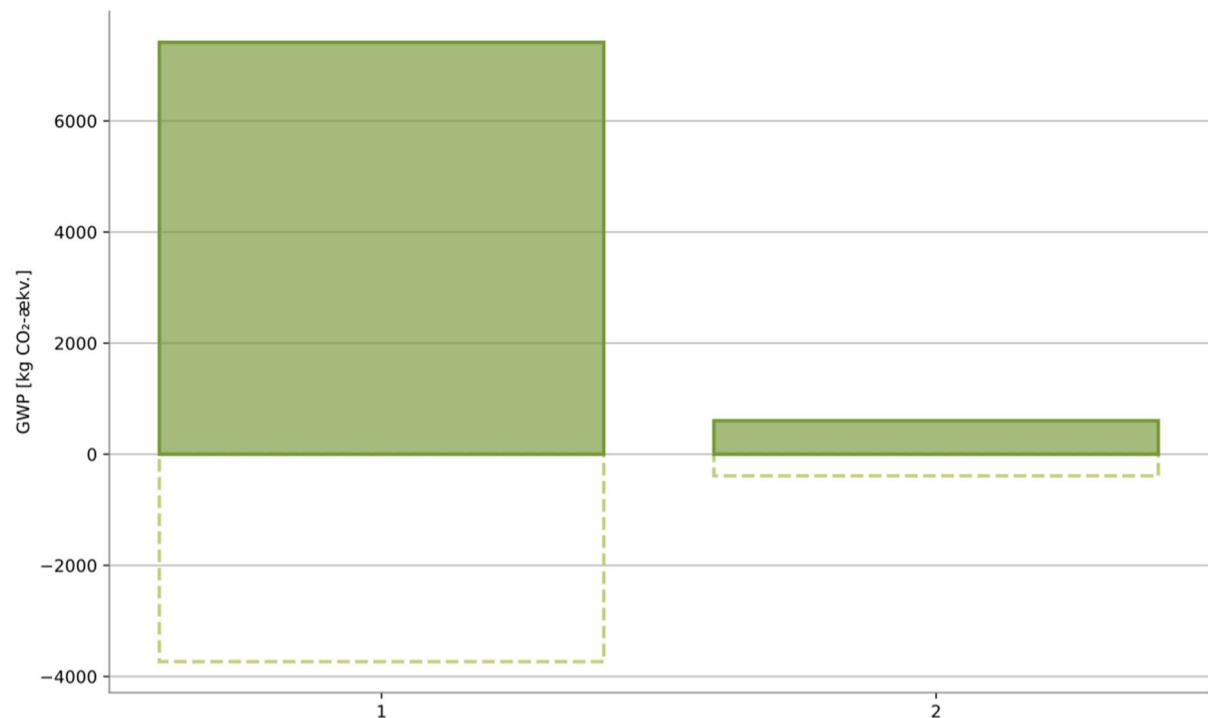
Tabel 30 - Samlet overblik over de to bygningsdele.

Bygningsdel 271005 reducerer varmetabet otte gange mere end bygningsdel 271006 og medfører en tilsvarende større CO₂-besparelse i driftsfasen. Til gengæld kræver løsningen en investering, der er ni gange højere, og har en CO₂-afkasttid, der er ca. 15 % længere.

Modsat har bygningsdel 271006 både den korteste økonomiske tilbagebetalingstid og den hurtigste klimamæssige break-even.

Ingen af løsningerne opnår økonomisk rentabilitet inden for analyseperioden, men begge vurderes at være LCA-rentable.

Figur 46 illustrerer grafisk, hvordan de to bygningsdele performer i LCA-beregningen.



Figur 46 - Hotspot for de to bygningsdele

1:271005 – 7.414 Kg CO₂-ækv.

2:271006 – 604 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.2.6 Byg. B 214008 – Skunkvæg

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af skunkvæggen i bygning A, som udgør et areal på 61 m². Den eksisterende U-værdi for konstruktionen er 0,19 W/m²K.

Skunkgulvet er indregnet under tagkonstruktionerne i kap. 5.6.1.2.5 Byg. B, C, D_271005, 271006, 271007, 271008 - Tæge.

Der analyseres ikke på alternative løsninger i denne case, da alle forudsætninger svarer til dem, der er beskrevet i kap. 5.6.1.2.4 Byg. A_214003 – Skunkvæg / 334009 – Skunkgulv. Derfor vælges samme løsning med udskiftning til papiruld kombineret med forøgelse af vægtykkelsen. For at opnå en forbedret U-værdi på 0,12 W/m²K forøges vægtykkelsen med 100 mm, hvilket giver en samlet isoleringstykkelse på 325 mm.

Tabel 31 viser nøgletallene for løsningen.

Bygningsdel	Papiruld
U-værdi (W/m ² K)	0,12
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,1
Anskaffelse (kr.)	134.505
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	210.157
Årlig besparelse (Kr.)	248
Tilbagebetalingstid (år)	541
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	2.361
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	1.185
CO ₂ -afkasttid (år)	25
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	1.176
Rentabel (LCC)	✗
Rentabel (LCA)	✓

Tabel 31 - Overblik over løsningens besparelser.

Udskiftning til papiruld kombineret med 100 mm nedstrokning medfører en begrænset energibesparelse, og den økonomiske tilbagebetalingstid ligger ud over analysehorisonten.

Til gengæld opnås en positiv klimaeffekt: CO₂-regnskabet balanceres efter ca. 25 år, hvorefter der opnås en CO₂-besparelse på omkring 1,2 ton over en 50-årig periode.

Da der ikke er nogle alternativer at sammenligne med, er der ikke indsat nogen Hotspotanalyse for dette tiltag.

5.6.1.3 Vinduer

5.6.1.3.1 Alle bygninger_312001 - Vinduer og døre

Der er regnet på to alternativer til en fuld udskiftning af vinduer og yderdøre på hele *Skovglimt*. I begge tilfælde er der regnet med samme gennemsnitlige U-værdi for at forenkle beregningen; forskellen ligger alene i ramme-/karmmaterialet:

Der er regnet på to løsninger:

1. Træ (malet fyr/gran).
2. Træ / alu (træ indvendigt, udvendig aluminiumskappe).

Tabel 32 viser og sammenligner nøgletallene for de to bygningsdele.

Bygningsdel	Løsning 1 Træ	Løsning 2 Træ/Alu
U-værdi (W/m ² K)	0,85	0,85
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	4,5	4,5
Anskaffelse (kr.)	2.104.500,00	2.653.500,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	3.480.089,00	3.317.103,00
Årlig besparelse (Kr.)	11.178	11.178
Tilbagebetalingstid (år)	188	237
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	53.126	53.126
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	43.797	72.304
CO ₂ -afkasttid (år)	41	68
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	9.329	-19.178
Rentabel (LCC)	×	×
Rentabel (LCA)	✓	×

Tabel 32 - Samlet overblik over de to løsninger.

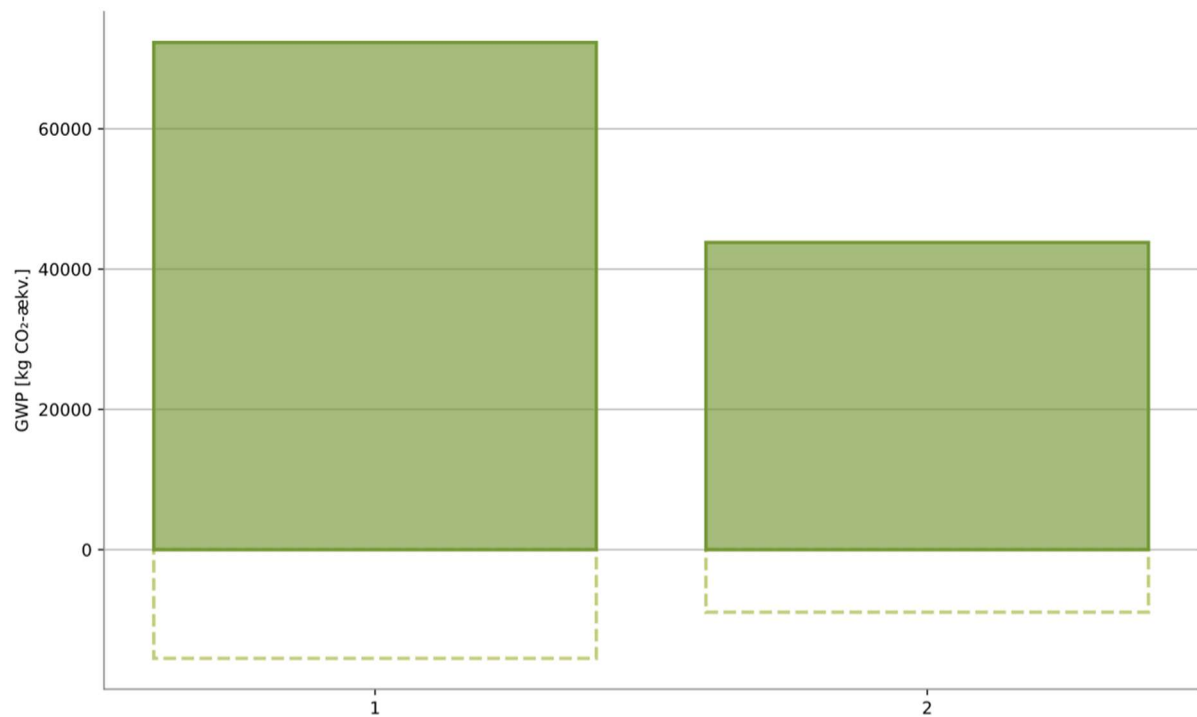
Da den årlige energibesparelse er ens for begge løsninger, afhænger valget primært af anlægspris, vedligehold og klimaaftryk. Vinduer og døre med træ/alu har en anskaffelsespris, der er ca. 25 % højere end de rene træløsninger. Dette medfører, at den økonomiske tilbagebetalingstid forlænges med omkring 50 år.

Samtidig har træ/alu-varianten en CO₂-afkasttid, der er næsten 65 % længere, og ender over 50 år med et negativt CO₂-regnskab, mens træløsningen har en positiv CO₂-besparelse og dermed opnår LCA-rentabilitet.

Det skal dog bemærkes, at trærammer typisk har et højere vedligeholdelsesbehov i form af maling og overfladebehandling. Over en 50-årig periode kan dette udligne eller overstige merprisen for træ/alu, som kræver væsentligt mindre vedligehold. Træ/alu-løsningen kan derfor vise sig at være billigst i det lange løb, hvis vedligeholdelsesomkostninger medregnes.

På den baggrund vurderes trærammer at give den bedste balance mellem anlægspris, CO₂-effekt og teknisk ydeevne, når der fokuseres på klimaaftryk og investering alene. Men valget bør afvejes mod de langsigtede driftsomkostninger og vedligeholdelsesstrategi, især i bygninger med begrænsede ressourcer til løbende vedligehold.

Figur 47 illustrerer grafisk, hvordan de to løsninger performer i LCA-beregningen.



Figur 47 - Hotspot for de to løsninger

1: Træ/Alu – 72.304 Kg CO₂-ækv.

2: Træ – 43.797 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.4 Terrændæk

5.6.1.4.1 Byg. D_131005/131007 – Terrændæk

De to terrændæk i bygningsdelene 131005 og 131007 er behandlet samlet i analysen, da arealet for 131005 (6 m²) er så begrænset, at det ikke giver mening at udarbejde en selvstændig vurdering. Det samlede areal udgør 57 m², hvoraf 51 m² udgøres af 131007. Terrændækkene har en eksisterende U-værdi på 0,16 W/m²K.

Analysen har til formål at nedbringe U-værdien til 0,10 W/m²K. Den eksisterende opbygning består af 225 mm isolering i klasse 50, hvilket svarer til en lambdaværdi på 0,05 W/mK i henhold til DS 418, når der ikke foreligger dokumentation for den præcise lambdaværdi.

Scenarie 1 omfatter udskiftning af de øverste 50 mm isolering (placeret over betondækket) til PIR-isolering. Dette kræver kun fjernelse af klinker eller linoleum og undgår dermed opbrydning af det eksisterende terrændæk. Denne løsning viser dog ingen målbar effekt på energibehovet og indgår derfor ikke i LCC- og LCA-beregningen.

Scenarie 2 indebærer fuld udskiftning af terrændækket. Her ophugges betondækket, den eksisterende isolering fjernes, og der graves ud for at etablere et nyt terrændæk med 200 mm isolering i klasse 31 under betonen samt 50 mm i klasse 31 over betonen. Dette medfører en samlet isoleringstykkelse på 250 mm (mod tidligere 225 mm) og en forbedring af U-værdien til 0,10 W/m²K.

Tabel 33 viser nøgletallene for tiltaget.

Bygningsdel	Begge
U-værdi (W/m ² K)	0,1
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,1
Anskaffelse (kr.)	275.375
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	329.981
Årlig besparelse (Kr.)	248
Tilbagebetalingstid (år)	1.109
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	1.181
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	5.239
CO ₂ -afkasttid (år)	222
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	-4.058
Rentabel (LCC)	✗
Rentabel (LCA)	✗

Tabel 33 - Overblik over løsningens besparelser.

Selvom en fuld udskiftning af terrændækket kan reducere U-værdien til 0,10 W/m²K, er den opnåede energibesparelse minimal. Dette medfører en økonomisk tilbagebetalingstid på over 1.100 år samt et negativt CO₂-resultat på ca. 4 ton over hele analyseperioden.

Investeringen vurderes derfor hverken at være økonomisk- eller LCA-rentabel. Det betydelige konstruktive indgreb kombineret med de begrænsede energi- og klimaeffekter gør løsningen både økonomisk og klimamæssigt uhensigtsmæssig.

Da der ikke er nogle alternativer at sammenligne med, er der ikke indsat nogen Hotspotanalyse for dette tiltag.

5.6.1.4.2 Byg. C_334020 – Dæk over indgang

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af dækket over indgangen, som udgør et areal på 22 m². Den eksisterende U-værdi er 0,17 W/m²K og ønskes forbedret til 0,10 W/m²K.

Det er ikke muligt at hæve gulvhøjden indvendigt eller sænke dækket udvendigt på grund af fastlagte niveauer omkring hovedindgangen. Derfor er løsningen med tilførsel af yderligere isolering ikke teknisk mulig. Løsningen med udskiftning til mineraluld i en bedre klasse ændrer ikke på det samlede energibehov og indgår derfor ikke i LCC- og LCA-beregningen.

Den eneste mulighed for at opnå den ønskede U-værdi på 0,10 W/m²K er ved at udskifte den eksisterende isolering med PIR-isolering, som har en lavere lambdaværdi.

Tabel 34 viser nøgletallene for tiltaget.

Bygningsdel	334020
U-værdi (W/m ² K)	0,1
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	0,1
Anskaffelse (kr.)	73.233
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	88.594
Årlig besparelse (Kr.)	248
Tilbagebetalingstid (år)	295
CO ₂ -driftsbesparselse over 50 år (Kg)	1.181
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	6.322
CO ₂ -afkasttid (år)	268
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	-5.141
Rentabel (LCC)	×
Rentabel (LCA)	×

Tabel 34 - Overblik over løsningens besparelser.

Løsningen med PIR-isolering reducerer energiforbrug marginalt, hvilket resulterer i en økonomisk tilbagebetalingstid på knap 300 år. Den indlejrede CO₂-belastning er mere end fem gange højere end den samlede driftsmæssige CO₂-besparelse over analyseperioden.

Tiltaget vurderes derfor hverken at være økonomisk- eller LCA-rentabelt.

Da der ikke er nogle alternativer at sammenligne med, er der ikke indsat nogen Hotspotanalyse for dette tiltag.

5.6.1.4.3 Byg. B_261001 – Terrassedæk

Der er foretaget en vurdering af efterisolering af terrassedækket mod altanen. Dækket udgør et samlet areal på 17 m² og har en eksisterende U-værdi på 0,52 W/m²K. Derudover bidrager konstruktionen med et linjetab mod brystningsvæg og betonbjælke på 0,109 W/mK over en længde på 28 meter.

Målet for analysen er at vurdere, hvad der skal til for at nedbringe U-værdien til 0,10 W/m²K, samt om linjetabet kan reduceres uden indvendig efterisolering.

Løsning omkring linjetab

Linjetabet formindskes ved at fylde isolering i en den nederste del af brystningsvæggen samt udskiftning af 3-4 skifter teglsten til lecablokke, som det fremgår af Figur 48.



Figur 48- Løsning af kuldebrosproblematik.

Løsning omkring U-værdi

Udskiftning af den eksisterende isolering til 80 mm XPS i klasse 31 reducerer U-værdien til 0,34 W/m²K, hvilket ikke overholder det absolutte minimumskrav på 0,20 W/m²K. Denne løsning udgår derfor.

Alternativt efterisoleres loftet nedefra i kombination med ny XPS. En samlet efterisolering på 300 mm kan opnå den ønskede U-værdi på 0,10 W/m²K, men på grund af begrænset loftshøjde regnes der med maksimalt 150 mm isolering. Denne løsning giver en U-værdi på 0,14 W/m²K. En alternativ løsning med 50 mm loftsisolering giver en U-værdi på 0,30 W/m²K.

Udskiftes XPS'en med PIR-isolering uden indvendig efterisolering, kan U-værdien reduceres til 0,25 W/m²K.

Følgende løsninger er vurderet:

1. Ny XPS + 150 mm loftsisolering (U = 0,14)
Nyt linjetab: 0,0561 W/mK
Energibehov: 156 kWh/m²/år.
2. Ny XPS + 50 mm loftsisolering (U = 0,30)
Nyt linjetab: 0,0608 W/mK
Energibehov: 156,1 kWh/m²/år.
3. PIR-isolering uden indvendig efterisolering (U = 0,25)
Nyt linjetab: 0,106 W/mK
Energibehov: 156,1 kWh/m²/år.

I alle scenarier er de økonomiske og klimamæssige omkostninger til reduktion af linjetabet medregnet.

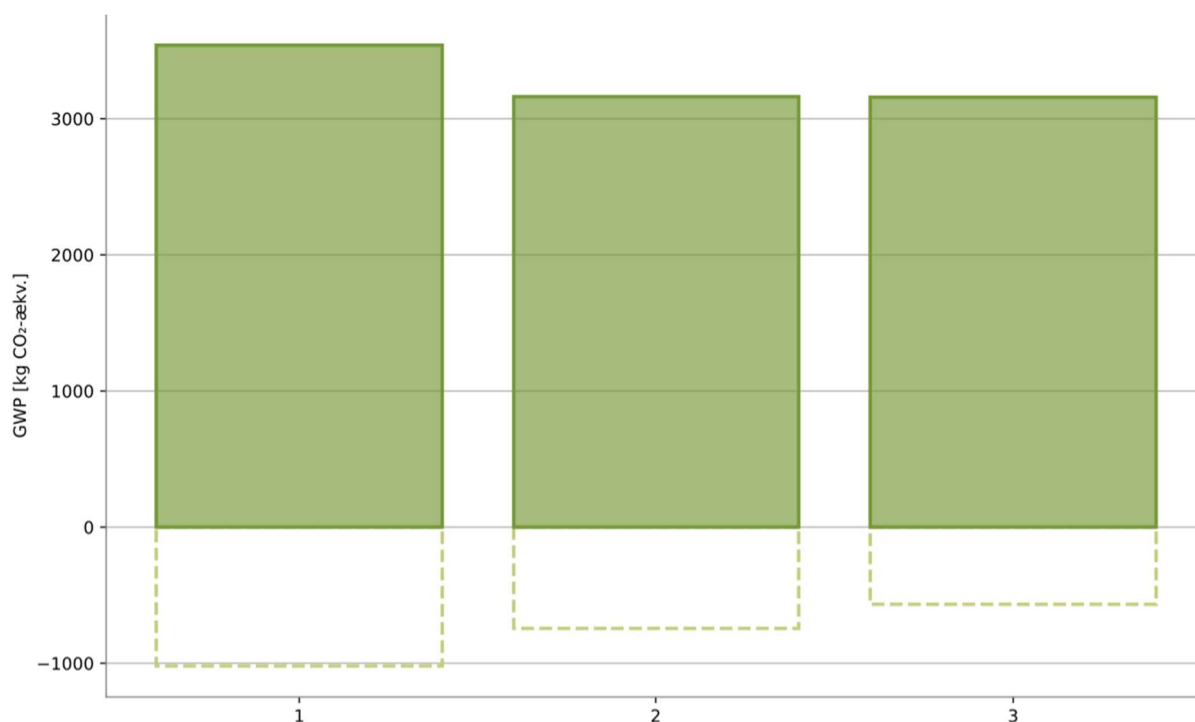
Tabel 35 viser og sammenligner nøgletallene for de tre løsninger.

Variant	Løsning 1	Løsning 2	Løsning 3
U-værdi (W/m²K)	0,14	0,3	0,25
Energibesparelse (kWh/m²/år)	0,2	0,1	0,1
Anskaffelse (kr.)	296.421	255.000	59.500
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	338.921	308.588	72.361
Årlig besparelse (Kr.)	497	248	248
Tilbagebetalingstid (år)	597	1.027	240
CO2- driftsbesparelse over 50 år (Kg)	2.361	1.181	1.181
Total CO2-udgift for optimeringen (Kg)	3.540	3.158	3.162
CO2-afkasttid (år)	75	134	134
Total CO2-besparelse over 50 år (Kg)	-1.179	-1.977	-1.981
Rentabel (LCC)	×	×	×
Rentabel (LCA)	×	×	×

Tabel 35 - Overblik over de tre løsnings besparelser.

Samlet set er ingen af scenarierne rentable ud fra hverken et økonomisk- eller et LCA-perspektiv, men vurderes udelukkende på baggrund af behovet for at reducere linjetabet samt sikre en fugtteknisk forsvarlig løsning for den konkrete konstruktionsdetalje.

Figur - 49 illustrerer grafisk, hvordan de tre forskellige scenarier performer i LCA-beregningen.



Figur - 49 Hotspot for de tre forskellige løsninger

1: Scenarie 1 – 3.540 Kg CO₂-ækv.

2: Scenarie 3 – 3.162 Kg CO₂-ækv.

3: Scenarie 2 – 3.158 Kg CO₂-ækv.

Fugtteknisk vurdering – HEAT2 simuleringer

Der er foretaget simuleringer i HEAT2 for at vurdere skimmel- og kondensrisiko ved indvendig efterisolering, under forudsætningerne:

- Indetemperatur: 20 °C.
- Udetemperatur: -12 °C.
- Fugtbelastningsklasse 2 (krav: min. 12 °C overfladetemperatur).

Scenarie 2

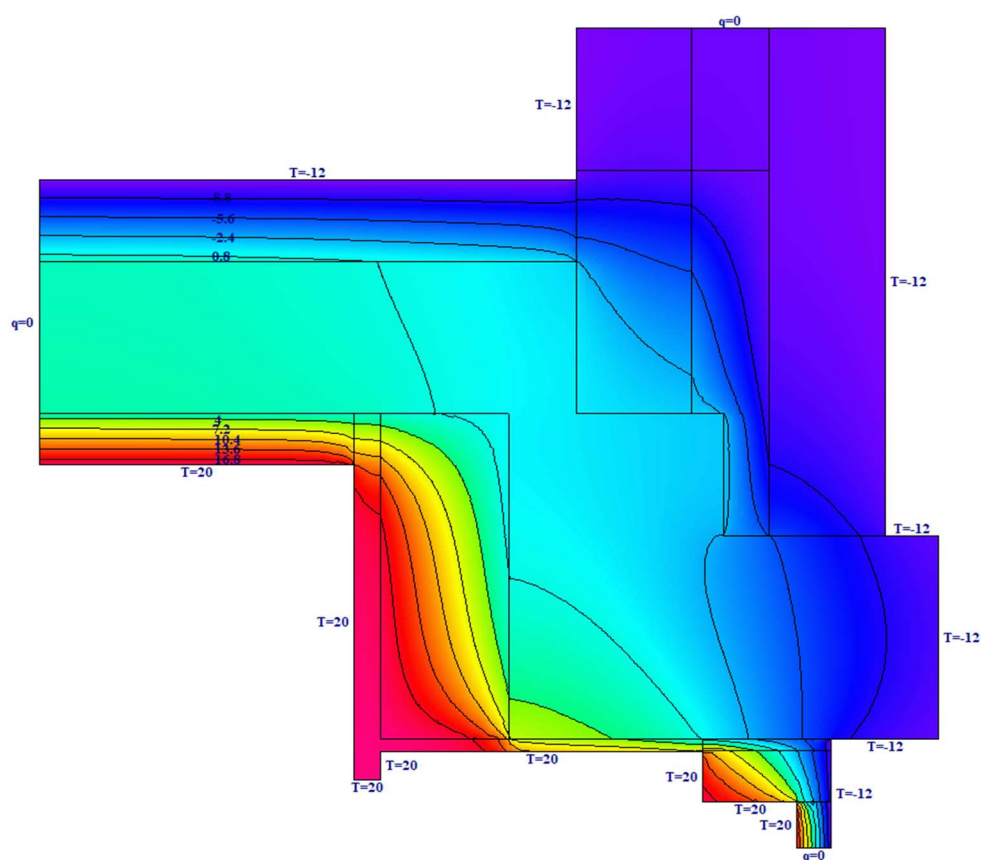
Simuleringen viser, at temperaturen mellem loftsisoleringen og dækket falder til mellem 2,4 °C og 4,0 °C, hvilket er markant under den anbefalede grænseværdi på 12 °C. Tilsvarende problematikker observeres ved den eksisterende indvendige isolering omkring betonbjælken. Resultaterne af simuleringen fremgår af Figur 50.

Scenarie 1

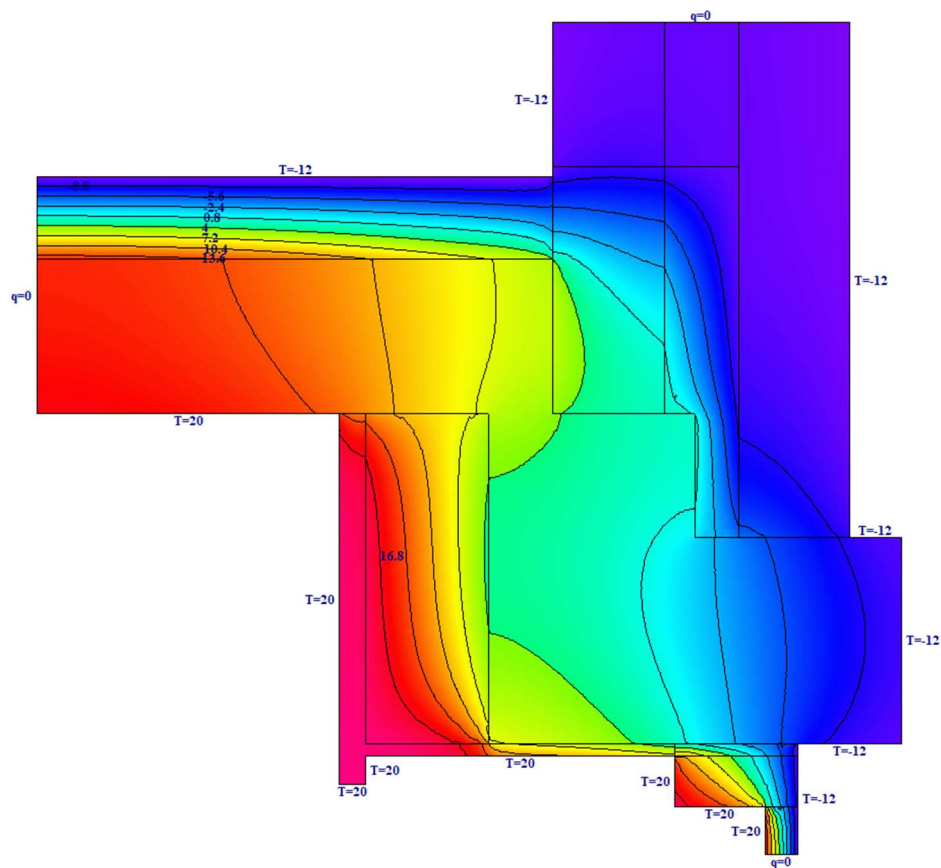
Problemet forværres yderligere ved tilføjelse af 150 mm loftsisolering. Temperaturen mellem altandækket og isoleringen falder til intervallet -0,8 °C til 0,8 °C, hvilket medfører en øget risiko for kondensdannelse og skimmelvækst.

Scenarie 3

Denne løsning resulterer i de mest fordelagtige fugttekniske forhold. Indeklimaets varme bidrager til at opretholde betondækkets overfladetemperatur tæt på 20 °C. Dog består fugtproblematikken fortsat omkring den eksisterende indvendige vægisolering. Resultaterne af simuleringen fremgår af Figur 51.



Figur 50 - HEAT2-simulering af scenarie 2.



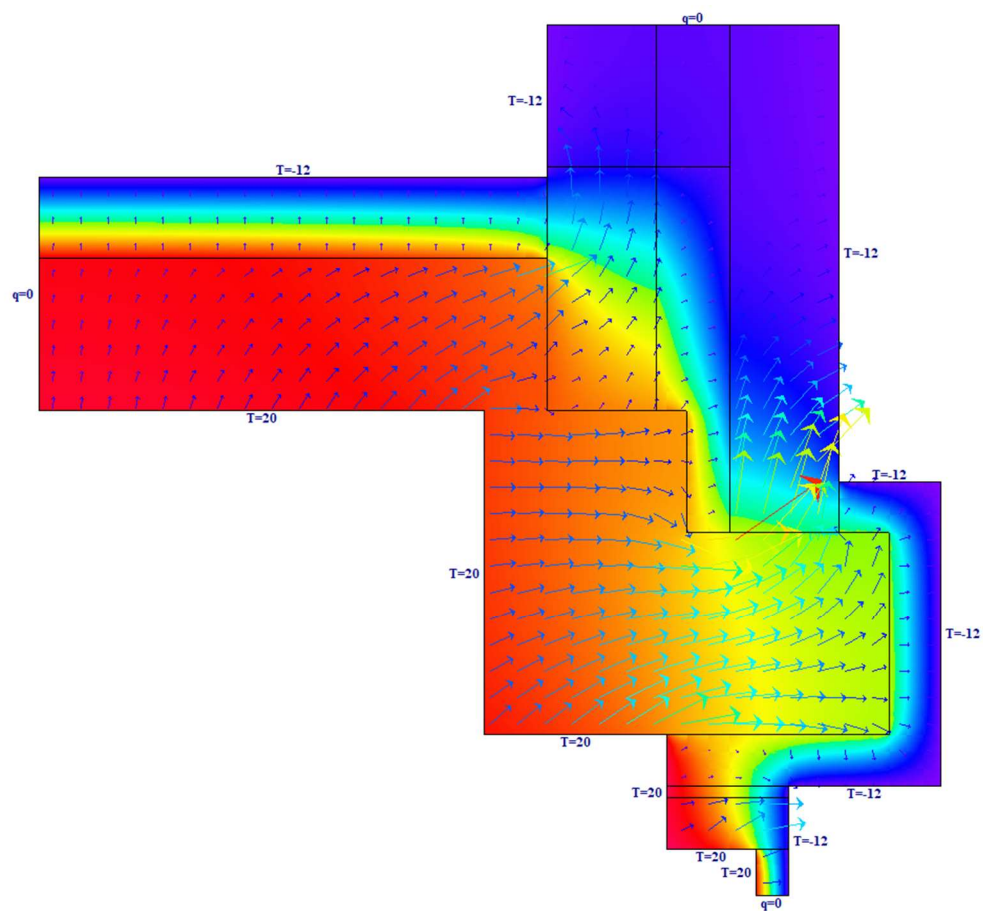
Figur51 - HEAT2-simulering af scenarie 3.

Supplerende løsning – udvendig isolering af betonbjælke

For at eliminere fugtproblematikken udskiftes den indvendige vægisolering med 50 mm udvendig isolering, som afsluttes med netpuds. Denne løsning sikrer, at temperaturen på samtlige indvendige overflader og lag holdes over 12 °C.

Denne tilpasning reducerer det samlede linjetab til 0,41 W/mK. Linjetabet er dog fortsat relativt højt sammenlignet med det niveau, der kunne opnås ved bibeholdelse af den indvendige isolering. Det vurderes dog, at dette tilsigtede linjetab er fugtteknisk mere fordelagtigt end løsningen med den eksisterende indvendige isolering. Resultaterne af simuleringen fremgår af Figur 52.

En yderligere reduktion af linjetabet kan opnås ved at udskifte de nederste skifter i brystningsvæggen med lecablokke samt etablere udvendig isolering afsluttet med netpuds op ad væggen. Dette indebærer dog et betydeligt indgreb i det eksisterende murværk, hvilket ikke vurderes at være rentabelt grundet det begrænsede omfang af linjetabet (28 meter). Ændringen i linjetabet fra 0,06 W/mK (Scenarie 1) til 0,41 W/mK vil desuden ikke have en målbar effekt på det samlede energibehov.



Figur 52- HEAT2-simulering af udvendig efterisolering af betonbjælke.

5.6.1.4.4 Alle bygninger_334001/334003/334004/334018/334019 – Dæk over kælder

Der er udarbejdet en samlet analyse af efterisolering af etagedækkene over kælderen (i alt 807 m²) i fire bygningsdele. To varianter er vurderet: 70 mm mineraluld, klasse 37 (scenarie 1) og 95 mm mineraluld, klasse 34 (scenarie 2), begge udført som netpuds direkte på isoleringen uden at berøre de tekniske installationer. Scenarie 1 bringer alle dæk ned på 0,40 W/m²K eller bedre; scenarie 2 bringer alle dæk ned på 0,29 W/m²K eller bedre.

Arealerne er fordelt på nedenstående bygningsdele:

- 334001/334003: 320 m².
- 334004: 47 m².
- 334018: 399 m².
- 334019: 41 m².

Tabel 36 viser og sammenligner nøgletallene for de fire bygningsdele i scenarie 1.

Tabel 37 viser og sammenligner nøgletallene for de fire bygningsdele i scenarie 2.

Variant ved 70 mm isolering kl. 37	Løsning 1 334001/334003	Løsning 2 334004	Løsning 3 334018	Løsning 4 334019
U-værdi (W/m ² K)	0,25	0,4	0,34	0,39
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	2,1	2,4	7,1	2,0
Anskaffelse (kr.)	260.000	38.188	324.188	33.313
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	416.141	61.121	518.876	53.319
Årlig besparelse (Kr.)	5.217	5.962	17.637	4.968
Tilbagebetalingstid (år)	50	6	18	7
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	28.334	28.334	83.821	23.612
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	1.910	281	2.382	245
CO ₂ -afkasttid (år)	3	0	1	1
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	26.424	28.053	81.440	23.367
Rentabel (LCC)	✓	✓	✓	✓
Rentabel (LCA)	✓	✓	✓	✓

Tabel 36 - Overblik over de fire bygningsdeles besparelser.

Variant ved 95 mm isolering kl. 34	Løsning 1 334001/334003	Løsning 2 334004	Løsning 3 334018	Løsning 4 334019
U-værdi (W/m ² K)	0,2	0,29	0,26	0,29
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	2,5	2,6	8,0	2,2
Anskaffelse (kr.)	304.000	44.650	379.050	38.950
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	486.566	71.464	606.686	62.341
Årlig besparelse (Kr.)	6.210	6.459	19.872	5.465
Tilbagebetalingstid (år)	49	7	19	7
CO ₂ -driftsbesparelse over 50 år (Kg)	29.515	30.695	94.447	25.973
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (Kg)	2.241	329	2.795	287
CO ₂ -afkasttid (år)	4	1	1	1
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg)	27.273	30.366	91.652	25.686
Rentabel (LCC)	✓	✓	✓	✓
Rentabel (LCA)	✓	✓	✓	✓

Tabel 37 - Overblik over de fire bygningsdeles besparelser.

Løsningen med 95 mm mineraluld kræver i gennemsnit en 17 % højere anlægsinvestering sammenlignet med 70 mm, men medfører ca. 20 % større årlig energibesparelse og en samlet CO₂-reduktion over 50 år, der er ca. 10 % højere. Den økonomiske- og LCA-tilbagebetalingstid ændres kun marginalt.

På denne baggrund vurderes *scenario 2* (95 mm isolering) at give den bedste balance mellem anlægsøkonomi, energibesparelse og klimamæssig effekt.

Forbehold og usikkerheder

Det bemærkes, at analysen er baseret på forsimplede antagelser. De anvendte EPD-data for mineraluld differentierer ikke mellem isoleringsklasser, hvilket betyder, at klimabelastningsforskellen mellem klasse 34 og 37 ikke nødvendigvis er fuldt repræsenteret.

Der er ikke indsat nogen Hotspotanalyse for dette tiltag, da analysen kun er lavet for at finde frem til CO₂-udgiften for den enkelte bygningsdel og ikke hvilken bygningsdel, som performer bedst.

5.6.1.5 Ventilation

Der er foretaget en vurdering af opsætning af mekanisk balanceret ventilation i hele ejendommen. Det eksisterende udsugningsanlæg erstattes af et nyt mekanisk balanceret ventilationsanlæg med både indblæsning og udsugning. Ventilationen udføres med decentrale aggregater i alle beboelseslejligheder samt fem større anlæg til fællesområder og servicearealer. Det forudsættes, at alle rørstrækninger kan føres i de nedhængte lofter. De største aggregater placeres i kælder og loftsrum, svarende til de nuværende udsugningsanlæg. Ventilationsrørstrækningen er vurderet til 300 m – dobbelt op i forhold til de nuværende udsugningskanaler.

Aggregaterne

Til boligerne anvendes et kompakt ventilationsanlæg med højeffektiv modstrømsveksler med op til 90 % temperaturvirkningsgrad og energibesparende EC-motorer. Anlægget har integreret 100 % bypass, modulerende fugtstyring og datalogning.

Til fællesområder anvendes der anlæg med roterende veksler med op til 80 % varmegenvinding og modulerende fugtgenvinding. Anlæggene har EC-motorer og lavt energiforbrug.

Ventilationsdata og dimensionering er baseret på et referenceprojekt af samme størrelsesorden som Skovglimt, da der ikke er udarbejdet specifikke ventilationsplaner eller detaljerede beregninger. Ved implementering af det mekaniske ventilationsanlæg reduceres energibehovet fra 156,2 kWh/m²/år til 104,4 kWh/m²/år, svarende til en besparelse på 51,8 kWh/m²/år.

Anlægget til fællesområderne (214 m²) opdelt i følgende driftsniveauer:

- 100 % ydeevne i 5 % af tiden (forceret drift).
- 50 % ydeevne i 62 % af tiden (daglig brug).
- 25 % ydeevne i 33 % af tiden (nattilstand).

For denne analyse undersøges forskellen mellem EPD-data, da der kun er valgt én type ventilationsstrategi.

Tabel 38 viser og sammenligner nøgletallene for de to EPD-datasæt.

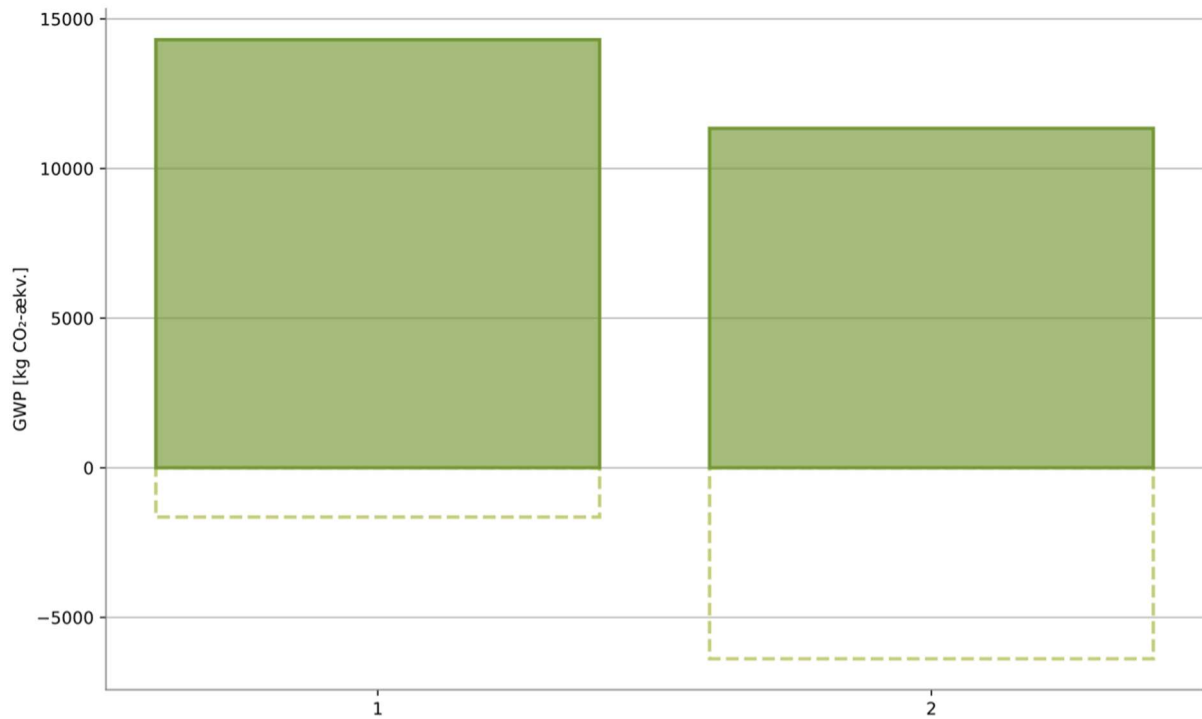
Variant	Ventilation (Generisk)	Ventilation (Specifik)
U-værdi (W/m²K)	-	-
Energibesparelse (kWh/m²/år)	51,8	51,8
Anskaffelse (kr.)	1.919.699,00	1.919.699,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	3.556.672,00	3.556.672,00
Årlig besparelse (Kr.)	128.674	128.674
Tilbagebetalingstid (år)	15	15
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	469.872	469.872
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	11.342	14.304
CO₂-afkasttid (år)	1	2
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	458.530	455.568
Rentabel (LCC)	✓	✓
Rentabel (LCA)	✓	✓

Tabel 38 - Samlet overblik over de to EPD-datasæt.

Det nye ventilationsanlæg sænker energibehovet med omkring en tredjedel og giver en årlig driftsbesparelse, der betaler investeringen hjem på femten år – uanset om de indlejrede emissioner vurderes ud fra generiske eller specifikke data. Klimaafkastet er hurtigt: allerede efter et til to år er den indlejrede CO₂ tjent ind af den løbende besparelse, og over analyseperioden opnås omkring en halv million

kilo CO₂-reduktion. Da forskellen mellem generiske og specifikke data ikke ændrer konklusionen om hverken økonomisk eller klimamæssig rentabilitet, anbefales projektet at gennemføres, med fokus på at vælge dokumenteret lav-emissionsudstyr.

Figur 53 illustrerer grafisk, hvordan de to EPD-datasæt performer i LCA-beregningen.



Figur 53 - Hotspot for de to EPD-datasæt

1: Specifik datasæt – 14.304 Kg CO₂-ækv.

2: Generisk datasæt – 11.342 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.6 Varmekilde

Der er foretaget en vurdering af udskiftning af varmekilden. Der regnes på udskiftning af den eksisterende gaskedel til en luft-til-vand varmepumpe samt på konvertering til fjernvarme. Varmtvandsbeholderen indgår ikke i analysen, da den ifølge kap. 5.1 *Tilstandsvurdering* allerede har overskredet sin tekniske levetid og derfor skal udskiftes. For fjernvarmeløsningen indgår i stedet en varmeveksler, som sikrer adskillelse mellem brugsvand og fjernvarmenettet.

Luft-til-vand varmepumpe

Der anvendes en varmepumpe med en nominel effekt på 220 kW, en COP på op til 4,7 ved 45 °C (varmeside) og 7 °C (kold side). Luft-til-vand varmepumper udnytter energien i udeluften til at producere varme og varmt brugsvand med høj effektivitet. De reducerer CO₂-udledningen markant sammenlignet med fossile brændsler og kan typisk tilpasses eksisterende varmeanlæg.

Fjernvarme

Fjernvarme er en kollektiv opvarmningsform, hvor varme produceres centralt – ofte på kraftvarmeværker eller ved anvendelse af overskudsvarme fra industrien – og distribueres gennem et isoleret rørsystem til de enkelte bygninger. Fjernvarme kendetegnes ved høj driftssikkerhed, minimal pladsbehov i bygningen og lav vedligeholdelse for ejendommens ejer. Det bemærkes, at der aktuelt planlægges udrulning af fjernvarme i Stenlille, hvor *Skovglimt* er beliggende, hvilket kan medføre, at *Skovglimt* er forpligtet til at vælge denne varmeløsning.

Begge varmekilder betragtes som vedvarende energikilder.

Tabel 39 viser og sammenligner nøgletallene for de to EPD-datasæt.

Variant	Varmepumpe	Fjernvarme
U-værdi (W/m²K)		
Energibesparelse (kWh/m²/år)	70,4	26,3
Anskaffelse (kr.)	2.000.000,00	900.000,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	5.218.516,00	2.348.332,00
Årlig besparelse (Kr.)	398.844	50.431
Tilbagebetalingstid (år)	5	18
CO₂- driftsbesparelse over 50 år (Kg)	1.421.964	570.700
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	42.165	3.990
CO₂-afkasttid (år)	1	0
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	1.379.799	566.711
Rentabel (LCC)	✓	✓
Rentabel (LCA)	✓	✓

Tabel 39 - Samlet overblik over de to løsninger.

Varmepumpeløsningen kræver en investering, der er lidt over dobbelt så stor som fjernvarmeløsningen, men til gengæld opnås en årlig kontant besparelse, der er mere end syv gange større. Samtidig næsten tredobles den samlede CO₂-reduktion over analyseperioden. Varmepumpen har en økonomisk tilbagebetalingstid på fem år og en CO₂-afkasttid på omkring ét år.

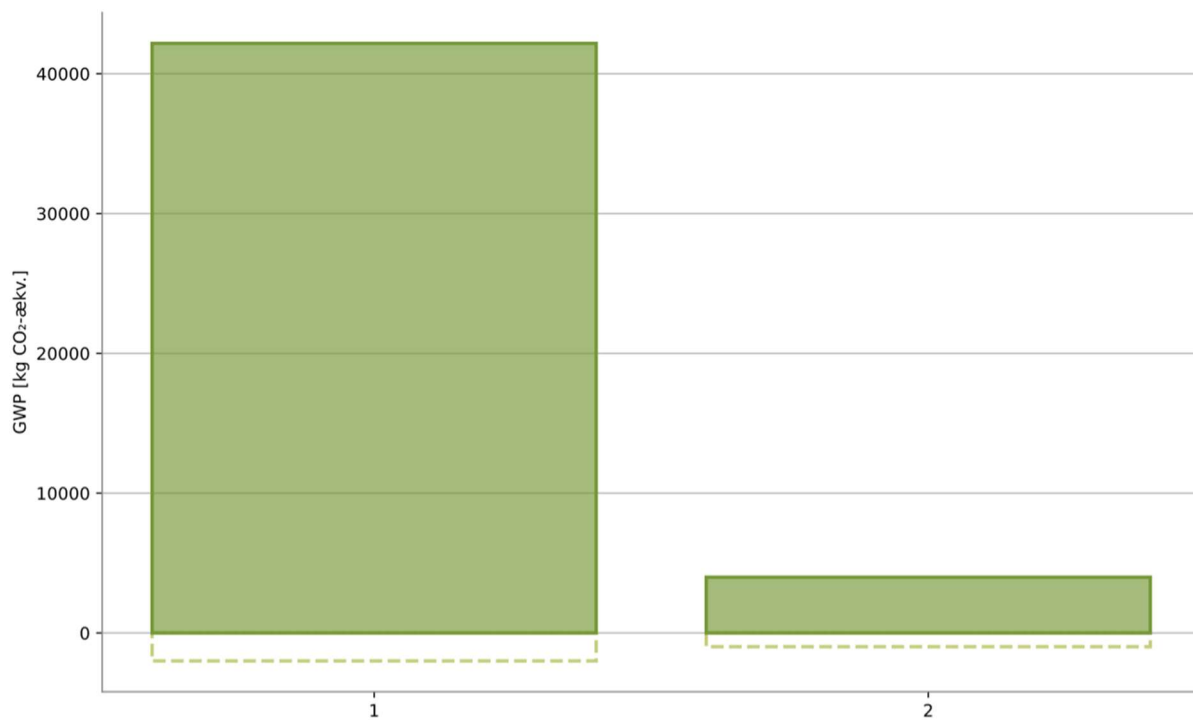
Fjernvarme er billigere at etablere og giver en umiddelbar CO₂-besparelse, men den årlige energibesparelse er lavere, og den økonomiske tilbagebetalingstid er mere end tre gange så lang som ved varmepumpen.

Begge løsninger er både økonomisk- og LCA-rentable, men det endelige valg afhænger af den lokale forsyningssituation. Hvis tilslutningspligten til den planlagte fjernvarme i Stenlille træder i kraft, skal

ejendommen kobles på fjernvarmenettet. I modsat fald fremstår varmepumpen som den mest attraktive løsning – både økonomisk og klimamæssigt.

Der er anvendt specifikke EPD-data for varmepumpen, da ingen af de generiske datasæt matchede en varmepumpe i den pågældende størrelsesorden. For fjernvarmescenariet er varmeveksleren beregnet ud fra generiske data. Rørstrækninger og pumper er ikke medtaget i LCA'en, da deres tekniske levetid jf. kap. 5.1 *Tilstandsvurdering* allerede er udløbet, og de derfor skulle have været udskiftet.

Figur 54 illustrerer grafisk, hvordan de to EPD-datasæt performer i LCA-beregningen.



Figur 54- Hotspot for de to varianter
1: Varmepumpe – 44.262 Kg CO₂-ækv.
2: Fjernvarme – 2.096 Kg CO₂-ækv.

5.6.1.7 Solceller

Der er foretaget en vurdering af opsætning af solceller på 22 m² tagareal orienteret mod syd. Anlægget er opbygget med en power peak på 0,174 kW/m² (baseret på data fra forskellige solcelleleverandører) og en systemvirkningsgrad på 0,75 (standardværdi jf. SBI 213). Dette giver en produktion på 3.448 kWh/år.

Denne vurdering er foretaget på baggrund af resultaterne i kap. 5.6.2 *Fremtidigt energibehov*, som viser, at 22 m² solceller er tilstrækkelig for at ramme renoveringsklasse 1, hvis der ved energirenoveringen konverteres til fjernvarme.

For denne analyse undersøges forskellen mellem EPD-data, da der kun er valgt en type solceller.

Tabel 40 viser og sammenligner nøgletallene for de to EPD-datasæt.

Bygningsdel	Solceller (Generisk)	Solceller (Specifik)
U-værdi (W/m²K)	-	-
Energibesparelse (kWh/m²/år)	2,7	2,7
Anskaffelse (kr.)	80.000	80.000
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	148.218	120.427
Årlig besparelse (Kr.)	6.707	6.707
Tilbagebetalingstid (år)	12	12
CO₂-driftsbesparelse over 50 år (Kg)	7.333	7.333
Total CO₂-udgift for optimeringen (Kg)	12.353	3.595
CO₂-afkasttid (år)	84	25
Total CO₂-besparelse over 50 år (Kg)	-5.020	3.738
Rentabel (LCC)	✓	✓
Rentabel (LCA)	✗	✓

Tabel 40 - Samlet overblik over de to EPD-datasæt.

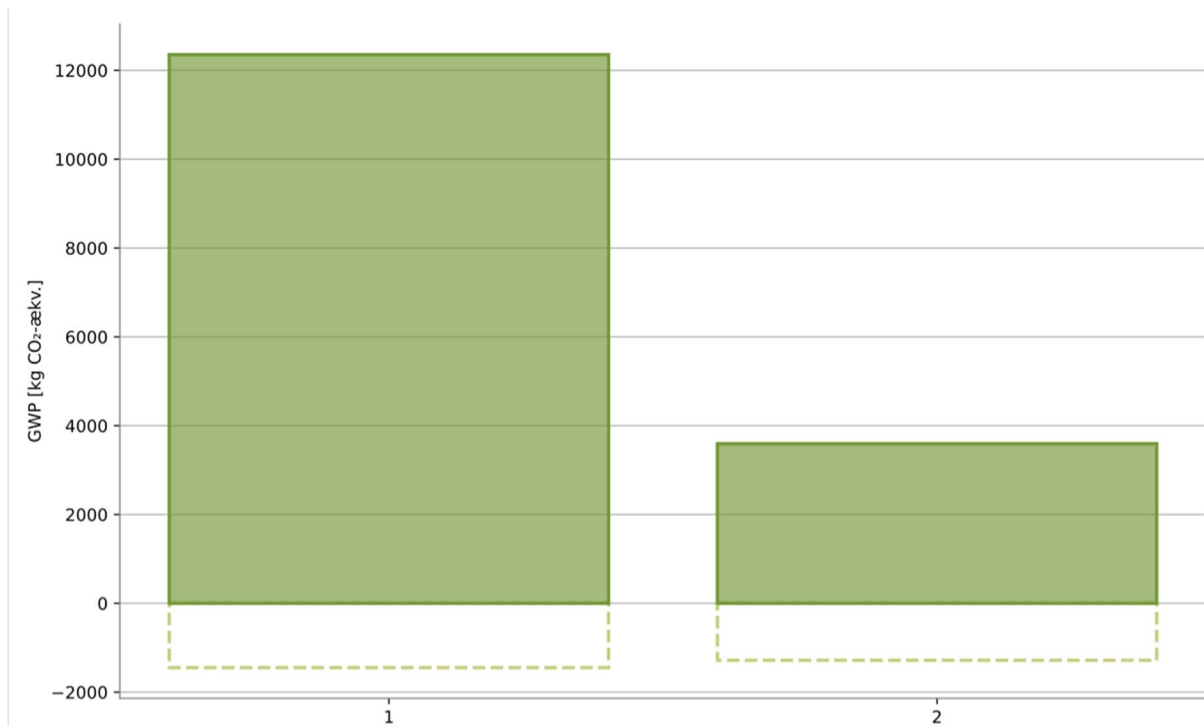
Den planlagte solcelleinstallation er rentabel ud fra et driftsøkonomisk perspektiv og har en kort tilbagebetalingstid. Den klimamæssige rentabilitet afhænger imidlertid af valg af EPD-grundlag:

Ved anvendelse af generiske data opnår anlægget ikke klimamæssig gevinst over analyseperioden.

Ved anvendelse af specifikke producentdata reduceres CO₂-udledningen med omkring 175%, og medfører en CO₂-afkasttid på ca. 25 år.

Da den økonomiske rentabilitet er uændret, og forskellen udelukkende skyldes variationer i den indlejrede klimabelastning, anbefales solcelleanlægget under forudsætning af, at der indkøbes paneler med dokumenteret lav deklareret klimapåvirkning (EPD).

Figur 55 illustrerer grafisk, hvordan de to EPD-datasæt performer i LCA-beregningen.



Figur 55 - Hotspot for de to forskellige EPD-datasæt

1: Generisk datasæt – 61.764 Kg CO₂-ækv.

2: Specifik datasæt – 17.973 Kg CO₂-ækv.

5.6.2 Fremtidigt energibehov

For at finde frem til hvilke kombinationer af klimaskærmsforbedringer, tekniske installationer og energikilder der er nødvendige for at løfte *Skovglimt* fra energimærke E til henholdsvis energimærke B (renoveringsklasse 2) og videre til energimærke A2010 (renoveringsklasse 1), er de mest lovende løsningsforslag fra kap. 5.6.1 *Forbedring af bygningsdele* beregnet i Be18.

Fokus er rettet mod bygning A, da den udgør den ældste og mindst energieffektive del af bebyggelsen. Målet er at opnå et samlet transmissionstab $\leq 14,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, svarende til nybyggerikravet.

Lufttætheden er i alle scenarier sat til $1,5 \text{ l/s pr. m}^2$ ved 50 Pa , da det ikke forventes, at bygningen bliver trykprøvet. Samtidig vurderes det, at hverken lofterne eller de lette facader med dampspærre økonomisk kan betale sig at renovere iht energibesparelse. Derfor er der ikke taget højde for udskiftning af dampspærre.

For alle energirammerne nedenfor er der bevidst ikke foretaget en vurdering af sommerkomforten i det kritiske rum via Be18, da dette i stedet analyseres for de to udvalgte boliger i kap.5.6.4.2 *Sommerkomfort*

Præsentation af resultater

Resultaterne af simuleringerne visualiseres med en farveskala, som angiver, i hvilket omfang de forskellige kombinationer opfylder kravene til energimærke og transmissionstab:

Rød: Overholder ikke transmissionstabet eller krav til energimærke.

Gul: Opfylder krav til energimærke B.

Grøn: Opfylder kravet til energimærke A2010 og transmissionstabet.

Denne tilgang gør det muligt at identificere, hvilke løsninger der giver mest effekt i forhold til reducere af energibehovet.

Scenarie 1 – Klimaskærm, mekanisk ventilation og konvertering til fjernvarme

Emne	forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	76,7	53,8	16,9	C
Varmekilde	Konvertering til fjernvarme	65,8	10,9	16,9	B

Tabel 41 - Nøgletal for scenarie 1.

Af Tabel 41 fremgår det, at scenarie 1 overholder kravet til energimærke B, mens transmissionstabet stadig er over kravet til nybyggeri.

Scenarie 2 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek og mekanisk ventilation

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg .A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B

Tabel 42 - Nøgletal for scenarie 2.

Af Tabel 42 fremgår det, at scenarie 2 overholder kravet til energimærke B, samtidig med, at transmissionstabet overholder. Ved dette scenarie kommer der dog en overtemperatur på 2,8°C.

Scenarie 3 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek. mekanisk ventilation og konvertering til fjernvarme

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg .A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B
Varmekilde	Konvertering til fjernvarme	55,5	9	13,2	B

Tabel 43 - Nøgletal for scenarie 3.

Af Tabel 43 fremgår det, at scenarie 3 overholder kravet til energimærke B og renovering klasse 2, samtidig med, at transmissionstabet overholder. Ved dette scenarie kommer der dog en overtemperatur på 2,8°C.

Scenarie 4 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek, mekanisk ventilation, konvertering til fjernvarme og øget naturlig ventilation

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B
Varmekilde	Konvertering til fjernvarme	55,5	9	13,2	B
Ventilation	Øge den naturlige ventilation fra 1,2 til 1,6 l/s/m ²	52,8	2,7	13,2	A2010

Tabel 44 - Nøgletal for scenarie 4.

Af Tabel 44 fremgår det, at scenarie 4 overholder kravet til energimærke A2010 samtidig med, at transmissionstabet overholdes. Om det er teknisk muligt at forøge luftskiftet til 1,6 l/s/m² skal eftervises, idet den simple beregning i sommerkomfort-modulet i Be18 er beregnet til et maksimalt luftskifte på 0,9 l/s/m² for bolig B.1.1.

Scenarie 5 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek, mekanisk ventilation, konvertering til fjernvarme og montering af solceller

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B
Varmekilde	Konvertering til fjernvarme	55,5	9	13,2	B
VE	Solceller anlæg 3.448 kWh om året	52,5	3	13,2	A2010

Tabel 45 - Nøgletal for scenarie 5.

Af Tabel 45 fremgår det, at scenarie 5 overholder kravet til energimærke A2010 samtidig med, at transmissionstabet overholdes. Ved dette scenarie kommer der dog fortsat en overtemperatur på 2,8°C.

Scenarie 6 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek, mekanisk ventilation og konvertering til varmepumpe

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B
Varmekilde	Konvertering til varmepumpe	35	29,5	13,2	A2010

Tabel 46 - Nøgletal for scenarie 6.

Af Tabel 46 fremgår det, at scenarie 6 overholder kravet til energimærke A2010 samtidig med, at transmissionstabet overholdes. Ved dette scenarie kommer der en overtemperatur på 1,9°C.

Scenarie 7 – Klimaskærm, efterisolering af kælderdek, mekanisk ventilation, konvertering til varmepumpe og montering af solceller

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
	Grundmodel	156,2	-	26,5	E
Klimaskærm	Udvendig efterisolering af byg. A. inkl. forbedring linjetab.	135,1	21,1	18,7	D
Klimaskærm	Nye vinduer og døre på hele bygningen.	130,5	4,6	16,9	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. A	125,6	15,6	15,6	D
Klimaskærm	Efterisolering af kælderdek, byg. B	116,1	9,5	13,2	D
Installationer	Mekanisk ventilation inkl. emhætter med direkte udkast.	64,5	51,6	13,2	B
Varmekilde	Konvertering til varmepumpe	35,0	29,5	13,2	A2010
VE	Solceller anlæg 3.448 kWh om året	32,0	3	13,2	A2010

Tabel 47 - Nøgletal for scenarie 7.

Af Tabel 47 fremgår det, at scenarie 7 overholder kravet til energimærke A2010 samtidig med, at transmissionstabet overholdes. Ved dette scenarie kommer der dog fortsat en overtemperatur på 1,9°C. Ved at udvide solcelle anlæg til en årlig ydelse på 5329 kWh (en udvidelse på 35 %) kan kravet til nybyggeri (Energimærke A2015) overholdes.

5.6.2.1 Delkonklusion af fremtid energibehov

Baseret på en samlede vurdering af de analyserede energiforbedringsforslag fremstår scenarie 5 som det bedste udgangspunkt for de videre beregninger i rapporten. Scenariet opfylder kravene til energimærke A2010, som var udgangspunktet i henhold til opgaveformuleringen.

En væsentlig styrke ved scenarie 5 er, at der indgår solceller i løsningen. Dette vurderes som en relevant og fremtidssikret investering, særligt i lyset af det forventede krav om etablering af solceller, som fra 2028 udvides til også at omfatte eksisterende offentlige bygninger med et samlet etageareal over 2.000 m².

Desuden planlægges der etablering af fjernvarme i området omkring *Skovglimt*, hvilket – hvis det realiseres – vil medføre tilslutningspligt. Dette har direkte indflydelse på varmeforsyningsstrategien og understøtter yderligere valget af scenarie 5, hvor fjernvarme indgår som energikilde.

På baggrund af ovenstående er det besluttet, at de efterfølgende beregninger af den samlede LCC- og LCA-analyse samt indeklimavurdering baseres på scenarie 5, da dette vurderes at være både teknisk gennemførligt og fremtidssikret i forhold til såvel gældende som kommende lovgivning.

Det skal yderligere fremhæves, at det ikke kræver omfattende tiltag at løfte bebyggelsen til energimærke D. Dette skyldes primært den modernisering, der blev gennemført i 2005, hvor flere af bygningernes energimæssige svagheder allerede blev udbedret – herunder en fuld efterisolering af tagkonstruktionerne på alle bygninger.

5.6.3 Samlede besparelse

Som nævnt i indledningen til kap. 5.6 *Forbedringsforslag* er der nu gennemført en samlet vurdering af den reelle rentabilitet – både økonomisk og klimamæssigt – for den samlede pakke af forbedringsforslag.

Figur 56 og Figur 57 viser henholdsvis det beregnede faktiske forbrug og det beregnede energibehov efter implementering af scenarie 5 i Be18.

Nøgletal, kWh/m ² år			
Renoveringsklasse 2			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
71,0	0,0	71,0	
Samlet energibehov		59,0	
Renoveringsklasse 1			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
53,3	0,0	53,3	
Samlet energibehov		59,0	
Energi ramme BR 2018			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
30,5	0,0	30,5	
Samlet energibehov		59,0	
Energi ramme lavenergi			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
27,0	0,0	27,0	
Samlet energibehov		59,0	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	62,1	Rumopvarmning	44,9
El til bygningsdrift	3,3	Varmt brugsvand	7,6
Overtemp. i rum	0,0	Køling	0,0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	9,6
Opvarmning af rum	0,0	Varmt brugsvand	4,3
Opvarmning af vbv	0,1		
Varmepumpe	0,0	Ydelse fra særlige kilder	
Ventilatorer	4,4	Solvarme	0,0
Pumper	0,3	Varmepumpe	0,0
Køling	0,0	Solceller	1,4
Totalt elforbrug	18,0	Vindmøller	0,0

Figur 56 - Nøgletal for det faktiske forbrug efter implementering af forbedringsforslag.

Nøgletal, kWh/m² år			
Renoveringsklasse 2			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
71,0	0,0	71,0	
Samlet energibehov		52,7	
Renoveringsklasse 1			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
53,3	0,0	53,3	
Samlet energibehov		52,7	
Energi ramme BR 2018			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
30,5	0,0	30,5	
Samlet energibehov		52,7	
Energi ramme lavenergi			
Uden tillæg	Tillæg for særlige betingelser	Samlet energiramme	
27,0	0,0	27,0	
Samlet energibehov		52,7	
Bidrag til energibehovet		Netto behov	
Varme	47,1	Rumopvarmning	21,1
El til bygningsdrift	5,3	Varmt brugsvand	17,6
Overtemp. i rum	2,7	Køling	0,0
Udvalgte elbehov		Varmetab fra installationer	
Belysning	0,0	Rumopvarmning	10,1
Opvarmning af rum	1,7	Varmt brugsvand	4,5
Opvarmning af vbv	0,1		
Varmepumpe	0,0		
Ventilatorer	4,7		
Pumper	0,3		
Køling	0,0		
Totalt elforbrug	37,4		
		Ydelse fra særlige kilder	
		Solvarme	0,0
		Varmepumpe	0,0
		Solceller	1,4
		Vindmøller	0,0

Figur 57 - Nøgletal for energibehovet efter implementering af forbedringsforslag.

Faktisk forbrug

Det faktiske forbrug ligger 6,3 kWh/m²/år over det beregnede energibehov, hvilket er i tråd med den tidligere observerede afvigelse på 7,9 kWh/m²/år iht. kap. 5.4.2.

Eksisterende energiramme/energiebehov.

Alle øvrige parametre er fastholdt:

- Indetemperatur: 22,85 °C.
- Varmtvandsforbrug: 62,5 l/m²·år.
- Apparatureffekt: 1,52 W/m².
- Personbelastning: 1 W/m².

Derimod er ventilationen opdateret til et balanceret mekanisk ventilationsanlæg med luftskifte i henhold til kap. 5.6.1.5 *Ventilation*.

Økonomisk rentabilitet

Det samlede investeringsbehov for scenarie 5 – inklusive forbedring af klimaskærm, etablering af mekanisk, balanceret ventilation, tilslutning til fjernvarme samt installation af solceller – udgør 7,17 mio. kr.

De årlige driftsbesparselser er beregnet til ca. 202.000 kr., hvilket giver en tilbagebetalingstid på 36 år. Dog viser nutidsværdien over en 50-årig periode en totaludgift 12,0 mio. kr.

Klimamæssig rentabilitet

Scenarie 5 resulterer i en samlet CO₂-driftsbesparselse på ca. 1,39 mio. kg over 50 år. Den indlejlrede CO₂-udgift til materialer og tekniske installationer udgør ca. 0,11 mio. kg, hvilket giver et CO₂-afkast efter blot 4 år og en netto klimabesparselse på ca. 1,28 mio. kg CO₂-ækv. over analyseperioden.

Nøgletallene for scenarie 5 fremgår af Tabel 48.

Variant	Scenarie 5
U-værdi (W/m ² K)	-
Energibesparelse (kWh/m ² /år)	105,1
Anskaffelse (kr.)	7.170.848,00
Nutidsværdi efter 50 år (kr.)	12.009.952,00
Årlig besparelse (Kr.)	201.531
Tilbagebetalingstid (år)	36
CO ₂ -driftsbesparselse over 50 år (kg)	1.386.768
Total CO ₂ -udgift for optimeringen (kg.)	106.594
CO ₂ -afkasttid (år)	4
Total CO ₂ -besparelse over 50 år (Kg.)	1.280.175
Rentabel (LCC)	✓
Rentabel (LCA)	✓

Tabel 48 - Nøgletal for Scenarie 5.

Det bemærkes, at der i beregningen af rentabiliteten ikke er medtaget udgifter til udskiftning af dampspærre i lofter og vægge eller til fjernelse af den eksisterende indvendige isolering omkring bjælker med efterfølgende udvendig isolering. Disse tiltag er forudsat at udgøre en del af den almindelige planlagte vedligeholdelse og ikke en direkte konsekvens af energirenoveringen.

Det understreges, at det vil være økonomisk og praktisk fordelagtigt at gennemføre disse arbejder i forbindelse med energirenoveringen, når adgang til konstruktionerne allerede er etableret. En samlet

gennemførelse kan minimere omkostningerne til stillads, åbning og reetablering samt reducere geneperioden for beboerne.

Tilsvarende gælder for fugtsikring af kælderen, som med fordel kan udføres i sammenhæng med den udvendige efterisolering af facaden på bygning A. En koordineret indsats kan sikre bedre sammenhæng mellem klimaskærmens funktioner og dermed både forbedre bygningens holdbarhed og indeklimaforhold.

5.6.4 Indeklima

For at kunne opnå renoveringsklasse 1 og en bedre score i IK-Kompasset er der set på mulighederne for at forbedre indeklimaet. Som nævnt i kap. 3.1.3 *Frivillige renoveringsklasser*, stilles der i renoveringsklasse 1 krav til indeklimaet, herunder mekanisk ventilation samt overholdelse af sommerkomfort i henhold til SBI 213.

Det betyder, at temperaturen ikke må overstige 27 °C i mere end 100 timer om året, og 28 °C må ikke overskrides i mere end 25 timer om året.

Et af de områder, hvor indeklimaet kan forbedres, og hvor der kan opnås en højere score i IK-Kompasset, er dagslysforholdene. Ifølge 10 %-reglen skal opholdsrum have tilstrækkelig dagslysadgang. Ingen af de to udvalgte boliger opfylder oprindeligt dette krav, og en forbedring vil kræve øget vinduesareal. Dette vil dog med stor sandsynlighed også medføre en øget solvarmetilførsel i boligerne.

I det følgende undersøges først, hvilke tiltag der er nødvendige for at opfylde dagslyskravet. Herefter vurderes sommerkomforten i Be18, efterfulgt af en BSim-simulering. Til sidst samles alle resultater i en samlet vurdering i IK-Kompasset for at analysere, hvilken effekt energirenoveringstiltagene har haft på den samlede indeklimavurdering.

5.6.4.1 Dagslys

Bolig A.0.1 er en etværelses lejlighed med et gulvareal på 25 m² og et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 5,2%.

For at forbedre dagslysforholdene er der i samme facade tilføjet et ekstra vindue/fransk altan, identisk med det eksisterende, for at fordoble glasandelen. Da hele bygningen får udskiftet vinduer og døre, ændres vinduestypen en smule, hvilket har en betydning for dagslyset.

De nye vinduers egenskaber, der indgår i beregningen, er følgende:

- Glasandel (FF): 64 %. Dette svarer til de eksisterende vinduer, da der ikke ændres på vinduets udtryk.
- Lys-transmittans (LT): 70 %. Denne værdi er lidt konservativ, men det forventes, at de fleste nye vinduer kan leve op til dette niveau. Samlet set udgør det en forbedring i forhold til de eksisterende vinduer.
- Skyggeforhold: Vurderes at være uændrede i forhold til de eksisterende forhold. Dog er væggen, som vinduet sidder i, blevet dybere som følge af den udvendige efterisolering, hvilket medfører en reduktionsfaktor på 3 %.

Samlet set medfører installationen af nye vinduer og den mindre reduktion i vægtykkelse, at boligen opfylder dagslyskravet. Det korrigerede forhold mellem glasareal og gulvareal når op på de krævede 10 %, som er minimumskravet. Det vurderes ikke muligt at tilføje yderligere vinduer i boligen, da den indgår i en række af otte ens lejligheder af samme type.

Der kunne i princippet tilføjes et ekstra vindue i gavlen på den enkeltstående gavllejlighed. Da denne løsning ikke kan overføres til de øvrige lejligheder, er den ikke medtaget i den samlede vurdering.

I bolig B.1.1 er der tale om en bolig med et separat soveværelse samt et opholdsrum bestående af stue og køkken. Soveværelset har et areal på 12 m², og opholdsrummet (stuen) har et areal på 32 m².

Stuen har oprindeligt et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 7,7 %, mens soveværelset har et tilsvarende forhold på 19 %. På trods af at soveværelset opfylder dagslyskravet, gør stuen det ikke, og derfor overholder boligen som helhed ikke kravet om 10 % korrigeret glasareal i forhold til gulvareal.

Der er begrænsede muligheder for at forbedre dagslyset i stuen ved at indsætte flere vinduer i facaden. Det er derfor ikke vurderet som realistisk at fjerne brystningen for at trække vinduerne helt ned til gulvet. En sådan løsning kunne måske forbedre forholdet mellem glas- og gulvareal, men den reelle dagslyseffekt i rummet vurderes som begrænset.

I stedet er der set på muligheden for at tilføje et ovenlysvindue, som kan bidrage til at føre dagslyset længere ind i boligen. Som en del af energirenoveringen blev vinduerne udskiftet, og de nye vinduers egenskaber er de samme som dem, der er beskrevet for bolig A.0.1. Der er heller ikke nævneværdige ændringer i skyggeforhold eller vægtykkelse.

Det tilføjede ovenlysvindue har følgende egenskaber:

- Areal: 1,1 m².
- Glasandel (FF): 68 %.
- Lys-transmittans (LT): 68 %.
- Maksimal dybde i tagkonstruktionen: 80 cm.
- Reduktionsfaktor pga. lysindfald gennem taget: 0,54.

Med tilføjelsen af ovenlysvinduet i stuen opnås et dagslysforhold på 10,8 % i opholdsrummet. Soveværelset bevarer niveauet på 19 %. Samlet set opnår boligen et korrigeret forhold mellem glasareal og gulvareal på 13 %, og opfylder kravet til dagslys.

Løsningen med ovenlysvindue udføres for alle fire boliger på 1. sal i bygning B, som er identiske med bolig B.1.1, for at forbedre dagslysforholdene.

Dagslysberegningerne kan ses i *Bilag 8 – Dagslysberegninger*.

5.6.4.2 Sommerkomfort Be18

I forbindelse med energirenoveringen er alle vinduer og døre i bygningen blevet udskiftet for at reducere varmetabet gennem klimaskærmen. Derudover er der, for at opnå et bedre indeklima, tilføjet flere vinduer i nogle af boligerne. De nye vinduer og døre, der er anvendt i projektet, har følgende egenskaber:

Vinduer og døre i facader:

- U-værdi: 0,85 W/m²K.
- Glasandel (FF): 64 %.
- Lys-transmittans (LT): 70 %.
- G-værdi: 0,55.

Ovenlysvinduer:

- U-værdi: 0,92 W/m²K.
- Glasandel (FF): 64 %.
- Lys-transmittans (LT): 70 %.
- G-værdi: 0,47.

I bolig A.0.1 er der, som beskrevet i kap. 5.6.4.1 *Dagslys*, blevet tilføjet en ekstra fransk altan, hvilket betyder, at solpåvirkningen nu er fordoblet. Personbelastningen og apparatforbruget er uændret og følger standardværdierne i henhold til SBI 213. Derudover er klimaskærmen for boligen blevet forbedret med udvendig efterisolering samt nye vinduer og døre, hvilket samlet set bidrager til en bedre isoleringsevne.

Begge franske altaner åbner indad og kan åbnes helt, hvilket giver mulighed for dobbelt så stor naturlig ventilation som før. Det er dog stadig kun ensidet ventilation, da begge altaner er placeret i samme facade.

Tabel 49 viser, at sommerkomforten kan overholdes, hvis gardiner rulles ned manuelt i de mest solpåvirkede perioder. Dette reducerer antallet af timer med temperaturer over 27 °C, men har ingen effekt på antallet af timer over 28 °C.

I bolig B.1.1 betragtes stuen og soveværelset som ét samlet rum, og det vurderes derfor som et stort rum på 44 m². Ydervæggene består næsten udelukkende af vinduespartier, men kun få af disse – herunder én altandør – kan åbnes. For at forbedre mulighederne for naturlig ventilation er det derfor valgt at øge åbningsarealet ved at gøre flere af de nye vinduer oplukkelige. Der beregnes med et åbningsareal på 3 m², bestående af tophængte vinduer.

Vinduernes udformning er bevaret som før renoveringen, og der er tilføjet et ovenlysvindue, som bidrager til øget naturlig ventilation og forbedret luftskifte i boligen. Da alle vinduer vurderes at være placeret i samme facade, klassificeres ventilationen som ensidet naturlig ventilation.

I Tabel 49 fremgår det, at kravene til sommerkomfort overholdes. Derudover bidrager brugen af indvendige gardiner i de mest solbelastede perioder positivt ved yderligere at reducere antallet af timer med overtemperatur.,

Lejlighed	Antal timer over 27°C	Antal timer over 28°C
A.0.1	70	16
B1.1	55	10
Med indvendig solafskærmning i form af gardiner.		
A.0.1	58	16
B1.1	41	6

Tabel 49 - Sommerkomfort Be18.

5.6.4.3 Energiramme

Tilføjelsen af ekstra facade- og ovenlysvinduer for at opfylde dagslyskravet på 10 % medfører en reduktion af det isolerende facade- og tagareal, hvilket øger bygningens samlede energiforbrug og resulterer i en stigning i overtemperatur fra 2,6 til 3,1 procentpoint. Af Tabel 50 fremgår det desuden, at transmissionstabet stiger med 0,1 W/m². For at kompensere for det øgede energibehov kan solcellearealet øges, så den årlige elproduktion når op på 4.232 kWh – en stigning på cirka 600 kWh i forhold til scenarie 5. Dette vurderes som en nødvendig justering for at kunne opnå et forbedret indeklima, herunder bedre dagslysforhold, og samtidig overholde kravene til overtemperatur i henhold til SBI 213.

Emne	Forbedring	Nøgletal kWh/m ²	Besparelse kWh/m ²	Transmissionstab W/ m ²	Energimærke
Valgt energiramme scenarie 5 Kap. 5.6.2		52,4	-	13,2	A2010
Klimaskærm	Tilføjelse af 8 vinduer i bygning A.	52,9	-0,5	13,4	B/ Renovering klasse 2*
Klimaskærm	Tilføjelse af 8 vinduer i bygning A + 4 ovenlysvinduer i bygning B.	53,7	-0,6	13,4	B/ Renovering klasse 2*
Klimaskærm	Udvidet solcelleanlæg til 4.232 kWh om året.	52,4	0	13,4	A2010 Renovering klasse 1

Tabel 50 - Energiramme med samme komfort og dagslys overholdt.

* Kravene til 10 % dagslys og sommerkomfort er overholdt i henhold til Renoveringsklasse 1, men det samlede energiforbrug er for højt til, at bygningen kan opfylde energikravet til Renoveringsklasse 1.

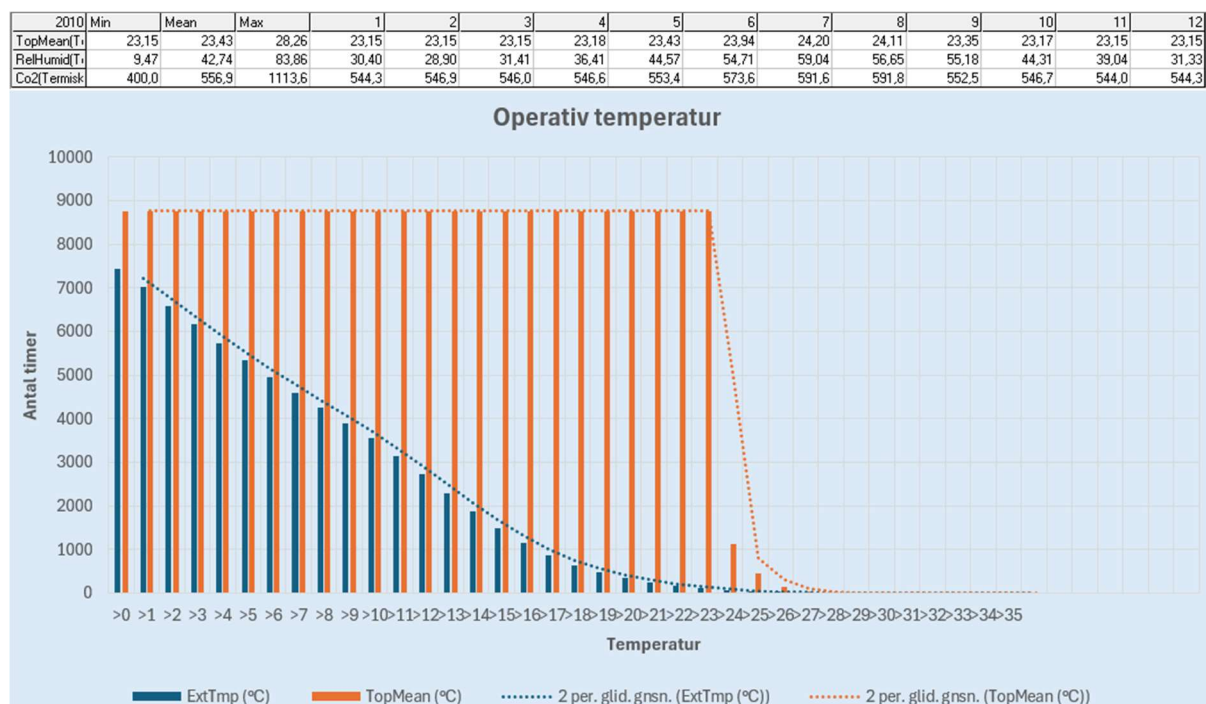
5.6.4.3.1 BSim indeklimasimulering

De bedst egnede løsningsforslag er blevet implementeret i BSim-modellerne for både bolig A.0.1 og bolig B1.1. Udover de valgte tiltag er der tilføjet ekstra vinduer iht. til ovenstående analyse.

Bolig A.0.1 – Implementerede ændringer

- Tilføjelse af et ekstra vestvendt vindue med samme lysningsmål som det eksisterende.
- Efterisolering med 95 mm mineraluld under kælderdaekket.
- Efterisolering med 125 mm udvendig mineraluld på helstensfacaden.
- Installation af mekanisk, balanceret ventilationsanlæg.
- Reduktion af infiltrationen til BR18-niveauet på 1,5 l/s·m² ved 50 Pa.

Figur 58 viser den simulerede fordeling af operativ temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂-niveau for et helt kalenderår (DRY 2010-vejrfil).



Figur 58 - Oversigt over bolig A.0.1 efter implementering af de udvalgte forbedringsforslag. Tabellen viser den gennemsnitlige operative temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂-niveau pr. måned, mens figuren vis antal timer over en temperaturdifference, som går fra 0 til 35°C.

Overtemperatur: Antallet af timer med operativ temperatur over 27 °C er 53, mens temperaturen overstiger 28 °C i 5 timer. De anbefalede grænser i (Mette Havgaard Vorre, 2017) overholdes således fortsat. Den mindre stigning i varme timer ift. grundmodellen (som havde 0 timer > 27 °C) skyldes primært det nye vestvendte vindue, der tilfører solvarme sidst på dagen.

Relativ luftfugtighed: Den gennemsnitlige relative luftfugtighed er nu ca. 43% – et lille fald i forhold til grundmodellen (ca. 46%). Den relative luftfugtighed ligger derfor fortsat sikkert på vanddampdiagrammet. De laveste og højeste timemiddelværdier er henholdsvis 9 % og 84 %, men de forekommer fortsat kun kortvarigt.

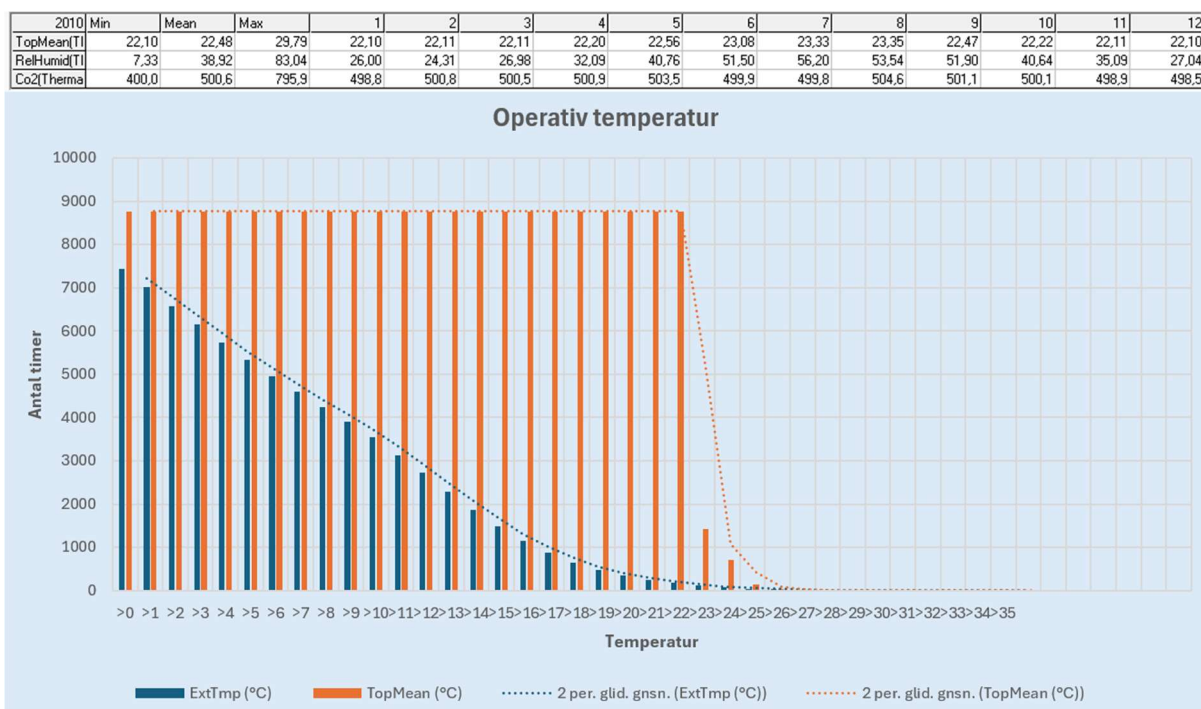
Luftkvalitet (CO₂): Det simulerede middel-CO₂-niveau er reduceret til ca. 550 ppm (mod 620 ppm i grundmodellen) som følge af installationen af et mekanisk, balanceret ventilationsanlæg.

Samlet vurdering: Simuleringen viser, at energirenoeringen af bolig A.0.1 medfører en begrænset stigning i overtemperatur, som dog fortsat ligger under komfortgrænserne. Samtidig forbedres både luftkvalitet og fugtniveau. Det vestvendte vindue bidrager til, at dagslyskravet i BR18 (2025) overholdes.

Bolig B.1.1 – Implementerede ændringer

- Tilføjelse af et tagvindue (mål: 1,178 × 0,942 m).
- Installation af mekanisk, balanceret ventilationsanlæg.
- Reduktion af infiltrationen til BR18-niveauet på 1,5 l/s·m² ved 50 Pa.

Figur 59 viser den simulerede fordeling af operativ temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂-niveau for et helt kalenderår (DRY 2010-vejrfil).



Figur 59 - Oversigt over bolig B.1.1 efter implementering af de udvalgte forbedringsforslag. Tabellen viser den gennemsnitlige operative temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂-niveau pr. måned, mens figuren vis antal timer over en temperaturdifference, som går fra 0 til 35°C.

Overtemperatur: Antallet af timer med operativ temperatur over 27 °C er 25, og temperaturen overstiger 28 °C i 6 timer. De anbefalede komfortgrænser i (Mette Havgaard Vorre, 2017) overholdes dermed fortsat. Det lille fald i varme timer ift. grundmodellen skyldes effekten af det mekaniske, balancerede ventilationsanlæg, som opvejer den ekstra solvarme fra tagvinduet.

Relativ luftfugtighed: Den gennemsnitlige relative luftfugtighed er nu ca. 39 % – et lille fald i forhold til grundmodellen (ca. 42%). Den relative luftfugtighed ligger derfor fortsat sikkert på vanddampdiagrammet. De laveste og højeste timemiddelværdier er henholdsvis 7 % og 83 %, men de forekommer fortsat kun kortvarigt.

Luftkvalitet (CO₂): Det simulerede middel-CO₂-niveau er reduceret til ca. 500 ppm, sammenlignet med 532 ppm i grundmodellen.

Samlet vurdering: Energirenoeringen af bolig B.1.1 medfører en mindre reduktion i antallet af timer med overtemperatur. Både luftkvalitet og fugtniveau forbedres, og det nye tagvindue bidrager til opfyldelse af dagslyskravet i BR18 (2025).

5.6.4.4 Ik-kompas

Som beskrevet i kap. 5.4.4.2 *IK-Kompas* er der i forbedringsforslaget foretaget en vurdering og justering af bygningsgeometrien med henblik på at opfylde kravene til dagslys og sommerkomfort. Dette er sket i henhold til 10 %-reglen for dagslys, jf. i kap. 5.6.4.1 *Dagslys og samt gennem indeklimasimuleringer med fokus på overtemperatur*, jf. kap. 5.6.4.3.1 *BSim indeklimasimulering*. I dette kapitel beskrives og vurderes udelukkende de justeringer, der er foretaget iht simuleringen. I *Bilag 9 – IK-Kompas* findes både IK-Kompas-modellen og resultaterne, før og efter justeringerne, anvendt til vurdering af indeklimaet i boligerne A.0.1 og B.1.1.

Bolig A.0.1 nye IK-Kompas score er 70 point, hvilket er en forbedring på 4 point i forhold til baselinesimuleringen, som havde en score på 66 point. På trods af forbedringen forbliver boligen i indeklimaklasse "C".

Den største forbedring ses inden for visuelt indeklima, hvor dagslyskvaliteten øges markant fra 1,8 til 6 point. Det samlede pointtal for visuelt indeklima stiger dermed fra 6,8 til 8.

Implementeringen af et nyt mekanisk balanceret ventilationsanlæg bidrager også positivt til indeklimaet, men forbedringerne ligger primært inden for parametre, som vægter lavere i IK-Kompas.

Samlet set viser analysen, at den gennemførte energirenovering har en positiv effekt på boligens indeklima, særligt i forhold til dagslys.

Bolig B.1.1 nye IK-Kompas score er 75 point, hvilket er en forbedring på 7 point i forhold til baselinesimuleringen, som havde en score på 68 point. Med disse forbedringer rykker boligen op boligen i indeklimaklasse "B".

Den største forbedring ses inden for atmosfærisk indeklima, hvor det nye mekanisk, balanceret ventilationsanlæg forbedret scoren med 2,2. Det samlede pointtal for atmosfærisk indeklima stiger dermed fra 5,3 til 7,5, hvilken er en stor forbedring for indeklimaet.

5.7 Delkonklusion af forbedringsforslag

De gennemførte analyser viser, at energirenovierung af *Skovglimt* er både teknisk muligt og klimamæssigt forsvarligt, men samtidig økonomisk udfordrende – særligt når konstruktionerne i forvejen har relativt gode U-værdier. Mange af tiltagene opnår ikke økonomisk rentabilitet inden for analyseperioden, men fremstår stadig som LCA-rentable, hvilket understreger, at miljømæssige gevinster ofte kan retfærdiggøre investeringer, selv når de ikke er økonomisk tilbagebetalt.

Bygning A adskiller sig som den mest oplagte bygning for energiforbedringer, da den er den ældste og mindst energieffektive del af *Skovglimt*.

Tiltag som mekanisk, balanceret ventilation og skift af varmekilde bidrager væsentligt til reduktion i både energiforbrug og CO₂-udledning.

Klimaskærmtiltag, udskiftning af isoleringsmaterialer, har begrænsede energigevinster, men kan være afgørende for fugtsikring og byggeteknisk holdbarhed. Særligt anbefales det at udskifte indvendig isolering omkring bjælker med udvendig isolering, hvor det alligevel er nødvendigt at åbne konstruktionen i forbindelse med den almindelige vedligeholdelse.

Det er vigtigt at påpege, at EPD-data har stor betydning for LCA-rentabilitet. Små variationer i disse data har stor betydning for den beregnede CO₂-afkasttid og kan være afgørende for, om et tiltag fremstår som klimamæssigt rentabelt.

Baseret på en helhedsvurdering fremstår Scenarie 5, med indeklimaforbedringer, som den mest balancerede og fremtidssikrede løsning. Scenariet opfylder kravene til energimærke A2010 og renoveringsklasse 1 og kombinerer teknisk gennemførlighed med driftsbesparelser og lave CO₂-belastninger. En styrke ved scenariet er, at der indgår solceller, hvilket harmonerer med de kommende lovkrav fra 2028, hvor større offentlige bygninger vil blive pålagt etablering af solceller. Derudover matcher scenariet den forventede tilslutningspligt til fjernvarme, som forventeligt planlægges i området.

Selvom der ikke er behov for omfattende tiltag for at løfte bebyggelsen til energimærke D – bl.a. grundet modernisering i 2005 med efterisolering af tag – viser analyserne, at et højere ambitionsniveau medfører betydelige CO₂-reduktioner og forbedret indeklima. Indeklimasimuleringerne viser forbedringer i både, fugtforhold, CO₂-niveauer og dagslys, og begge simulerede boliger opnår forbedringer i deres indeklimascore i IK-kompasset.

5.8 Fremtidige klimaforhold

For at vurdere, om energirenoveringen er langtidsholdbar, analyseres bygningens ydeevne under fremtidige klimaforhold. Ved hjælp af BSim og Be18 undersøges, hvordan øgede temperaturer og ændret solindstråling frem mod 2050 og 2090 påvirker sommerkomfort, energibehov og elproduktion.

5.8.1 BSim

For at undersøge, hvordan et varmere fremtidsklima påvirker sommerkomforten, er boligerne A.0.1 og B.1.1 blevet simuleret med yderligere to vejrfiler, ud fra (Wittchen & Jønsson, 2021):

1. Det nuværende referenceår DRY 2010.
2. og to fremskrivninger – 2050'erne og 2090'erne – udarbejdet som typiske meteorologiske år (TMY). Fremtidsscenarierne bygger på CORDEX-data for IPCC-scenariet RCP 8.5 og er bias-korrigeret mod måleserien fra DMI's referencestation i Sjælsmark.

Tabel 51 sammenligner simuleringerne af boligerne efter implementering af de foreslåede forbedringsforslag.

Bolig	Vejrdata	Timer > 27 °C	Timer > 28 °C	Gns. RF [%]	Gns. CO ₂ [ppm]
A.0.1	DRY 2010	53	28	43	550
	TMY 2050	203	86	47	571
	TMY 2090	311	79	50	580
B1.1	DRY 2010	25	6	39	500
	TMY 2050	97	59	43	503
	TMY 2090	62	18	47	503

Tabel 51 - Sammenligning af forskellige vejrdatabaser i BSim-simuleringerne.

Resultaterne viser, at fremtidens klima tydeligt påvirker indeklimaet i begge boliger, især med flere timer med overtemperatur over komfortgrænsen. Bolig A.0.1 har særligt store stigninger i overtemperaturer, og begge boliger oplever øget relativ luftfugtighed.

Dette indikerer, at de nuværende forbedringstiltag muligvis ikke er tilstrækkelige på længere sigt i forhold til indeklimaet. Supplerende løsninger som mekanisk køling, forbedret solafskærmning eller yderligere bygningsmæssige optimeringer bør derfor overvejes for at sikre tilfredsstillende indeklimaforhold i fremtidens klima.

Alle BSim-simuleringer kan findes i *bilag 13 – BSim-simuleringer*.

5.8.2 Be18

Ved hjælp af Be18 kan der indsættes fremtidige klimadata for at simulere, hvordan bygningen vil præstere under ændrede klimaforhold. I denne analyse er der anvendt klimascenarier for år 2050 og 2090 (Wittchen & Jønsson, 2021), for at vurdere bygningens energibehov og robusthed på længere sigt. Denne tilgang muliggør en vurdering af potentielle fremtidige udfordringer og understøtter en langsigtet planlægning, der skal sikre, at bygningen også i fremtiden forbliver komfortabel og energieffektiv.

I Tabel 52 fremgår nøgletal for energibehov, samlet varmebehov, årlig elproduktion fra solceller og overtemperatur for tre scenarier: Renoveringsklasse 1, fremtidsscenarie 2050 og 2090. Analysen viser en klar tendens: I takt med, at klimaet bliver varmere, reduceres bygningens samlede energibehov, særligt for rumopvarmning, som falder til under det halve i 2090 sammenlignet med i dag.

Samtidig ses en gradvis stigning i antallet af overtemperaturtimer i sommerperioder. Som også vist i kap. 5.8.1 BSim, hvor løsninger som mekanisk køling, effektiv solafskærmning eller yderligere bygningsmæssige optimeringer kan være nødvendige for at sikre tilfredsstillende termisk komfort i fremtidens klima.

Solcelleydelsen falder svagt i fremtidsscenarierne, hvilket kan tilskrives ændringer i solindstråling eller skydække. Det kan derfor blive nødvendigt at øge det installerede solcelleareal for at opretholde det ønskede energibidrag.

Alle Be18-beregninger kan findes i *bilag 14 – Be18-beregninger*.

Samlet set viser analysen, at bygningens energibehov og ydeevne ændrer sig markant over tid som følge af klimaændringer. En fremtidssikret bygningsstrategi bør derfor inkludere tiltag til både reduktion af opvarmningsbehov og håndtering af øget varmelast gennem passive eller aktive kølestrategier.

Emne	Nøgletal kWh/m ²	Rumopvarmning Varmebehov Årlig MWh	Solcelleydelse årlig kWh	Overtemperatur
Energiramme for renoveringsklasse 1	52,4	42,65	4.232	3,1
Fremtidig energiramme for 2050	47,2	30,96	3.992	3,4
Fremtidig energiramme for 2090	42,6	20,54	3.619	3,6

Tabel 52 – påvirkning af energirammen med fremtidens klima.

6 Diskussion

Tilstandsvurdering

Tilstandsvurderingen blev udført uden destruktive indgreb, hvilket gav et hurtigt overblik, men efterlod flere kritiske usikkerheder.

Termografien viste kuldebroer med overfladetemperaturer ned til 8 °C; uden adgang bag beklædningerne vides det dog ikke, om der skjuler sig fugt, råd eller skimmel i isoleringen. Dampspærrens reelle tæthed er tilsvarende uafklaret, så utætheder ved samlinger og installationer kan gøre varme- og fugtsimuleringerne mindre pålidelige.

Destruktive indgreb og materialeprøver kunne have påvist eventuelle restforekomster af PCB og asbest. Da sådanne undersøgelser ikke er foretaget, kan det ikke udelukkes, at der findes skadelige materialer, som ville kræve sanering. I så fald kunne enkelte bygningsdele have haft behov for udskiftning, uanset resultaterne af den ovenstående analyse.

Kalibrering af BSim-modeller

Kalibreringen af BSim-modellerne tager udgangspunkt i 36 dages målinger (14. januar – 18. februar 2025) fra to boliger og et lokalt klimadatasæt fra DMI's station i Flakkebjerg. For at opnå overensstemmelse mellem simulerede og målte temperaturer, relativ fugt og – i begrænset omfang – CO₂ blev de interne varmelaster, el-apparatprofiler og internt personbelastning justeret, indtil data passede. Disse "kalibreringsskruer" er imidlertid stærkt adfærdsafhængige og kan variere over året. Når modellen efterfølgende køres et helt år på standardklimadata (DRY 2010), oversættes vinterjusteringerne derfor til et klima, der både tidsmæssigt og temperaturmæssigt afviger fra det, den er indstillet på.

Det betyder, at sommerkomforten er realistisk i forhold til DRY, men hviler på antagelser om interne laster og ventilation, som ikke er valideret i en varmere periode. Hertil kommer, at kun to boliger er kalibreret, så resultaterne kan ikke uden videre generaliseres til de øvrige boliger, der kan have andre brugsprofiler. Samlet giver den korte målehorisont, brugen af vinterdata i kalibreringen og overgangen til en standardiseret klimafil en usikkerhed, som bør kvantificeres med følsomhedsanalyser og udvides med sommermålinger, før modellen anvendes som endeligt beslutningsgrundlag.

Kalibrering af energiforbruget

Standard-Be18-modellen anslår det årlige energibehov til 156,2 kWh/m²/år, hvoraf 102,9 kWh/m²/år går til rumopvarmning, hvilket giver energimærke E. For at bringe beregningen på linje med de registrerede forbrugstal blev modellen kalibreret, så det simulerede energiforbrug steg til 164,1 kWh/m²/år.

Modellen er kalibreret med følgende parametre:

- indetemperaturen hævet fra 20,0 °C til 22,85 °C,
- ventilationsraten sænket fra 0,62 l/s/m² til $\approx 0,46$ l/s/m²,
- reduktion af interne laster – varmt brugsvand 250 → 62,5 l/m²/år, apparatur 3,5 → 1,52 W/m² og personlast 1,5 → 1,0 W/m².

Disse "kalibreringsskruer" viser, hvor følsomt energiforbruget er over for antagelser om beboeradfærd og især over for luftskifte. Da bygningen ikke har dokumenterede ventilationsplaner eller -beregninger, kan små ændringer i de faktiske ventilationsparametre ændre varme- og elbehovet markant. For at sikre korrekt input i modellen bør der derfor foretages stedlige målinger af volumenstrømme og driftstider, før det endelige energiforbrug fastlægges.

Begrænsninger i simuleringsværktøjer

HEAT2-analysen giver et godt indblik i U- og Ψ -værdierne, men den regner kun varmeledning i et todimensionelt snit. Varme, fugt og kuldebroer bevæger sig tre-dimensionalt i hjørner, og vinduesfæse m.m.; der kan overføres betydeligt mere varme (og opstå lavere overfladetemperaturer) end modellen viser. Resultatet er, at både varmetab og kondensrisiko kan være undervurderet netop dér, hvor problemerne oftest ses i praksis.

WUFI-beregningerne lider af den samme reduktion – her endnu mere udtalt, fordi WUFI Pro simulerer hygrotermiske forhold en-dimensionelt gennem væggen tykkelse. Fugttransport i ikke en-dimensionelle steder forbliver usynlig for modellen. Samtidig antages randbetingelserne at være ensartede på hele fladen, hvilket sjældent passer ved ujævnt solindfald eller læforhold.

Tilsammen betyder disse begrænsninger, at simuleringer kan give et for optimistisk billede af både varme- og fugtforhold.

Totaløkonomi

LCC-analysen i dette projekt er gennemført med faste energipriser, som antages at være konstante i hele kalkulationsperioden. Denne tilgang forenkler analysen, men skjuler samtidig, hvor følsom rentabiliteten er over for prisændringer – en væsentlig usikkerhedsfaktor, da energipriser historisk har udvist betydelige udsving (Victoria Havsteen Branner, 2023).

I projektets LCA-del fremskrives primærenergifaktorerne dynamisk iht. (COWI, 2020). En tilsvarende dynamisk prisfremskrivning i LCC-beregningerne vil også reducere tilbagebetalingstiden for driftstunge tiltag såsom ventilation, varmekilder og solceller. For klimaskærmsrelaterede tiltag, hvor energibesparelsen er relativt lav, vil effekten være mindre, men stadig relevant.

Projektet anvender desuden (Finansministeriet, 2021) anbefalede rentetrappe, som tager højde for tidsperspektivet ved længerevarende investeringer:

- 3,5 % realrente for år 0–35.
- 2,5 % for år 36–70.
- 1,5 % derefter.

Denne metode sikrer, at investeringer med langsigtede effekter ikke undervurderes. Det anbefales dog at supplere standardberegningerne med følsomhedsanalyser, hvor energipriserne fremskrives med varierende vækst. Dette bidrager til at synliggøre den usikkerhed, der følger med prisudviklingen, og giver en mere robust analyse.

Til dette formål kan anvendelsen af TotalTool2 bruges, som giver et samlet overblik over anlægs- og driftsomkostninger ved energirenoveringstiltag. Værktøjet understøtter desuden scenariebaserede analyser, der tydeliggør, hvornår forskellige løsninger bliver økonomisk attraktive – f.eks. ved prisstigninger eller ændringer i finansieringsvilkår (totalconcept, 2025).

Priser

I de økonomiske beregninger er der anvendt AI-genererede enhedspriser for de forskellige renoveringstiltag frem for branchestandardiserede prisdatabaser. Denne tilgang har givet mulighed for hurtig opstilling af overslagsberegninger, men indebærer samtidig en vis metodisk usikkerhed. De anvendte priser afspejler ikke nødvendigvis det aktuelle marked, geografiske forhold eller entreprisemæssige betingelser.

Prisniveauer kan variere betydeligt afhængigt af en række faktorer, herunder:

- Geografisk placering og lokale markedsvilkår.
- Udbudsform og entreprisevalg.
- Materialepriser og tilgængelighed.
- Arbejdskraftomkostninger.
- Projektstørrelse og kompleksitet.
- Uforudsete forhold og risikopuljer.

Særligt ved større renoveringsopgaver vil entreprenørydelser, tilpasninger til eksisterende forhold og uforudsete udgifter kunne påvirke den samlede økonomi. Det betyder, at de udførte LCC-analyser i nogle tilfælde kan fremstå for optimistiske og bør vurderes med forbehold.

For at øge beregningernes præcision og validitet anbefales det, at der i den videre projektering indhentes prisindikationer fra relevante entreprenører – gerne baseret på konkrete beskrivelser og mængdeopgørelser. Det vil give et mere realistisk og projektspecifikt grundlag for de økonomiske vurderinger.

Alternativt kan anvendelsen af opdaterede og anerkendte prisdatabaser benyttes som en mellemvej, hvis der endnu ikke foreligger konkrete tilbud i den tidlige projekteringsfase.

EPD-datasæt

Valget mellem generiske og specifikke EPD-datasæt har betydelig indflydelse på både LCA-resultater og materialevalg i projektet. I flere tilfælde – eksempelvis for ventilationsanlægget – er der observeret forskelle på flere tons CO₂-ækvivalenter, alt afhængigt af hvilket EPD-sæt der anvendes. I ventilationsforbedringsforslaget gav den generiske EPD en totaludledning på 11,3 ton CO₂-ækv., mens den specifikke resulterede i 14,3 ton – en forskel på næsten 27 %. Sådanne afvigelser kan være afgørende, når to løsninger er tæt på hinanden i samlet klimabelastning eller CO₂-afkasttid.

Den metodiske forskel mellem datasættene skyldes typisk flere forhold:

1. Dataspecifikke EPD'er afspejler ofte nyere eller lokal produktion med præcise procesdata og kortere transportafstande (EPD Danmark, 2021).
2. Generiske EPD'er hviler derimod på gennemsnitsdata, ældre emissionstal eller forsigtige antagelser i affaldsfasen, der ikke nødvendigvis repræsenterer de faktiske forhold i projektets kontekst (Social- og boligstyrelsen, 2023).

Et særligt relevant eksempel i denne rapport er træfiberisolering. Her bygger analysen på et generisk EPD-datasæt, som antager, at materialet forbrændes ved end-of-life, hvilket medfører en fuld frigivelse af den biogent bundne kulstof. Det resulterer i en relativt høj klimabelastning på 14.021 kg CO₂-ækv. for den pågældende mængde træfiber. Til sammenligning ligger mineraluld på 5.405 kg CO₂-ækv., blandt andet fordi det antages deponeret uden væsentlig kulstoffrigivelse.

Denne forskel betyder ikke nødvendigvis, at træfiberisolering er et dårligere valg klimamæssigt – men at det er følsomt over for affaldsstrategien. Hvis man i stedet antager, at træfiber genanvendes eller deponeres

uden forbrænding, vil klimabelastningen falde betydeligt, fordi den biogene CO₂ forbliver lagret. Dermed kunne træfiber – i visse scenarier – konkurrere tættere med både papiruld og mineraluld.

Det rejser to væsentlige diskussionspunkter:

1. EPD-valgets konsekvens: Når forskellen i klimabelastning mellem to materialer i høj grad afhænger af slutbehandlingen, bør EPD'en anvendes med kritisk bevidsthed og eventuelt suppleres med følsomhedsanalyser.
2. Behovet for dokumenterede, produktspecifikke data: Især for biobaserede materialer, hvor end-of-life har stor indvirkning på GWP-resultatet, kan brugen af forældede eller generiske antagelser føre til en underkendelse af ellers gode løsninger.

I denne analyse anvendes papiruld som standardisolering i tagkonstruktionerne, fordi det samlet set har den laveste registrerede klimabelastning blandt de vurderede løsninger – men det anerkendes, at træfiber kunne have klaret sig bedre, hvis der forelå en mere retvisende affaldsprofil. Det understreger behovet for transparens i datagrundlaget og for løbende at opdatere EPD'er i takt med, at affaldsstrategier og genanvendelsesteknologier udvikler sig.

Drifts- og vedligeholdelsesrisici

Ved energirenovering og teknisk opgradering af bygninger er det ikke tilstrækkeligt at vurdere investeringens rentabilitet alene på baggrund af anlægsomkostninger og forventede energibesparelser. Risikoen for driftsforstyrrelser og øgede vedligeholdelseskrav har indflydelse på den samlede livscyklusvurdering – både økonomisk og praktisk.

Øget kompleksitet og teknisk afhængighed

Tiltag som mekanisk, balanceret ventilation, varmepumper og solcelleanlæg medfører et højere teknisk kompleksitetsniveau end passive løsninger som efterisolering eller vinduesudskiftning. Med øget kompleksitet følger en større risiko for driftsfejl, nedbrud og behov for regelmæssig service. Dette kan udfordre driftsorganisationer og beboere – især i ejendomme, hvor teknisk kompetence og løbende overvågning ikke er tilgængelig.

Service- og vedligeholdelsesaftaler

Selvom nyere tekniske anlæg typisk er mere energieffektive, kan de samlede driftsomkostninger stige, hvis der ikke indregnes udgifter til serviceaftaler, reservedelsudskiftning og overvågningssystemer. Disse omkostninger bør medregnes i den samlede vurdering, så investeringen afspejler reelle driftsbetingelser.

Brugsmæssige forhold og adfærdsafhængighed

Flere tekniske løsninger er følsomme over for brugeradfærd. Eksempelvis kan beboere, der åbner vinduer i længere perioder eller deaktiverer ventilationsanlæg pga. støj eller komfortensyn, utilsigtet reducere effekten af energitiltaget. Det er derfor nødvendigt at vurdere, om løsningen kræver specifik brugeradfærd, information eller oplæring for at fungere optimalt – og om dette er realistisk i den givne kontekst.

Ansvarsplacering og tilsyn

I offentlige og almene byggerier er det afgørende at tydeliggøre ansvarsfordelingen for drift og vedligeholdelse af tekniske anlæg. Uklare snitflader mellem bygherre, driftspersonale og beboere kan føre til misforståelser og mangelfuld vedligeholdelse. Det anbefales derfor, at alle tekniske installationer ledsages af en driftsvejledning samt en tilsyns- eller serviceaftale. Manglende vedligeholdelse eller forkert styring kan resultere i bortfald af energibesparelser, nedsat levetid for anlæggene og forringet indeklima.

Mængden af solceller

I analysen er solcelleanlægget dimensioneret til 22 m² (3.448 kWh/år), hvilket svarer til det el-producerende areal, der netop bringer bebyggelsen under grænseværdien for energimærke A2010 ved anvendelse af fjernvarme. Denne tilgang sikrer overholdelse af bygningsreglementets krav, men tager ikke nødvendigvis udgangspunkt i en økonomisk optimering af anlæggets størrelse.

I praksis kan det mest rentable solcelleanlæg vise sig at være større end det minimum, der kræves for at opfylde energirammen. Den optimale størrelse afhænger bl.a. af arealtilgængelighed, elpris, egetforbrugsandel og tilslutningsforhold.

Ved udelukkende at dimensionere efter lovkrav udnyttes ikke nødvendigvis det fulde potentiale for elproduktion og dermed heller ikke det mulige økonomiske afkast. Med varierende elpriser og øget fokus på reduktion af fremtidige driftsomkostninger bør der i stedet gennemføres en følsomhedsanalyse, hvor forskellige anlægsstørrelser vurderes i forhold til investering, energiproduktion, tilbagebetalingstid og CO₂-afkast.

En sådan analyse kan afdække, hvor balancen ligger mellem højere anlægsinvestering og forbedret rentabilitet – og dermed støtte en mere informeret beslutning om anlæggets endelige dimensionering.

7 Perspektivering

De gennemførte analyser viser, at energirenovering af den eksisterende bygning op til energimærke A2010 er rentabel ud fra både en samlet økonomisk og miljømæssig synsvinkel. Det er dog vigtigt at anerkende, at beregninger skal vurderes i lyset af fremtidige usikkerheder, der kan ændre både forudsætninger og konklusioner over tid. Særligt klimaforandringer og fremtidige reguleringer vurderes som centrale faktorer, som kan påvirke beregningerne.

Klimaforandringer og komfortkrav

Med et varmere og mere fugtigt klima vil belastningerne på bygningerne ændres. Øgede udetemperaturer øger risikoen for overophedning – især i boliger med store glaspartier, sydvendte facader eller utilstrækkelig ventilation. Materialevalg med gode fugttekniske egenskaber, behovsstyret ventilation og passiv solafskærmning vil spille en større rolle i fremtidens renoveringsstrategier.

Solceller og usikkerhed om produktion

Selvom en fortsat elektrificering af energiforsyningen øger potentialet for solcelleanlæg, og der ses højere temperaturer, medfører det ikke nødvendigvis højere elproduktion. Klimascenarier fra bl.a. DMI og IPCC viser, at Danmark i fremtiden kan opleve færre solskinstimer som følge af øget skydække. Da solcellers ydeevne afhænger af både direkte og diffust solindfald, kan dette betyde, at energiproduktionen i fremtiden vil være lavere end antaget. Der er derfor behov for følsomhedsanalyser på anlægsstørrelse og produktion, så både økonomi og klimaeffekt vurderes realistisk.

Klimaskærmens voksende betydning

Selvom klimaskærmsforbedringer som øget isolering og vinduesudskiftning ofte har begrænset rentabilitet isoleret set, får de øget strategisk betydning i takt med reduktionen af varmebehov og stigende krav til komfort. I bygninger med lav termisk masse og begrænset naturlig ventilation kan forbedret klimaskærm være med til at sikre et mere stabilt indeklima. Derudover kan vi komme til at se et øget behov for mekanisk køling.

En væsentlig faktor ved energirenovering er betydningen af linjetab. Selvom U-værdien for enkelte bygningsflader kan forbedres markant, kan kuldebroer i samlinger og konstruktionsdetaljer medføre, at indeklimaet fortsat opleves som ubehageligt, eller at der opstår fugtrelaterede problemer. Analysen påviste netop betydelige linjetab i hjørnesamlinger og omkring gennemgående bjælker – også i områder, der allerede blev moderniseret i 2005. Ved fremtidige renoveringer bør der derfor rettes særlig opmærksomhed mod løsninger, der effektivt reducerer linjetab, da dette kan forbedre både bygningens energibalance og den oplevede komfort.

Økonomisk følsomhed og reguleringsmæssige ændringer

Fremtidige ændringer i energipriser, CO₂-afgifter, skærpede energikrav og faldende teknologiomkostninger kan forskyde rentabiliteten mellem forskellige løsninger. Investeringer, som i dag kun netop er rentable, kan fremover blive enten klart fordelagtige eller økonomisk uinteressante. Derfor bør LCC- og LCA-analyser suppleres med scenariebaserede vurderinger og fleksible strategier, der kan tilpasses ændrede rammevilkår.

Langsigtet investering i modstandsdygtighed

Energirenovering bør ikke kun betragtes som et middel til at reducere det nuværende energiforbrug, men som en strategisk investering i bygningens modstandsdygtighed over for fremtidens klima, energiformer og lovgivning. Det forudsætter en helhedsorienteret tilgang, hvor tekniske, driftsmæssige og miljømæssige hensyn integreres – ikke alene ud fra kortsigtet økonomisk optimering, men med blik for bygningens rolle i den grønne omstilling.

Dagslys og sommerkomfort

En anden fremtidig designparameter er balancen mellem dagslys og solbelastning. Med større vinduesarealer medfører samtidig øget risiko for overophedning – især hvis orientering og afskærmning ikke er optimeret. Resultaterne i projektet viste, at flere boliger ikke opfylder dagslyskravet trods store glasarealer, hvilket skyldes dybe facadeudhæng. Ved fremtidige renoveringer bør det overvejes, om vinduesstørrelser eller placeringer skal ændres for at opfylde både lyskrav og komfortmål – og om der bør tilføjes automatiserede afskærmningsløsninger.

8 Konklusion

Tilstandsvurderingen af *Skovglimt* viste, at bebyggelsen generelt fremstod i god stand, men med enkelte forhold, som burde adresseres i forbindelse med kommende renoveringstiltag. Der blev registreret opfugtning og saltudfældninger i murværk, begyndende slid på taginddækninger og mulig utilstrækkelig ventilation i baderum. Samtidig var flere tekniske installationer tæt på slutningen af deres tekniske levetid, og bør derfor indgå i en samlet opgradering. Dampspærresystemet og tagbeklædningen i fibercement blev vurderet at være tæt på – eller i nogle tilfælde have overskredet – deres tekniske levetid. På trods af moderniseringen i 2005 blev det derfor anbefalet en opdateret og helhedsorienteret vedligeholdelsesindsats, herunder screening for potentielt skadelige stoffer.

Indeklimaundersøgelsen baseret på dataloggere og kalibrerede simuleringer viste generelt tilfredsstillende forhold, men viste også markante kuldebroer og områder med risiko for kondens og fugt, særligt omkring udvendige hjørnesamlinger og gennemgående bjælker. Selvom skimmelvækst ikke blev konstateret, viste målingerne overfladetemperaturer under de kritiske grænseværdier og forhøjede fugtniveauer. Dette bekræftede behovet for bygningsfysiske forbedringer, som også adresserede fugttekniske forhold og sikrede indeklimaets robusthed fremadrettet.

Energiberegningen viste et energibehov på 156,2 kWh/m² år, hvilket placerede bygningen i energimærke E. Transmissionstab var markant højere end nybykravet, og den kalibrerede Be18-beregning viste et energiforbrug på 164 kWh/m² år. Dagslysanalysen viste, at ingen af de undersøgte boliger overholdt kravene i BR18, på trods af relativt store vinduesarealer. Indeklimakompasset viste en samlet indeklimamærkning på C for begge boliger, hvilket indikerede, at der var plads til forbedringer.

På baggrund af energiberegninger og tekniske analyser blev der opstillet en række forbedringsforslag, som blev analyseret ud fra teknisk gennemførlighed, totaløkonomi og klimabelastning. I de indledende analyser blev det tydeligt, at klimaskærmselementer som nye vinduer, terrændæk og ydervægge kun i få tilfælde opnåede økonomisk rentabilitet. Til gengæld var flere løsninger LCA-rentable, og nogle løsninger blev anbefalet gennemført af hensyn til fugtsikring og holdbarhed, især hvor konstruktioner alligevel blev åbnet som led i almindelig vedligehold. Samtidig viste materialevalg sig afgørende for CO₂-belastningen, hvor eksempelvis papiruld samt vinduer og døre i træ havde bedre klimaprofil end alternativer med høj indlejret CO₂.

Tekniske installationer – såsom balanceret, mekanisk ventilation og ny varmforsyning – udmærkede sig ved at give store driftsbesparelser og kort CO₂-afkasttid. Her blev især varmepumpeløsningen vurderet som attraktiv ud fra isoleret økonomi og klimabelastning. Dog blev fjernvarme valgt som hovedløsning, da der er planlagt etablering af fjernvarme i området omkring *Skovglimt*, og det blev vurderet, at tilslutningspligt ville blive pålagt, hvis netværket blev etableret. Selvom dette endnu ikke var fastlagt, blev det vurderet som en realistisk fremtidig rammebetingelse, som projektet aktivt måtte forholde sig til.

På den baggrund blev scenarie 5, med indeklimaforbedringer, valgt som samlet løsningsforslag. Scenariet kombinerede forbedringer i klimaskærm, fjernvarmeforsyning, solceller og balanceret, mekanisk ventilation, og opfyldte energimærke A2010. Det forenede teknisk gennemførlighed, fremtidssikring og muligheden for at efterleve både de kommende krav i bygningsreglement og EU-lovgivning (EPBD/EED).

Rentabilitetsberegningerne for scenarie 5 viste, at den samlede investering på 7,17 mio. kr. gav en årlig driftsbesparelse på ca. 202.000 kr., hvilket svarede til en økonomisk tilbagebetalingstid på 36 år. Scenariet var dermed økonomisk rentabelt. Samtidig blev den samlede CO₂-udledning reduceret med ca. 1,28 mio. kg CO₂-ækvivalenter over analyseperioden, og afkasttiden for den indlejrede klimabelastning var kun 4 år. Scenarie 5 opfyldte derfor også kriterierne for LCA-rentabilitet og fremstod som den mest balancerede løsning ud fra en samlet vurdering.

Energirenoveringen medførte endvidere målbare forbedringer i indeklimaet. Luftkvalitet og fugtniveau blev forbedret i begge undersøgte boliger, og indeklimamærket forblev C i bolig A.0.1 og gik fra C til B i bolig B.1.1. Simuleringerne viste kun mindre stigninger i overtemperatur og dokumenterede samtidig overholdelse af dagslyskravet i BR18 (2025) i begge bolige. Dette bekræftede, at renoveringen ikke blot reducerede energibehovet, men også forbedrede komforten for beboerne.

Når der blev taget højde for fremtidige klimascenarier, viste simuleringerne, at både temperatur og luftfugtighed ville stige frem mod 2090. Dette medførte øget risiko for overtemperatur og fugtproblemer, særligt i lavtliggende og sydvendte boliger. Solcellernes ydeevne forventedes også at falde pga. øget skydække. Tendensen til et varmere klima understregede desuden behovet for robuste og fleksible renoveringsstrategier, hvor tiltag som solafskærmning, ventilation, materialevalg med høj fugtrobusthed og mekanisk køling tænkes ind.

Afslutningsvis viste projektet, at det var muligt at løfte en ældre etagebolig til nutidige energikrav og samtidig sikre et sundt og robust indeklima, hvis der blev arbejdet systematisk med helhedsløsninger, præcise data og langsigtet planlægning.

9 Referencer

- (15. april 2025). Hentet fra OK: <https://www.ok.dk/privat/produkter/naturgas/priser>
- Aggerholm, S. (2018). *SBi-anvisning 213*.
- Boligministeriet. (u.d.). *Bygningsreglement 1972*.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Hansen, T. K., Morelli, M., & Nielsen, A. (2023). *SBi-anvisning 277 Fugt i bygninger - Teori, beregning og undersøgelse*. København: BUILD, Aalborg Universitet.
- BUILD, Aalborg Universitet. (2020). *Anvisning om bygningsreglementet 2018*. København: BUILD, Aalborg Universitet.
- Byggeskadefonden. (11. Maj 2025). *Dansk byggeskik*. Hentet fra www.danskbyggeskik.dk: [www.https://danskbyggeskik.dk/](https://danskbyggeskik.dk/)
- COWI. (2020). *OPDATEREDE EMISSIONSFAKTORER FOR EL OG FJERNVARME. TRAFIK-, BYGGE- OG BOLIGSTYRELSEN*.
- Dansk standard. (2020). *DS 418 - Beregning af bygningers varmetab*. Nordhavn: Dansk standard.
- Energistyrelsen. (1. April 2025). Håndbog for energikonsulenter. København og Esbjerg.
- Energistyrelsen. (18. December 2024). Kick-off med Energistyrelsen. *Energieffektivitetsdirektivet (EED) og Bygningsdirektivet (EPBD)*. København: Energistyrelsen og KL.
- EPD Danmark. (2021). *Hvordan læses og bruges en miljøvaredeklaration (EPD)?* Teknologisk Institut.
- Erik Bjørn, R. (2021). Behovsstyring af indendørs luftkvalitet. Airmaster.
- Eva B. Møller, T. H. (2021). *Efterisolering af lofts konstruktioner uden dampspærre i ventilerede tagrum*. BYG-ERFA.
- Finansministeriet. (2021). *Dokumentationsnotat – den samfundsøkonomiske diskonteringsrente*. Finansministeriet.
- Forsyningstilsynet. (2024). *Elprisstatistik 3. kvartal 2024*. Frederiksværk: Forsyningstilsynet.
- Forsyningstilsynet. (2024). *Gasprisstatistik 3. Kvartal 2025*. Frederiksværk: FORSYNINGSTILSYNET.
- Forsyningstilsynet. (2024). *Prisstatistik for fjernvarmeselskaber for august 2024*. Frederiksværk: Forsyningstilsynet.
- Hansen, T. K., Høegh, B. H., Jensen, N. F., & Møller, E. B. (2022). *Indvendig efterisolering af murværk*. København: BYG-ERFA.
- Haugbølle, K. (2015). *Introduktion til LCC på bygninger*. København: Energistyrelsen.
- Heiselberg, P. K. (2016). *CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress*. BUILD Aalborg Universitet.
- Iversen, E. (u.d.). *Kend dit etagehus*. København: Dansk Bygningsarv A/S.
- Kanafani, K., Lund, A. M., Schjødt Worm, A., Due Jensen, J., Birgisdottir, H., & Rose, J. (2021). *Klimaeffektiv renovering - Balancen mellem energibesparelse og materialepåvirkninger i bygningsrenovering*. BUILD Aalborg Universitet.
- Kim B. Wittchen, K. J. (2013). *BSim Brugervejledning*. Build Aalborg universitet.

- Kragh, J. (2016). *Renoveringsklasser for eksisterende bygninger Vejledning og eksempler*. A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet,.
- Kulturarv.dk. (21. Februar 2025). Hentet fra <https://www.kulturarv.dk/fbb/bygningvis.pub?bygning=8948719>
- Lumbye, K. J. (2019). *Bygningsreglementets vejledning om korrektioner til 10 pct.-reglen for dagslys*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København.
- Madsen, J. (2024). *Energirenoveringer i offentlige bygninger*. DI Byggeri .
- Mette Havgaard Vorre, M. H. (2017). *Branchevejledning for indeklimaberegninger*. 2450 København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet,.
- Michalik, N. E., Larsen, L. S., Simonsen, M., Winther, C., Helin, T. W., & Raagard, R. E. (2024). *MBYG3 - Tilstandsvurdering, efterisolering og renovering*. København.
- Ministeriet for By, Bolig og Landdistrikter. (2014). *Guide til brug af beregningsmodel for totaløkonomi - Vurdering af energirenoveringsprojekters totaløkonomiske rentabilitet i almene boligafdelinger*. Ministeriet for By, Bolig og Landdistrikter.
- MOE A/S, Arkitema Architects, NCC NCC Danmark A/S, VIA Byggeri, Energi & Miljø, Center for forskning & udvikling. (2018). *Kuldebroer - og deres indflydelse på klimaskærmens varmetab*.
- Molio. (14. Maj 2025). Hentet fra Molio: <https://molio.dk/nyheder-og-viden/nyheder/senesteny/bygningsdelsspecifikation-fra-molio-bim7aa-og-dikon>
- Mortensen, L. H., Laustsen, J. B., Vorre, M. H., Maagaard, S. E., Kamper, S., & Noyé, P. (2017). *SBI anvisning 269 Energirenovering af større bygninger - Metode og proces*. København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Nicolai Andersen, L. S. (2024). *Eksamensopgave HEAT2*.
- Pedersen, C. D. (2021). Renovering af bygninger er en vigtig del af klimaløsningen. *Altinget*.
- Plandata. (1983). Hentet fra Plandata: https://dokument.plandata.dk/20_1053318_APPROVED_1190293653441.pdf
- Rasmussen, T. V., Hansen, T. K., Nielsen, J. K., Steenstrup, F. R., Ottosen, L. M., Petersen, L. G., . . . Shashoua, Y. (2020). *Materialeegenskaber - test af polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret ældning*. BUILD - Aalborg Universitet.
- Segs innovation. (u.d.). *Best practice for rentabilitetsberegninger*.
- Simonsen, G. (13. Februar 2025). *Bygherre Foreningen*. Hentet fra <https://bygherreforeningen.dk/hvorfor-ikke-udnytte-det-oekonomiske-potentiale-i-energibesparelser/>
- Social- og Boligstyrelsen. (2025). *bygningsreglementet*. Hentet fra <https://www.bygningsreglementet.dk/>
- Social- og boligstyrelsen. (Maj 2023). Hvilke typer af EPD'er findes der? Social- og boligstyrelsen.
- Sorø Kommune. (1. Juni 2025). Hentet fra Sorø Kommune: Sorø Kommune
- Synergi. (2024). *Faktaark om bygningsdirektivet (EPBD)*. Synergi.
- Teknologisk institut, VCOB og Realdania. (2021 Juni). *Temaark. Skadelige stoffer og problematisk affald*.
- Tine Steen Larsen, H. N. (2021). *IK-KOMPAS ETAGEBOLIGER – VÆRKTØJ TIL HOLISTISK VURDERING AF INDEKLIMA Dokumentationsrapport*. BUILD, Aalborg Universitet .

totalconcept. (29. Maj 2025). Hentet fra totalconcept: <https://totalconcept.se/method/this-is-the-total-concept/>

UDVIKLING. (NR. 4, 4. KVARTAL 2008). UDVIKLING - TIDSSKRIFT OM UDVIKLINGSHÆMMEDE. *UDVIKLING*, s. 8-11.

Victoria Havsteen Branner, M. M. (3. november 2023). *Nationalbanken*. Hentet fra Nationalbanken: https://www.nationalbanken.dk/da/viden-og-nyheder/publikationer-og-taler/analyse/2023/danmark-risikerer-en-periode-med-stoerre-udsving-i-energipriser-som-vil-paavirke-inflation-og-pengepolitik?utm_source=chatgpt.com

Wittchen , K. B., & Jønsson, K. T. (2021). *Vejrdata til fremtidens byggeri*. BUILD.

10 Bilagsoversigt

Bilag 1 – Registreringsgrundlag

Bilag 2 – Registrering af bygningsdele

Bilag 3 – Placering af loggere

Bilag 4 - Data og beregninger fra loggere

Bilag 5 – Billeder fra termografering

Bilag 6 – Inputdata til Be18

Bilag 7 – HEAT2-simuleringer

Bilag 8 – Dagslysberegninger

Bilag 9 – IK-kompas

Bilag 10 – LCA-beregninger

Bilag 11 – LCC-beregninger

Bilag 12 – Wufi-simuleringer

Bilag 13 – BSim-simuleringer

Bilag 14 – Be18-beregninger