



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Sekretær: Lene Wenstrøm Jørgensen
Telefon: 99 40 97 34
Lene Wenstrøm Jørgensen

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

4. Semester, F2023

Titel på projekt:

Energioptimering af bevaringsværdigt hus
fra 1890 med fokus på øget termisk komfort

Projektperiode:

1. feb. 2023 – 8. juni 2023

Vejleder:

Seniorforsker Ernst Jan de Place Hansen

Post.doc Nickolaj Feldt Jensen

Studerende:

Karen Anne Krogh Nielsen

Mikkel Eger Sommer

Antal normalsider:

75

Afleveringsdato:

9. juni, 2023

Resumé:

Rapporten har til formål at afdække tiltag der kan forberede termisk komfort og energioptimere Fogedgården i Bondebyen. Konstruktionsløsninger udarbejdes som dele af de kommende renoveringsløsninger af husets stueplan. Selve renoveringen forventes udført i den nærmeste fremtid.

Huset er bevaringsværdigt, og er vurderet til værdi 3 efter SAVE-metoden, flere af træerne er også tildelt bevaringsværdig status, hvorfor fremtidigt arbejde skal tage hensyn til både generelle bevaringsværdier og lokalplanen for Bondebyen. Derfor er efterisolering udelukkende begrænset til indvendig efterisolering.

Huset gennemgik en større renovering i 1980'erne. Huset er grundmuret med et træbjælkelag og stråtag. Indervæggene er af porebeton, og ydervægge er fuldmuret 1-stensvægge med 95 mm forsatsvægge. Vinduer er de originale med eftermonterede forsatsruder.

Erfaringsmæssigt kan indvendig efterisolering af denne type konstruktion være problematisk at udføre. Derfor opstilles der fire forskellige løsningsforslag for at forbedre betingelser for stuens termiske komfort. Forslagene er en kombination af at de eksisterende vinduer renoveres og energioptimeres med eller uden etablering af ny dampspærre samt efterisolering af eksisterende forsatsvæg.

Effekten af den indvendige efterisolering og vinduesoptimering afdækkes teoretisk med beregningsprogrammerne WUFI og HEAT2 for at afklare eventuelle ændrede situationer som kan medføre kritiske fugtforhold, i form af kondens og skimmelsvampevækst.

På baggrund af de udførte beregninger kan det konkluderes, at indvendig efterisolering med yderligere 45 mm anbefales, såfremt en ny dampspærre etableres så den tilsluttes de tilstødende bygningsdeles tæthedsplan. Dampspærren skal være beskyttet af installationslaget for at sikre mod fremtidige gennembrydninger. Det anbefales at de eksisterende vinduesrammer renoveres og en ny, koblet ramme med enkeltlagsglas eftermonteres.



**AALBORG
UNIVERSITET**

Energioptimering af bevaringsværdigt hus fra 1890
med fokus på øget termisk komfort

Kolofon

Uddannelsessted	Statens Byggeforskningsinstitut Aalborg Universitet, København A.C. Meyers Vænge 15 2450 København SV
Uddannelse	Master i Bygningsfysik
Årgang	4. semester, F2023
Titel:	Energioptimering af bevaringsværdigt hus fra 1890 med fokus på øget termisk komfort
Studerende	Karen Anne Krogh Nielsen Mikkel Eger Sommer
Hovedvejleder Bivejleder	Seniorforsker Ernst Jan de Place Hansen Post.doc Nickolaj Feldt Jensen
Projektperiode	Februar 2023 – Juni 2023
Sprog	Dansk
Antal normalsider, v. 2400 anslag inkl. mellemrum	75 normalsider ekskl. Bilag
Antal sider i alt	336 inkl. bilag 116sider ekskl. bilag
Version	1.0
Afleveringsdato	09.06.2023

Resume

Rapporten har til formål at afdække tiltag der kan forberede termisk komfort og energioptimere Fogedgården i Bondebyen. Konstruktionsløsninger udarbejdes som dele af de kommende renoveringsløsninger af husets stueplan. Selve renoveringen forventes udført i den nærmeste fremtid.

Huset er bevaringsværdigt, og er vurderet til værdi 3 efter SAVE-metoden, flere af træerne er også tildelt bevaringsværdig status, hvorfor fremtidigt arbejde skal tage hensyn til både generelle bevaringsværdier og lokalplanen for Bondebyen. Derfor er efterisolering udelukkende begrænset til indvendig efterisolering.

Huset gennemgik en større renovering i 1980'erne. Huset er grundmuret med et træbjælkelag og stråtag. Indervæggene er af porebeton, og ydervægge er fuldmuret 1-stensvægge med 95 mm forsatsvægge. Vinduer er de originale med eftermonterede forsatsruder.

Erfaringsmæssigt kan indvendig efterisolering af denne type konstruktion være problematisk at udføre. Derfor opstilles der fire forskellige løsningsforslag for at forbedre betingelser for stuens termiske komfort. Forslagene er en kombination af at de eksisterende vinduer renoveres og energioptimeres med eller uden etablering af ny dampspærre samt efterisolering af eksisterende forsatsvæg.

Effekten af den indvendige efterisolering og vinduesoptimering afdækkes teoretisk med beregningsprogrammerne WUFI og HEAT2 for at afklare eventuelle ændrede situationer som kan medføre kritiske fugtforhold, i form af kondens og skimmelsvampevækst.

På baggrund af de udførte beregninger kan det konkluderes, at indvendig efterisolering med yderligere 45 mm anbefales, såfremt en ny dampspærre etableres så den tilsluttes de tilstødende bygningsdeles tæthedsplan. Dampspærren skal være beskyttet af installationslaget for at sikre mod fremtidige gennembrydninger. Det anbefales at de eksisterende vinduesrammer renoveres og en ny, koblet ramme med enkeltlagsglas eftermonteres.

Abstract

The report aims to identify measures that can enhance thermal comfort and optimize energy efficiency for Fogedgården in Bondebyen. Construction solutions are being developed as part of the upcoming renovation of the ground floor of the house. The renovation itself is expected to be carried out in the near future.

The house is of historical value and has been assessed as Grade 3 according to the SAVE method. Several trees on the property have also been designated as having historical value, which means that future work needs to consider both general preservation values and the local plan for Bondebyen. Therefore, solutions including added insulation are limited to internal application only.

The house underwent a major renovation in the 1980s. It has a masonry foundation and walls, timber crossbeams and a thatched roof. The interior walls are made of autoclaved aerated concrete, and the exterior walls consist of solid, single-layer thick brick walls with secondary walls with 95 mm insulation installed internally. The windows are original and have secondary windows installed internally as a supplement.

Based on experience, insulating this type of construction internally can be challenging to execute without creating moisture risks. Therefore, four different solution proposals are presented to improve thermal comfort in the living room. The proposals involve a combination of renovating and optimizing the existing windows, with or without the installation of a new vapor barrier, as well as insulating the existing secondary walls.

The effect of the internal insulation and window optimization is assessed theoretically using the calculation programs WUFI and HEAT2 to identify any potential changes that could lead to critical moisture conditions, such as condensation and mold growth.

Based on the calculations performed, it can be concluded that internal insulation with an additional 45 mm thickness is recommended if the new vapor barrier is installed and properly sealed to the adjacent building components' air barrier. The vapor barrier should be protected by the installation layer to prevent future breaches. It is also recommended to renovate the existing window frames and install a new coupled sash with single glazing.

Resume	1
Abstract	2
1. Indledning.....	4
1.1. Problemformulering	4
1.2. Afgrænsning	5
2. Læsevejledning	5
3. Introduktion til bygningen og relevant lovgivning	6
3.1. Generelt om huset.....	6
3.2. Historisk baggrund for fredning	9
3.3. Lovgivning ved renovering af bevaringsværdige bygninger.....	10
4. Teori.....	13
4.1. Varmetransport	13
4.2. Termisk komfort	16
4.3. Fugtteori.....	22
5. Metode	31
5.1. Målinger af det eksisterende hus	31
5.2. Analyser af as-is-konstruktioner og renoveringsforslag	44
6. Resultater: As-is-konstruktion	50
6.1. Nuværende konstruktioner.....	50
6.2. Ventilationsforhold.....	55
6.3. Infiltration	57
6.4. Risiko for skimmelsvampevækst	65
6.5. Varmetransmission.....	82
6.6. Temperaturforhold	87
7. Resultater: Renoveringsforslag.....	90
7.1. As-is-konstruktion.....	92
7.2. Facadeforslag	93
7.3. Vinduesforslag.....	100
8. Diskussion	109
8.1. Vurderingsparametre for renoveringsforslag	109
8.2. Anbefalede løsning	114
9. Konklusion	116
10. Litteraturliste	117
11. Bilag	120

1. Indledning

Vores fredede og bevaringsværdige bygninger fortæller historien om, hvordan vi i Danmark har bygget, arbejdet og levet gennem historien. Vi har pligt til at bevare disse bygninger og deres eftermæle, så deres udtryk og fortælling om vores byggetraditioner, arkitektur og levevis holdes i live. Vi har i dag ifølge Slots- og Kulturstyrelsens database over fredede og bevaringsværdige bygninger ca. 7.000 fredede og ca. 350.000 bevaringsværdige bygninger.

Hovedparten af disse bygninger er historisk set bygget efter traditioner der ikke havde fokus på varmetab og termisk komfort. I dag er et klart modtræk til at bygge nyt at renovere og forny den eksisterende bygningsmasse, heraf de mange bevaringsværdige bygninger.

I forbindelse med den kommende indvendige renovering af huset på Gammel Lundtoftevej 34C, den gamle Fogedgård, ønsker bygherren at tiltag til energiforbedring og forbedring af vinduerne tager udgangspunkt i lokalplanen, hvormed det er et krav at det eksisterende bygningsudtryk bibeholdes udvendigt. Her gælder det, at hverken facader eller taget må ændres. Ved renoveringen lægges der vægt på at følge Lyngby-Taarbæk Kommunes retningslinjer for renovering af bevaringsværdige bygninger. I retningslinjerne omtales renoveringer af vinduer/døre samt facader således:

Bevar oprindelige bygningsdele. Du bør altid bevare og istandsætte de oprindelige vinduer og døre i en bevaringsværdig ejendom.

Foretag indvendig energirenovering af vinduer og døre. I dag findes der mange gode løsninger, hvor du kan beholde de oprindelige, udvendige karme og rammer på vinduer og døre, når du skal energirenovere. Kan du ikke istandsætte de oprindelige vinduer og døre, eller er de nuværende vinduer og døre tidligere udskiftet uden hensyntagen til ejendommens bevaringsværdig, kan det være nødvendigt med en udskiftning. Du bør udskifte til nye vinduer og døre, der svarer til de oprindelige i størrelse, oplukket metode, opdeling, fyldninger og opsporsning. I opsporsede vinduer bør det yderste lag glas udføres som enkeltlagsglas med kitfals.

Brug de oprindelige materialer. Du bør altid vælge samme materialer som de oprindelige bygningsdele, fx vinduer i kernetræ. Du bør altid vedligeholde og bevare ejendommens oprindelige facader, farver og bygningsdetaljer som fx udsmykninger, indfatninger og gesimsbånd (Københavns Kommune, 2023).

1.1. Problemformulering

Rapporten vil afdække muligheden for at udføre en forbedring af den termiske komfort samt energioptimering på Fogedgården, Gammel Lundtoftevej 34C, afgrænset til den eksisterende stue. Dermed vil forbedringsforslag vurderes for deres effekt på det termiske indeklima og om det kan blive tilfredsstillende.

Som grundlag til en anbefaling laves der en tilstandsvurdering af huset med fokus på fugtforhold og termisk indeklima. Tilstandsrapporten vil inkludere:

- Målinger af fugt og temperatur i 11 måneder (30/3-2022 – 28/2-2023) med dataloggere
- Målinger af infiltration med blower door test og termografering

- Dokumentation af nuværende konstruktionsdetaljer, med fokus på vægge, vinduer og samlinger
- Destruktiv analyse af et vindue
- Fugtsimuleringer af eksisterende konstruktioner i WUFI
- Varmetransmissionssimulering af eksisterende konstruktioner i HEAT2

I husets nuværende stand, med indvendig efterisolering, er der ikke tegn på skimmelsvampevækst, men der er meget kuldestråling, kuldenedfald, træk og et større varmebehov. Tætning og efterisolering vil afhjælpe disse problemer, men kan skabe problemer i form af kondens og skimmelsvampevækst.

Undersøgelsen udmøntes i renoveringsforslag, som baseres på tilstandsrapporten og simuleringer af as-is-konstruktioner. Forskellige vinduesløsninger simuleres, både med nye vinduer og renovering af de gamle, i relation til byherrens ønsker om at det oprindelig arkitektoniske udtryk bevares.

Den valgte løsning kommer til at danne grundlag for renovering af husets indvendige facade og vinduer. Dette arbejde forventes udført i perioden fra september-december 2023.

1.2. Afgrænsning

I rapporten arbejdes der udelukkende med tiltag der forbedrer termisk komfort samt energioptimering. Der bliver undersøgt mulige vinduesløsninger og om det er muligt at tilføre mere indvendig efterisolering til den eksisterende teglfacade/forsatsvæg. Rapportens hensigt er at afdække løsninger indenfor de begrænsninger der findes i lokalplan 258, Bondebyen og imødekomme byherrens ønsker om at bevare husets arkitektoniske udtryk. Risici afdækkes ved fugt- og energitekniske beregninger. Med udgangspunkt i disse analyser vurderes der om de fremsatte løsningsforslag er hensigtsmæssige, i sammenhæng med den eksisterende konstruktion. Risici der fokuseres på er: skimmelvækst på indvendige overflader og i konstruktionen.

I rapporten ses der bort fra økonomiske parametre forbundet med forbedringer (hverken udførelse eller drift), linjetab, positiv eller negativ indvirkning fra solindfald gennem vinduerne samt anvendelse af ventilationsanlæg.

2. Læsevejledning

Rapporten udarbejdes som beslutningsgrundlag for byherre, i forbindelse med renovering af huset, med det formål at vejlede imellem løsningsforslag der forbedrer husets termiske indeklima.

Rapporten er opdelt i følgende fire dele:

Del 1	Indledning Problemformulering Afgrænsning
Del 2	Historisk baggrund Teori Metode for registrering af eksisterende forhold og for analyse af as-is-konstruktioner og renoveringsforslag

Del 3	Resultater: As-is-konstruktion Resultater: Renoveringsforslag
Del 4	Diskussion: Gennemgang og analyse af resultater Konklusion

Første del omhandler at definere og afgrænse problemstillingen, som behandles i rapporten efterfølgende.

Anden del giver en introduktion og gennemgang af husets historie, opbygning og tilstand. Yderligere gennemgås relevant teori og begreber i forbindelse med afklaringen af de forskellige løsningsforslag. Metoden for registrering af tilstanden og analysen af as-is-konstruktioner og renoveringsforslag følger.

Tredje del fremsætter en række forskellige løsningsforslag, som efterfølgende beregnes for at kunne afdække fugttekniske risici og termiske bidrag.

Fjerde del analyserer og gennemgår resultatet af de forskellige beregninger. Afslutningsvis vurderes hvilke løsningsforslag, der er hensigtsmæssige at benytte.

3. Introduktion til bygningen og relevant lovgivning

3.1. Generelt om huset

Bygningen, der blev undersøgt, er en bolig på 54 m² i stueetagen samt et 20 m² udnyttet loft. Bygningen er grundmuret med et træbjælkelag og stråtag. Indervæggene er af porebeton og er bygget i sammenhæng med en stor renovering i 1980'erne. Fundamentet er murværk.

Boligen er en del af en gård, der hedder Fogedgården, som blev bygget i 1890, og er samtidig en del af et område ved navn Bondebyen, som er beliggende på Gammel Lundtoftevej 34, 2800 Kongens Lyngby. Gården består af to bygninger; en L-formet del med fire beboelser og en mindre bygning med to beboelser. Den undersøgte bolig ligger i den L-formede del længst tilbage trukket fra vejen (Figur 1 - Figur 4).

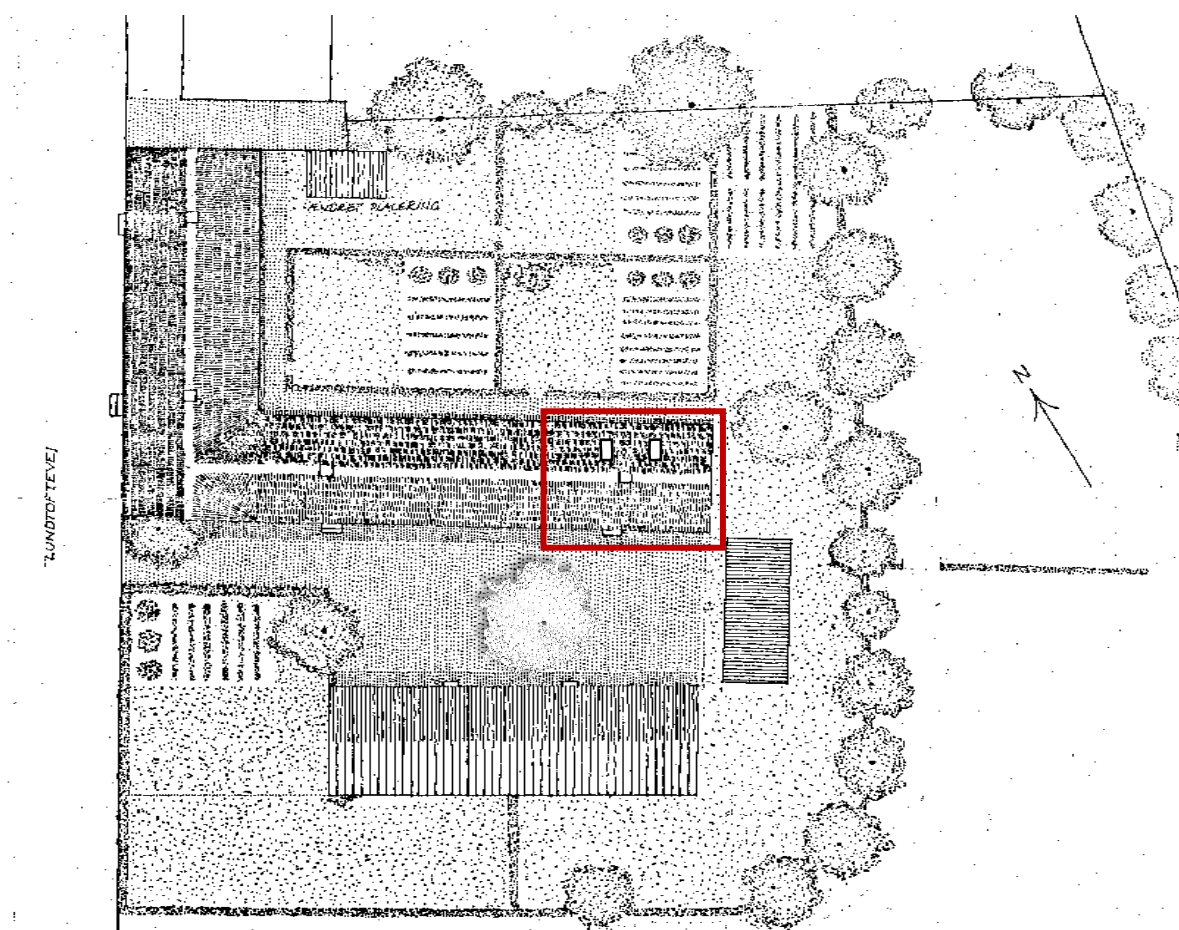
Som mange andre bygninger i Bondebyen blev gården hovedrenoveret i 1980'erne som en del af et større sanerings- og bevaringsprojekt. Renoveringen har bibeholdt så meget af det gamle som muligt. De murede ydervægge blev efterisoleret indvendigt, og stråtag, skorstenene og de gamle vinduer og døre blev renoveret eller fornyet i den oprindelige stil.

Beplantningen er også udført i den gamle stil med tjørnehække og tjørnetræer i skellene samt et lindetræ og rønnetræ i gården. Den indvendige aptering stammer fra midt 80'erne på nær udnyttelsen af første sal i 2010 med en trappe og nyt gulv, loft og vægge. Stråtaget er blevet fornyet i 2005.

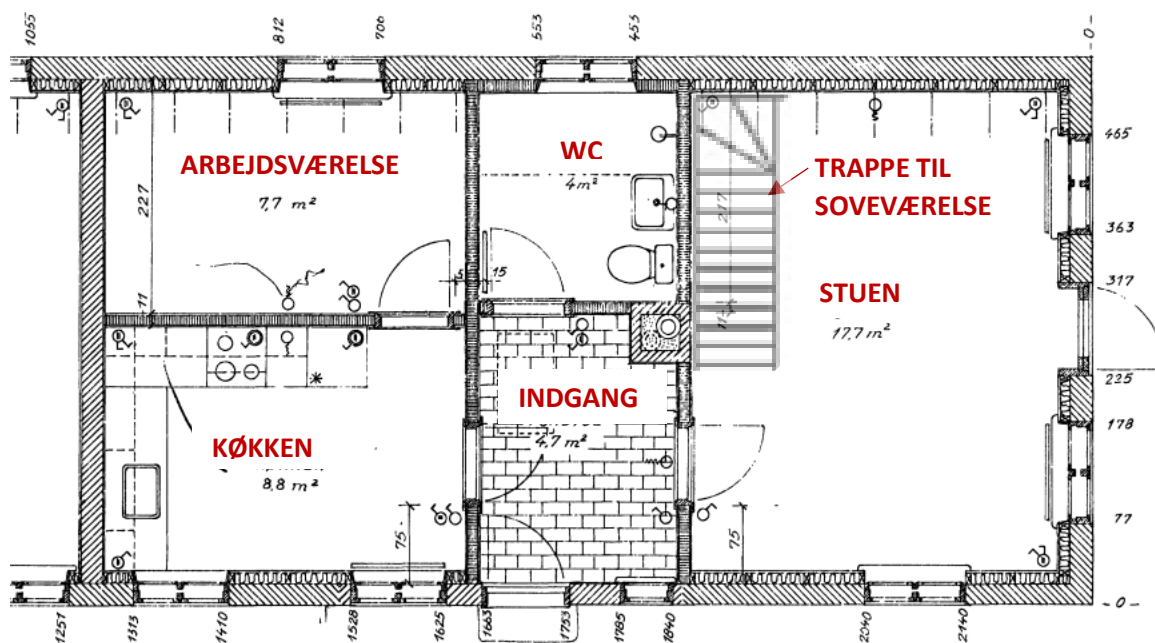
Huset er bevaringsværdigt, og flere af de omkringliggende træer er også tildelt bevaringsværdig status, hvorfor fremtidigt arbejde skal tage hensyn til både generelle fredningsordninger og lokalplaner for Bondebyen.



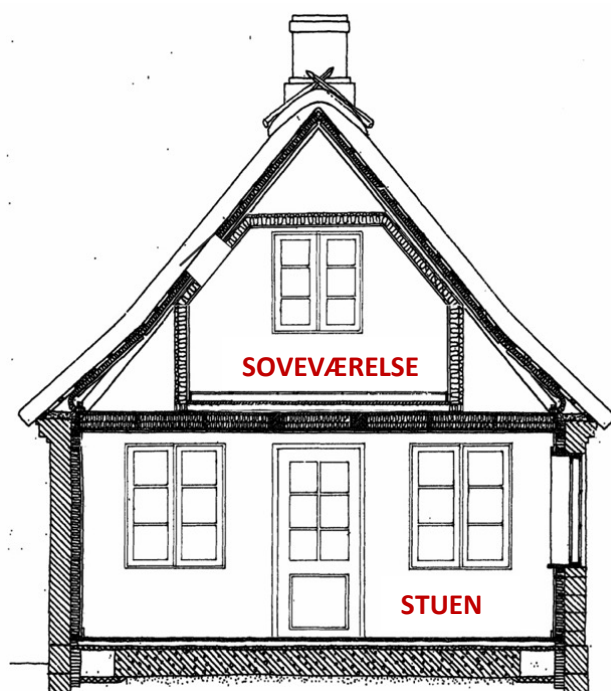
Figur 1: Den L-formede del af gården ses her fra Gammel Lundtoftevej og er delt i fire beboelser. Bagerst er den undersøgte bolig: 34C.



Figur 2: Gammel Lundtoftevej 34C. Gården blev renoveret i 1980'erne med 6 andelslejligheder. 34C er den østlige ende af den stråttækte 2-længede del, vist med rød firkant.



Figur 3: Gammel Lundtoftevej 34C. Plantegning af stueetagen.



Figur 4: Gammel Lundtoftevej 34C. Lodret snit

3.2. Historisk baggrund for fredning

Den 12. marts 1918 indførte man en bygningsfredningslov i Danmark. I starten skelnede man mellem to typer fredninger, klasse A og klasse B. Hvis der skulle foretages ændringer ved klasse A-fredninger, skulle der foreligge en godkendelse fra myndighederne. Ved klasse B-fredninger skulle det blot anmeldes til myndighederne, men det særlige for klasse B-fredninger var, at det ikke krævede godkendelse fra myndighederne at gennemføre en ændring, og dermed var ejerne mere frit stillede til at gennemføre ændringer imod myndighedernes interesse. Denne særlige foranstaltning frafaldt d. 1. juli 1966, da en ny bygningsfredningslov trådte i kraft, og klasse B-fredninger skulle nu følge retningslinjerne for klasse A-fredninger hvad angik bygningens udvendige fremtoning.

I 1980 gik man væk fra et todelt fredningssystem, hvor man skelnede mellem 'udvendige fredninger' (klasse B-fredninger) og 'indvendige og udvendige fredninger' (klasse A-fredninger). I dag gælder én fredning 'hele vejen rundt,' så det både er husets indre og ydre, der er fredet.

Statens Bygningsfredningsfond blev nedlagt i 1997, da en ny bygningsfredningslov trådte i kraft 1. december. Her blev aldersgrænsen for automatisk fredning af bygninger, der var 100 år på det tidspunkt, nedsat, således at 50 år gamle bygninger nu kunne fredes.

En revideret bygningsfredningslov trådte i kraft den 1. juni 2010. I denne reviderede bygningsfredningslov blev der indført væsentlige ændringer, hvoraf de vigtigste kan nævnes:

- At det nu bliver muligt at frede selvstændige landskabsarkitektoniske værker som haver og anlæg, uden at fredninger gælder bygninger i tilknytning til disse.
- At der er blevet oprettet en mulighed for at klage over afgørelser vedrørende bygningsændringer.
- At retten til fradrag for vedligeholdelse af fredede bygninger blev lovfæstet i ligningsloven.

Fra bekendtgørelsen af lov om planlægning forklares det i § 1 at:

Loven har til formål at værne om landets ældre bygninger af arkitektonisk, kulturhistorisk eller miljømæssig værdi, herunder bygninger, der belyser bolig-, arbejds-, og produktionsvilkår og andre væsentlige træk af den samfundsmaessige udvikling. (LBK nr 1157: Bekendtgørelse af lov om planlægning, 2020)

Ifølge planloven er det kommunerne, der står for udpegning af værdifulde og bevaringsværdige kulturmiljøer i både by- og landområder, herunder enkelte bygninger som er en del af vores bygningskulturarv. I de fleste kommuner har de registreret bygningers bevaringsværdi efter SAVE-metoden.

SAVE er en sammenskrivning af 'Survey of Architectural Values in the Environment.' Metoden bygger på en vurdering af fem forskellige forhold ved en bygning:

- *Arkitektonisk værdi*
- *Kulturhistorisk værdi*
- *Miljømæssig værdi*
- *Originalitet*
- *Tilstand*

Vurderingen af bevaringsværdien bygger på et helhedsindtryk af bygningens kvalitet og tilstand. Som hovedregel vil den arkitektoniske og den kulturhistoriske

værdi dog veje tungest. Karaktererne 1-3 regnes for en høj værdi, 4-6 for middel værdi og 7-9 for lav værdi.

Bevaringsværdien hænger sammen med bygningens arkitektur og historie:

- *Er bygningen et godt eksempel på periodens arkitektur eller på en særlig byggeskik?*
- *Er bygningstypen eller bygningsformen sjælden?*
- *Har bygningen dannet forbillede for andre bygninger?*
- *Står bygningen intakt?*
- *Er udskiftninger og ombygninger tilpasset bygningens udtryk?*
- *Er bygningen betydningsfuld i gadebilledet eller i landskabet?*

Bygninger med den højeste værdi 1 vil som oftest være fredede bygninger eller folkekirker. Særligt værdifulde bygninger kan dog godt have bevaringsværdi 1 uden at være fredede.

Bygningerne med værdierne 2-4 er de bygninger, som i kraft af deres arkitektur, kulturhistorie og håndværksmæssige udførelse er fremtrædende eksempler inden for deres slags.

Bygninger med bevaringsværdierne 5-6 er jævne, pæne bygninger, hvor utilpassede udskiftninger og ombygninger trækker ned i karakteren.

Bygninger med bevaringsværdierne 7-9 er ofte bygninger uden arkitektonisk udtryk eller uden historisk betydning. Det kan også være bygninger, som er så ombyggede, eller som har så mange udskiftninger, at de har mistet deres oprindelig. (Slots- og Kulturstyrelsen, 2023)

Forskellen mellem fredede bygninger og bevaringsværdige bygninger er, at for betegnelsen fredet byggeri gælder fredningen for både den ind- og udvendige del af en bygning og den bliver administreret af staten. De bevaringsværdige bygninger forvaltes af den kommune, som bygningen er placeret i, og er kun gældende for bygningens ydre.

3.3. Lovgivning ved renovering af bevaringsværdige bygninger

3.3.1. Generelle lovkrav

Ved renovering af bevaringsværdige bygninger er der hverken krav til bygningens tæthed eller minimums U-værdier for bygningsdelene. Det forventes dog, at de fornyede bygningsdele er udført bedre/tættere end de oprindelige, så længe det er fugtteknisk forsvarligt.

Bevaringsværdige bygninger skal dog efterleve deres fredningsbestemmelse (ofte at beholde det oprindelige udseende udvendigt), som første prioritet. Dermed kan de være undtaget for energikravene i BR18 §274 - § 279: Energikrav ved ombygning og udskiftning af bygningsdele og §280 - § 282: Renoveringsklasser for eksisterende bygninger, som der står i BR18 § 278 stk. 3:

Bevaringsværdige bygninger, der er omfattet af en bevarende byplanvedtægt, bevarende lokalplan, tinglyst bevaringsdeklaration eller bygninger udpeget i kommuneplanen som bevaringsværdige, og bygninger, der af kulturministeren er besluttet udpeget som bevaringsværdige i henhold til bygningsfredningslovens §

19, stk. 1, er ligeledes undtaget fra bestemmelserne i §§ 274-282, hvis det vil være i strid med den pågældende planlægning eller udpegning at efterleve kravene.

Paragraf §274 - § 279: Energikrav ved ombygning og udskiftning af bygningsdele stiller krav om, at ved ombygninger skal energibesparelser gennemføres i det omfang, de er rentable og ikke medfører risiko for fugtskader. Ved udskiftning af bygningsdele skal de overholde mindstekrav til klimaskærmen.

Paragraf §280 - § 282: Renoveringsklasser for eksisterende bygninger stiller krav om at renovering skal følge renoveringsklasse 1 eller 2.

1) Renoveringsklasse 1, når det samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand pr. m² opvarmet etageareal ikke overstiger 52,5 kWh/m² pr. år tillagt 1.650 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal.

2) Renoveringsklasse 2, når det samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand pr. m² opvarmet etageareal ikke overstiger 70,0 kWh/m² pr. år tillagt 2.200 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal.

Selvom energiforbedringer på bygninger indenfor fredningsordningens begrænsninger ikke skal overholde energikravene, skal de stadig være fugtteknisk forsvarlige. Eksempelvis bliver bevaringsværdige bygninger ofte isoleret med indvendig isolering så det udvendige udseende ikke ændres. Indvendig efterisolering mindsker varmetransmissionstab, men øger også risikoen for at skabe kondens i konstruktionen. Derfor er bevaringsværdige bygninger ofte fritaget for de gældende regler om varmetransmissionskoefficienten for ydervæg, som er: 0,15 W/m²K, da den mængde af indvendig efterisolering der kræves for at opnå kravet, vil kunne forårsage fugtproblemer i konstruktionen.

3.3.2. Krav ifølge lokalplanen

Lokalplan 258 for Lyngby-Taarbæk Kommune dækker Fogedgården, Gammel Lundtoftevej 34C. Den omfatter flere skærpelser i forhold til BR18s mere generelle regler. Den nævner specifikt, at energimæssige tiltag bør udføres uden at de forringer den pågældende bevaringsværdige bygning (Lokalplan 258: For Bondebyen, 2018). Lokalplanen har til hensigt at hindre fremtidigt modernistisk byggeri, som kunne forringe Bondebyens oprindelige karakter.

Med baggrund i Saneringsloven (L72: Lov om sanering, 1969) blev der på kommunens foranledning indledt en sanering og byfornyelse af Bondebyen. En registrant over Bondebyens bygninger (Jensen, 1981) blev udarbejdet af Fredningsstyrelsen. Denne dannede i 1982 grundlag for saneringsplanen, som blev udarbejdet af Byfornyelsesselskabet Danmark i nært samarbejde med Lyngby-Taarbæk Kommune og Bondebylauget. (Lokalplan 258: For Bondebyen, 2018)

Der er i lokalplanen et ønske om at bevare Bondebyens bygningskarakter og om at nyt byggeri udformes og gives et materialevalg, som stemmer overens med Bondebyens tradition og miljø.

I lokalplanens vedligeholdelsesvejledning er de enkelte bygningsdele og hvilke traditionelle materialer, der skal benyttes ved vedligehold, istandsættelse og nyopførelser, beskrevet. Her er de mest relevante for denne rapport:

<i>Træbeklædning:</i>	<i>Trægavle og anden udvendig træbeklædning behandles med trætjære eller lignende i jordfarver. Træbeklædning i ru træ behandles i trætjærefarver eller i jordfarver.</i>
<i>Murværk:</i>	<i>Det murede hus fremstår enten pudset eller i blank mur i gul eller rød tegl. Det pudsede og kalkede hus er traditionelt overfladebehandlet med kalkprodukter. Ved opmuring og pudsearbejder anvendes kalkmørtel. Til udvendig puds, vandskuring samt understrykning af tegltage anvendes hydraulisk kalkmørtel. Cementholdige mørtelprodukter og cementholdig murfarve bør ikke anvendes. Ved reparationer af fuger bør disse udføres som de oprindelige. Det er vigtigt, at man sørger for at hindre vandgennemtrængning fra tag og fuger mellem tavle og tømmer og mellem tømmer og vinduer. Tætning kan ske med kalkmørtel med fæhår.</i>
<i>Isolering:</i>	<i>Isolering skal af hensyn til bygningens oprindelige arkitektur kun foretages indvendigt.</i>
<i>Vinduer:</i>	<i>Vinduer og døre skal respektere den traditionelle fagdeling og overholde de traditionelle dimensioner. Vinduer kan udføres sidehængte én, to- eller firerammede med vandret opsprosnings eller med vandret og lodret opsprosnings med tynde sprosser og kitfalse. Der må ikke anvendes buet glas. Nye vinduer, eller blot efterisolering af eksisterende vinduer, udføres med koblede rammer eller med forsatsvinduer. Forsatsvinduer kan benyttes til såvel nye som gamle vinduer. Koblede rammer og forsatsvinduer bevarer den oprindelige ramme- og sprossedimension, og giver generelt en bedre varmeisolering end 2-lags termoruder. Nye vinduer skal udføres i enkeltlagsglas med kitfals og bør males med dækkende linoliemaling i jordfarver. Oliebejdse må ikke anvendes. (Lokalplan 258: For Bondebyen, 2018)</i>

4. Teori

Ved renovering af ældre bevaringsværdige huse er det essentielt, at en energiforbedring udføres fugtteknisk forsvarligt, så der ikke som følge af en ændring i de bygningsfysiske forhold, vil opstå utilsigtet opfugtning, der kan resultere i nedbrydning af bygningsdelene samt medvirke til forringelse af indeklimaet. Følgende parametre er vigtige at være opmærksom på:

- Temperaturforløb igennem konstruktionerne
- Overfladetemperaturer på materialelagene
- Kuldebroer
- Fugtforhold i huset og selve bygningsdelen
- Konstruktionssammensætning
- Materialernes beskaffenhed og anvendelse

En efterisolering af klimaskærmen kan generelt opdeles i indvendig og udvendig efterisolering. Erfaringer viser at en løsning med udvendig efterisolering, inddækket af en to-trinsfacadeløsning er at foretrække, både hvad angår varmetab og reduceret fugtrisiko.

Udvendig efterisolering er fravalgt som løsning, og vil ikke gennemgås nærmere i denne rapport. Idet lokalplanen 258, Bondebyen foreskriver: "Isolering skal af hensyn til bygningens oprindelige arkitektur kun foretages indvendigt."

4.1. Varmetransport

Husets klimaskærms formål er at holde indeklima og udeklima adskilt. Den skærmer imod temperaturforskelle, vindpåvirkning samt nedbør. Varmestrømme igennem konstruktionen går altid fra varm mod kold, idet systemet altid prøver at opnå balance ved at udligne energiforholdene på hver side af konstruktionen.

Varmeoverføring kan foregå som:

- Varmeledning: Varme fra fast materiale til fast materiale.
- Konvektion: Varme fra fast materiale til luft eller fra luft til fast materiale.
- Stråling: Varme via elektromagnetiske bølger mellem to objekter.

4.1.1. Varmeledningsevne

Klimaskærmens evne til at sikre den termiske temperaturadskillelse mellem inde og ude afhænger af materialernes varmeledningsevne (lambdaværdi) og tæthed. Lambdaværdien for de enkelte materialer vil ofte variere i takt med hvor opfugtede de pågældende materialer er. F.eks. vil en tør murstensvæg have et mindre transmissionstab end en opfugtet murstensvæg. Dette skyldes at murstenens porer vil være mættede med vand frem for luft, og vandets varmeledningsevne er 0,6 W/(m·K), hvor luft er ca. 0,025 (W/m·K), og derved stiger materialets varmeledningsevne med fugtindholdet.

Husets ydervæg er relativt dårligt isoleret i forhold til nutidens krav, hvilket bevirker, at der anvendes store mængder energi på at varme selve konstruktionerne op, såfremt udeklimaet har en lavere temperatur end indeklimaet. I mange tilfælde er dette forklaringen på, at gamle u-isolerede eller dårligt isolerede huse fungerer godt fugtteknisk, men har et alt for stort varme- og energiforbrug.

4.1.2. Isoleringsevne

Isoleringsevnen af materialerne (U-værdien) angives i W/m^2K og fortæller, hvor stor en varmestrøm målt i watt, der passerer gennem $1 m^2$ af konstruktionen, når temperaturforskellen mellem den indvendige og den udvendige flade er $1^\circ K / 1^\circ C$. Når man skal beregne U-værdien på en sammensat konstruktion, skal man først beregne de enkelte lags modstand mod varmeledning, kaldet isolans. Isolans er lig med materialets tykkelse i meter divideret med materialets Lambda-værdi. Konstruktionens U-værdi er herefter 1 divideret med summen af lagenes isolans.

4.1.3. Kuldebro

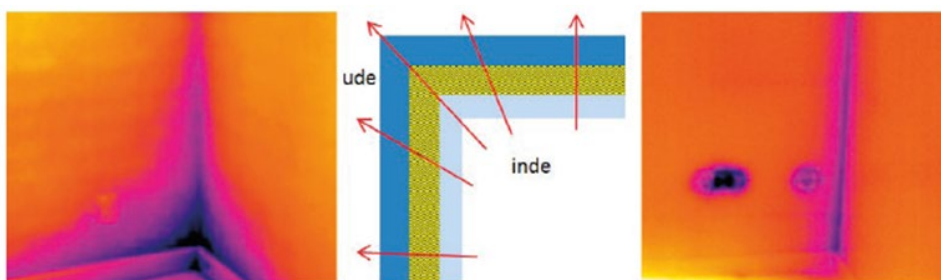
En kuldebro er et område i en bygningskonstruktion, hvor der forekommer 2- eller 3-dimensionelle varmestrømme, der har en væsentlig højere varmeoverførsel fra indre til ydre end de omkringliggende elementer. Helt konkret opstår kuldebroerne i bygningens konstruktion, hvor der enten er et brud i isoleringen eller mindre isolering.

For bevaringsværdige huse, hvor bevaring af husets facadeudtryk er en forudsætning, begrænses tiltag for at minimere kuldebroer udefra. Dette betyder, at indvendig efterisolering er den eneste løsning. Ved indvendig efterisolering reduceres kuldebroer ikke i samme grad som udvendig grundet geometriske forhold. Da husets konstruktion består af massive mure og træbjælkelag i etageadskillelsen, vil dette sætte begrænsninger i forhold til implementering af varmebesparende tiltag grundet stor risiko for fugtophobning i konstruktionen. Derfor vil fugtrisici ofte være den afgørende faktor for håndteringen af kuldebroer og ikke den potentielle varmebesparelse i sig selv.

Kuldebroer opdeles i de følgende fire undergrupper:

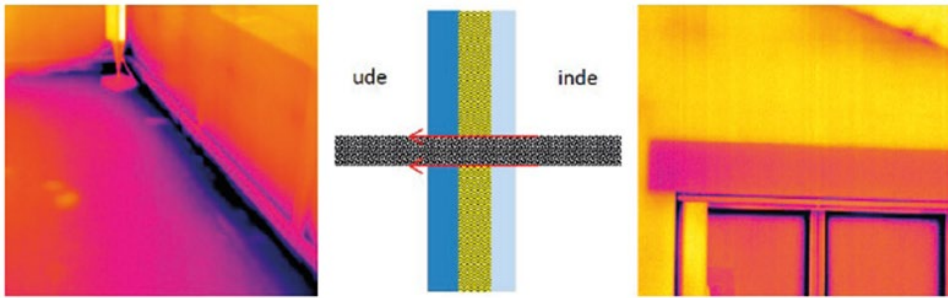
1. Geometriske kuldebroer
2. Konstruktive kuldebroer
3. Systematiske kuldebroer
4. Konvektive kuldebroer

Geometriske kuldebroer er konstruktioner med forskel på indvendige og udvendige dimensioner. Typisk vil de opstå i huset ved hjørnesamlinger, samlinger mellem vinduer/døre og ydervæggen og fundamentet. I Figur 9 ses en geometrisk kuldebro forårsaget af bygningens geometri, der opstår ved udadgående hjørner.



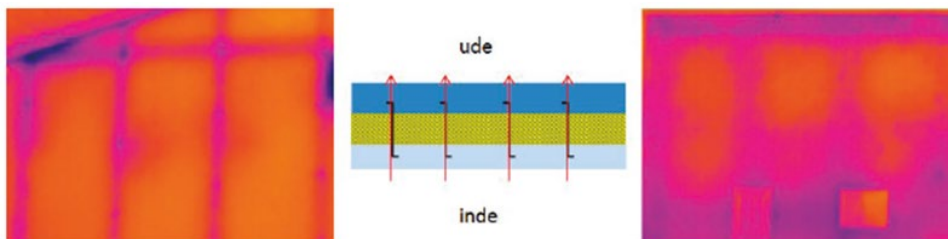
Figur 5: Geometriske kuldebroer (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

Konstruktive kuldebroer er ofte, hvor isoleringslaget bliver helt eller delvist gennembrudt. I huset vil de typisk forekomme ved murfals, skillevægge samt vinduer/døre. Konstruktive kuldebroer er generelt svære at undgå, idet de opstår pga. bygningens udformning. I Figur 10 ses ydervægsopbygning med konstruktive kuldebroer forårsaget af den bærende trækonstruktion i isoleringslaget.



Figur 6: Konstruktive kuldebroer (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

Systematiske kuldebroer er en konstruktiv kuldebro, der optræder med gentagelser, som f.eks. faste bindere, træskelet og ribber. Da husets vægge er massive, vil der ikke forekomme systematiske kuldebroer i selve facaderne, men ved indvendig side kan de forekomme ved montering af forsatsvæggens stolpelag, da disse har kontakt til den eksisterende ydervæg. I Figur 11 ses systematisk kuldebro fra træskelet.



Figur 7: Systematiske kuldebroer (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

Konvektive kuldebroer er utilsigtede luftstrømninger grundet fejl i konstruktionerne. De er ofte forårsaget af, at isoleringslaget ikke slutter helt tæt til de omgivende materialer eller at der er sprækker og revner i selve isoleringslaget. Konvektive kuldebroer kan forekomme i huset, ved forsatsvæggen bag stolpeskelettet (termolægter) mod ydervæggen, hvis disse ikke slutter tæt til ydervæggen, eller hvis hulrummet ikke er udfyldt med isolering. I Figur 12 ses to konvektive kuldebroer ved loftkonstruktionen og en ydervæg med manglende isolering.



Figur 8: Konvektive kuldebroer (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

4.1.4. Transmissionstab fra konvektion

Konvektion er varmeoverføring mellem et fast legeme og et fluid. Varmeoverføringen ved konvektion er en form for ledning, men med den forskel, at molekylerne i et fluid, som i modsætning til faste stoffer bevæger sig og transporterer den optagne varme væk. (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 96)

At reducere energiforbrug til opvarmning af huset handler ikke kun om at forbedre klimaskærmens U-værdier ved efterisolering. Det drejer sig også om at begrænse luftskiftet til det nødvendige og forsvarlige. Hermed at begrænse transmissionstab gennem utilsigtede utætheder.

4.2. Termisk komfort

Der kan være store indeklimaudoordringer med termisk komfort. Problemerne dækker over kuldegener, træk, for høje / lave indetemperaturer til termisk asymmetri og utilfredsstillende variationer i indetemperaturen.

4.2.1. Et fysisk og psykologisk fænomen

Termisk komfort er en af de vigtigste parametre ved projektering og drift af bygninger. Begrebet 'komfort' er et psykologisk fænomen. Termisk komfort er derfor ikke direkte og udelukkende relateret til fysisk miljø eller husets omgivelser. Der er også mange personlige faktorer, der spiller ind i ens oplevelse af komfort.

Den britiske forsker Ken Parsons siger, at: "termisk komfort er en tilstand, mennesker stræber efter, når de føler ubehag." (Kolarik, 2017) Standard DS/EN ISO 7730 definerer termisk komfort som: "denne betingelse i sinde, som udtrykker tilfredshed med termisk miljø" (Dansk Standard, 2006).

De psykologiske faktorer spiller en væsentlig rolle for, om vi oplever komfort eller ej; det er forskelligt fra person til person, om de føler, at det er komfortabelt i de samme situationer. Som regel betragter mennesker deres termiske omgivelser som komfortable, hvis der ikke findes nogen form for termisk ubehag.

Termisk komfort betragtes som opfyldt, hvis to kriterier er opfyldt. Den første er, når en person befinder sig termisk neutralt, dvs. hverken føler sig for kold eller for varm. Den anden er kroppens varmebalance, dvs. den varme, der produceres af stofskiftet, som bør være lig med mængden af tabt kropsvarme.

Bygningsreglementet foreskriver at anvende PMV/PPD-modellen, som er beskrevet i DS/EN ISO 7730 til at danne grundlag for om bygninger overholder kravene til termisk komfort. PMV står for predicted mean vote, som oversættes til forventet middelvotering. PPD står for predicted percentage dissatisfied, som oversættes til forventet procent utilfredse. PMV/PPD-modellen vurderer den kombinerede effekt af beklædning, aktivitetsniveau, temperatur, lufthastighed og luftfugtighed med et tal på en syvpunktsskala spændende fra kold til hed, se Figur 9 t.v.. Modellen er hovedsageligt baseret på bygninger, hvor indeklimaet er automatisk kontrolleret og ikke styres af beboeren. Denne model passer sjældent i forbindelse med renoveringer af bevaringsværdige/fredede bygninger.

Standard DS/EN 15251: Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik (Dansk Standard, 2015) nævner en adaptiv model baseret på feltstudier, men da standarden ikke er direkte nævnt i lovgivningen, bruges den adaptive model meget sjældent i praksis.

Omvendt giver en adaptiv model bedre resultater for bygninger uden mekanisk køling, hvor beboere selv kan åbne vinduer, se Figur 9 t.h.

Bygninger med mekanisk køling



PMV/PPD-model

- Baseret på laboratorieforsøg
- Sammenhæng mellem fysiske faktorer og personers opfattelse
- Vigtige faktorer:
 - Varmebalance
 - Der må ikke opstå lokalt ubehag

Bygninger uden mekanisk køling, vinduer kan åbnes



Adaptiv model

- Baseret på data fra feltstudier
- Sammenhæng mellem komforttemperatur og temperatur udendørs
- Mennesker ændrer deres adfærd for at opnå komfort (klæde sig på, åbne et vindue)

Figur 9: PMV/PPD-model t.v. og Adaptiv model t.h. (Kolarik, 2017)

Det termiske indeklima omfatter de parametre, der har indflydelse på menneskets varmebalance og er vist i Tabel 1.

Tabel 1: Parametre der bestemmer personens varmebalance (Dansk Standard, 2006)

Relateret til	Parameter	Hvor kan den findes?
Personen	Beklædningsisolans, I_{cl} [clo]	Tabeller med isolans for forskellige beklædninger
	Personens aktivitetsniveau/stofskifte, M [met]	Tabeller med stofskifte ved typiske aktiviteter
Rummet	Lufttemperatur, t_a [°C]	Målinger af middeltemperaturen i opholdszonen
	Middelstrålingstemperatur, t_{mrt} [°C]	Beregnes fra målinger i opholdszonen
	Middellufthastighed, v_a [m/s]	Målinger af middelhastigheden i opholdszonen
	Relativ luftfugtighed, ϕ_a [%]	Målinger i opholdszonen

4.2.2. Varmoverføring mellem mennesker og deres omgivelser

Varmeoverføring mellem mennesker og deres omgivelser bruger de samme fysiske principper som for konstruktioner og kan foregå som:

- Varmeledning: Varme fra kroppen til et fast materiale, for eksempel fra fødderne til et koldt gulv
- Konvektion: Varme fra kroppen til luft, for eksempel oplevelsen af træk
- Stråling: Varme via elektromagnetiske bølger mellem to objekter, for eksempel varmen fra radiatorens overflader til huden

4.2.2.1. Træk

Træk defineres som en uønsket lokal afkøling af kroppen der stammer fra luftbevægelse. Man kan også opleve en følelse af træk ved store forskelle i strålingstemperaturer.

Når personer oplever træk, skyldes det ubehagelige luftbevægelser med for lav temperatur, som er med til at kroppen afkøles mere nogle steder end andre. Træk kan føles ubehageligt, og det kan blandt andet føre til stivhed eller spændinger i nakken, der giver hovedpine mm.

Jf. At-vejledning A.1.2-1: for at undgå træk i opholdszonen, skal middellufthastigheden 0,6 m fra ydervæggen være mindre end 0,15 m/s ved en lufttemperatur under 20 °C.
(Beskæftigelsesministeriet, 2018)

Vurderingen af træk bør dog sammenholdes med følgende:

- Strømningsretning: Vil luftstrømmen fra utætheder i klimaskærmen påvirke opholdszonen?
- Utæthedens størrelse: Vil den samlede luftmængde påvirke opholdszonen?

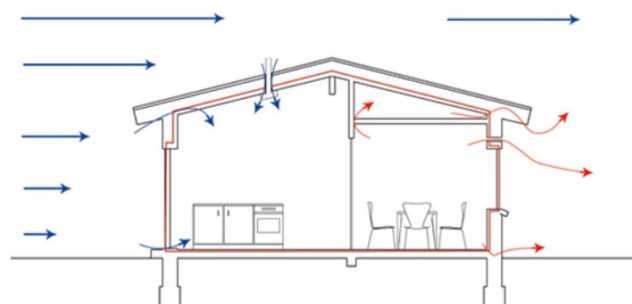
Utilsigtede utætheder skaber uplanlagte luftstrømninger i indeklimaet. De opstår ofte ved samlingsdetaljer ved vinduer og døre samt ved knudepunkter i klimaskærmen. Infiltration er betegnelsen for luft der bevæger sig ud -> ind igennem klimaskærmen og exfiltration er ind -> ud. Infiltrationstabet er varmetabet pga. luftudveksling/trykforskel mellem ude og inde.

Kuldenedfald (konvektion) opstår, når varm luft stiger op, og på den måde trænger kold luft ned. I huse hvor vinduer er kolde, vil kuldenedfaldet skyldes, at varm luft rammer den kolde overflade, bliver nedkølet og synker ned. Kuldenedfald kan skabe følelsen af træk ved vinduer, men folk vil gerne opholde sig ved vinduer, hvorfor der næsten altid er varmekilder der.

4.2.2.2. Trykforhold i bygningen

Trykforskelle over en bygnings klimaskærm medfører, at luft og vand kan trænge ind (eller ud) gennem utætheder i klimaskærmen/tæthedsplanet. Dette sker ofte ved vindpåvirkning af klimaskærmen, hvor der på luvsiden presses luft ind, hvilket giver afkøling og trækgener. På læsiden vandrer varm, fugtig luft ud i konstruktionerne. Når den varme, fugtige luft rammer et koldt luftlag, er der mulighed for afkøling og kondensering. Ved temperaturforskelle vil varm luft stige til vejrs og kold, tungere luft vil synke ned. Den bevægelse hedder skorstenseffekt og kan presse varm, fugtig luft ind tagkonstruktionerne og dermed øge risikoen for fugtproblemer der.

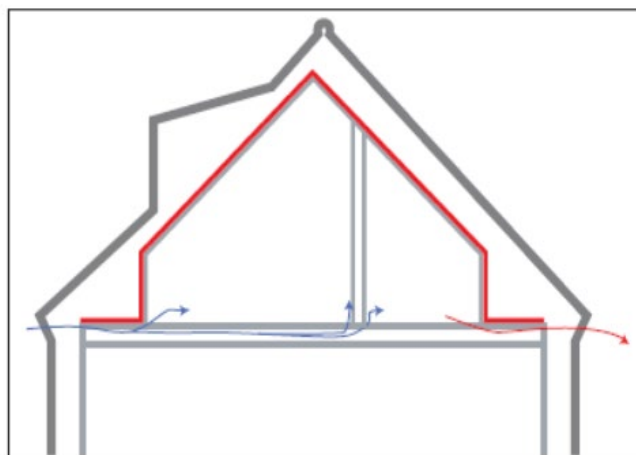
Vindpåvirkning og luftstrømning i og igennem bygninger, f.eks. trækgener i vindside og varmetab via utætheder i klimaskærms læside, kan ses i Figur 10.



Figur 10: Vindpåvirkning og luftstrømning i og gennem bygning (Rasmussen & Nicolajsen, 2007)

En sammenhængende tæthedsplan reducerer luftstrømning gennem klimaskærmen, dvs. der vil være mindre varmetab fra infiltration og en øget komfort. Et eksempel på en sædvanlig kilde til utilsigtede utætheder er samlingen mellem murkronen og tagfod. I Figur 11 kan man se den

situation tegnet diagrammatisk. Kold luft strømmer ind i bygningen ved tagfod, fordi murkronen er utæt og etagedækket ikke er lukket i enderne. (Brandt, 2016)



Figur 11: Luftstrømninger ved tagfod (Brandt, 2016)

4.2.2.3. Tæthedsplan

For at hindre vanddamp fra indeluften i at trænge ud i de omgivende konstruktioner anbringes en dampspærre på den varme side af isoleringslaget. Ved utætheder, samt manglende eller forkert placeret dampspærre, kan vanddampen indefra nå ind i konstruktionerne og medføre opfugtning. Dampspærren skal have en vanddampdiffusionsmodstand (z-værdi) i normale opholdsrum på 50 GPa s m²/kg og i vådrum 100 GPa s m²/kg (Schjønning, Hansen, & Brandt, 2015). Dampspærren er som ofte en del af bygningens fugt- og lufttæthedsplan og hindrer både diffusion og konvektion. Fugttransport ved konvektion er som ofte større end ved diffusion.

Utætheder i klimaskærmen kan forårsage og bidrage til:

- Dårlig indendørs komfort med trækgener og øget varmetab.
- Lokal nedkøling af overflader omkring utætheder med risiko for fugtrelaterede problemer.
- Fugtig indeluft kan trænge ud i konstruktionerne, som ved afkøling kan medføre fugtophobning, hvilket kan danne grobund for skimmelsvampe og forårsage andre fugtrelaterede problemer.

4.2.3. Operativ temperatur

Operativ temperatur er en kombination af lufttemperatur og middelstrålingstemperatur og er relevant, fordi den svarer til den oplevede temperatur, og termisk komfortvejledninger er baserede på den, ikke lufttemperatur eller middelstrålingstemperatur alene.

Forklaret på en forenklet måde der passer til vurderingsgrundlagets detaljeniveau, er den operative temperatur (t_o) et gennemsnit af luftens temperatur (t_l) og middelstrålingstemperatur (t_r):

$$t_o = \frac{t_l + t_r}{2}$$

Ligningen bliver brugt på forskellige måder for at vurdere renoveringsforslagene, dels hvor man skal finde en passende middelstrålingstemperatur:

$$t_r = (t_o \times 2) - t_l$$

og også hvor man skal finde en passende lufttemperatur:

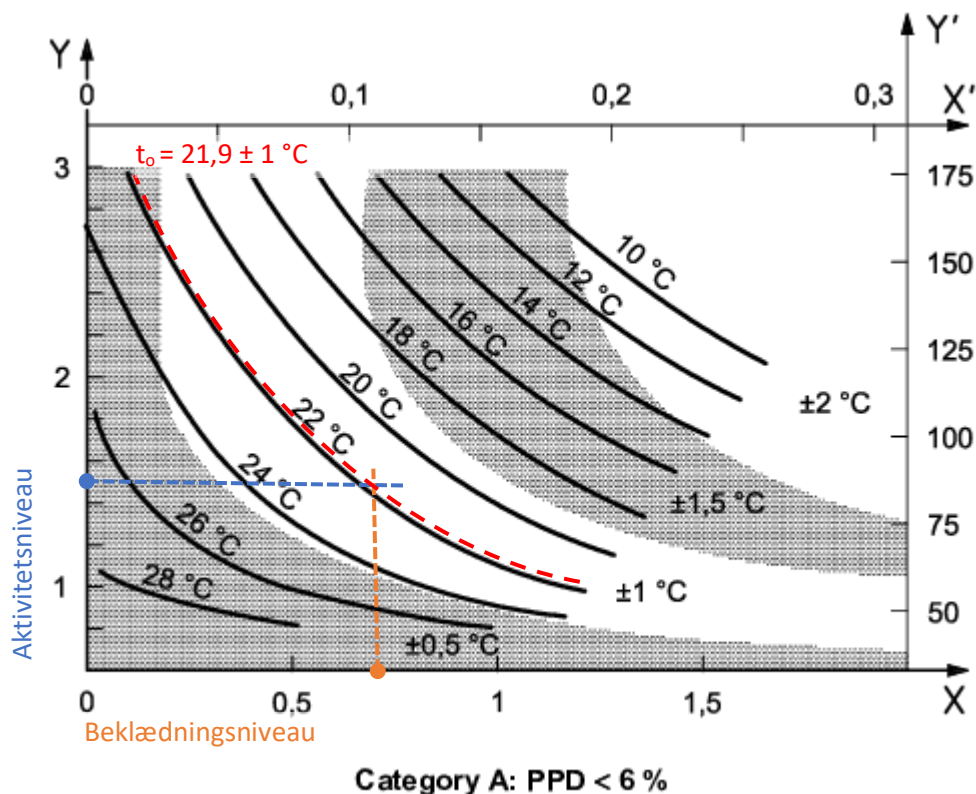
$$t_l = (t_o \times 2) - t_r$$

Ud fra grafer fra DS 7730, se eksempel i Figur 12, (Dansk Standard, 2006, s. 14) kan et spænd for operativ temperatur blive defineret, hvor en vis procent mennesker vil være utilfredse. I eksemplet i Figur 12 forventes færre end 6% at være utilfredse.

De parametre som defineres for at finde temperaturspændet er:

- **beklædning** (clo): For eksempel er clo = 0,7 lig med trøje, bukser, sokker og sko
- **aktivitetsniveau** (met): For eksempel er met = 1,5 lig med siddende aktivitet

For at illustrere brug af grafen, er den ønskede operative temperatur (t_o) for ovenstående værdier: $21,9^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, dvs. $20,9^\circ\text{C} - 22,9^\circ\text{C}$.



Figur 12: Operativ temperaturspændet er $21,9^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, dvs. $20,9^\circ\text{C} - 22,9^\circ\text{C}$. Det er et beklædningsniveau på 0,7 og aktivitetsniveau på 1,0 der giver det resultat, se noter på grafen. Grafen er fra DS7730 (Dansk Standard, 2006, s. 14).

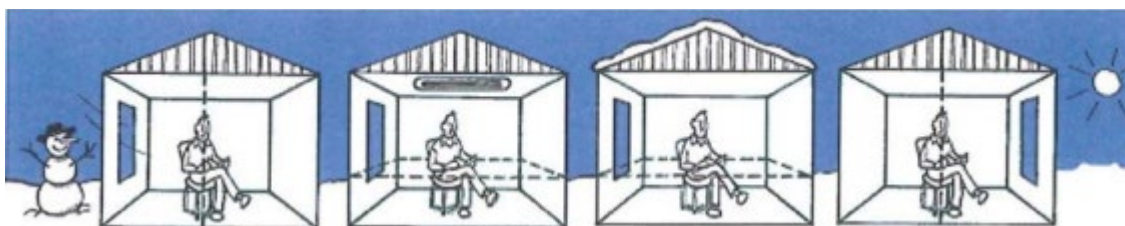
4.2.4. Middelstrålingstemperatur

Om vinteren kan dårligt isolerede vægge, gulve og gamle vinduer ofte give kuldenedfald eller kuldestråling, der føles som træk.

Middelstrålingstemperaturen er en fiktiv temperatur, der kombinerer overfladetemperaturer omkring et rum i én temperatur. Den har faktisk lige så meget at sige om termisk komfort som lufttemperatur. (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 36)

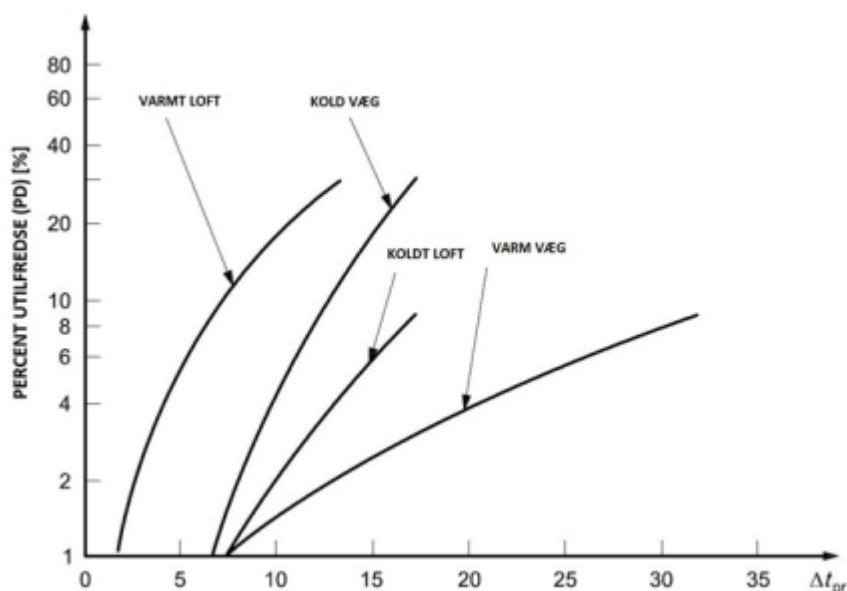
4.2.5. Strålingstemperaturasymmetri

Asymmetrisk stråling kan opleves som træk og resultere i termisk ubehag. Hvis man sidder ved et gammelt vindue som er dårligt isoleret og koldt, oplever man kold stråling på den ene side af kroppen og varm stråling fra væggen på den modsatte side af kroppen. Den oplevelse er et eksempel på vandret asymmetrisk stråling, se Figur 13, t.v. Strålingsasymmetri kan også være lodret, hvis der er kolde / varme gulve.



Figur 13: Forskellige typer af strålingsasymmetri. (Brüel & Kjær, 1996). Fra venstre til højre: 1. Vandret asymmetri mellem et koldt vindue og en varmere væg 2. Lodret asymmetri mellem et varmt loft og et koldere gulv. 3. Lodret asymmetri mellem et koldt loft og et varmere gulv. 4. Vandret asymmetri mellem et varmt vindue og en koldere væg.

Forsøg i klimakamre har vist, at varme lofter og kolde vinduer giver det største ubehag, mens kolde lofter og vægge giver det mindste ubehag. Under disse forsøg blev alle de andre overflader i rummet og luften holdt ved samme temperatur. Figur 14 viser resultater fra disse forsøg, der muliggør at bestemme procent utilfredse på grund af strålingsasymmetri (Δt_{pr}) for de forskellige situationer. (Kolarik, 2017)



Figur 14: Procent utilfredse med strålingsasymmetri fra forskellige flader. (Dansk Standard, 2006, s. 10)

4.3. Fugtteori

Fugt anses for at være den væsentligste årsag til skader i bygninger. Når bygningsdelene udsættes for længerevarende eksponering af fugt over visse grænser, kan fugten forårsage skader som deformation af komponenter, medvirke til nedbrydning af organiske materialer som følge af råd og svamp samt skimmelsvampevækst på overflader. Fugt kan også være en direkte katalysator for nedbrydende processer som frostsprængninger, saltudblomstringer, korrosion, svind og kvældning. Fugtophobning i porøse materialer vil også øge materialets varmeledningsevne, hvilket reducerer isoleringsevnen.

4.3.1. Fugtkilder

Fugt i byggeriet kan have mange årsager. De fugtpåvirkninger, der normalt regnes med som grundlag i byggeriet, er: grundfugt, overfladevand, luftfugtighed, nedbør, byggefugt samt brugsvand.

Af de ovennævnte fugtpåvirkninger er det nedbør og luftfugtighed, som er mest relevante for denne rapport, og efterfølgende fugtteori er relateret til disse to fugtkilder.

4.3.2. Nedbør

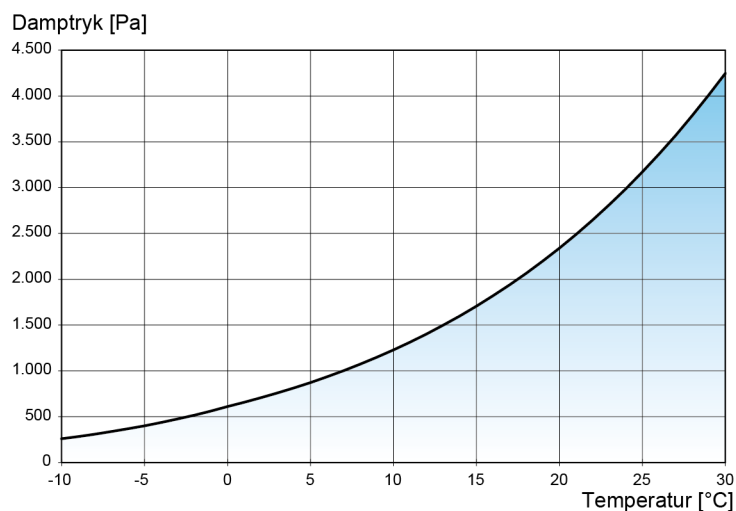
Nedbør i form af regn, sne eller hagl, der rammer bygningsdele lodret skulle gerne ledes væk til afløb så det ikke skaber fugtskader. Bygningsdelene bør udføres og vedligeholdes i en sådan grad, at deres evne til at kunne afvise vand og modstå vandpåvirkning er intakt.

Hvis nedbør påvirkes af vind, vil nedbøren ændre retning og udsætte bygningsdelene for slagregn. Mængden af slagregn, der rammer facaderne, afhænger af bygningens placering og geometri. Derudover spiller fladens orientering og regndråbens størrelse også ind. Den mest udsatte retning for facader i Danmark er mod sydvest.

Trykforskelle omkring en bygning kan presse slagregn ind i revner og sprækker. Særligt udsat er taget, hjørner og vandrette kanter. Efter regnen har ramt især høje facader, vil vandmængden på facaden grundet tyngdekraften blive større på den nederste del af bygningen. Ved store nedbørsmængder kan der opstå en vandfilm på facaden, som i kombination med vandtrykket kan medføre et decideret vandtryk ind på facaden. Fygesne vil under lignede omstændigheder bevæge sig i vandrette retninger, så den kan også trænge ind i konstruktionerne.

4.3.3. Luftfugtighed

Luftfugtighed kan inddeles i luftfugtighed, der stammer fra udeklima og luftfugtighed, der stammer fra indeklima. Under normale forhold vil luftens fugtindholdet være forskellige udendørs og indendørs. Denne forskel i fugtindhold vil resultere i en fugttransport fra steder med højt vanddampindhold/vanddamptryk til steder med lavt vanddampindhold/vanddamptryk. Mængden af vandindhold, (g/m^3) i luften er afhængig af temperaturen og relativ luftfugtighed. Luften kan kun indeholde en vis mængde vanddamp ved en given temperatur. Dette højeste vanddampindhold betegnes som mætningsindholdet og er bestemt empirisk. Hvis temperaturen stiger, stiger mængden af vanddamp, som luften kan indeholde, og mætningsindholdet/mætningstrykket stiger som følge heraf, se Figur 15.



Figur 15: Det maksimale vanddampindhold i luft stiger kraftigt med temperaturen. Med højere vanddampindhold stiger også den mættede vanddamps partialtryk. (Brandt & m.fl., SBI anvisning 224: Fugt i Bygninger, 2019)

Det aktuelle indhold af vanddamp beskrives normalt ved begrebet relativ luftfugtighed (RF). Den relative luftfugtighed angiver forholdet mellem den mængde vanddamp der findes i luften, og den største mængde der kan være ved samme temperatur. Relativ fugtighed angives i procent (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 20).

$$RF = V_{\text{aktuel}} / V_m$$

hvor

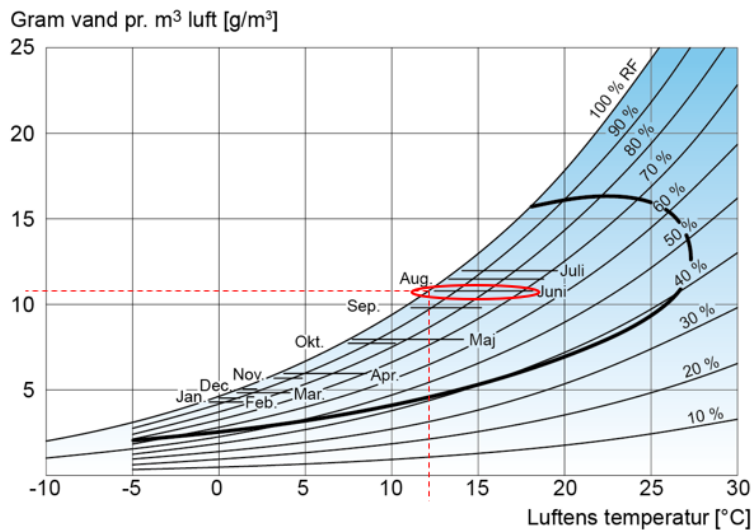
v_{aktuel} angiver det tilstedeværende vanddampindhold

v_m angiver det maksimalt mulige vanddampindhold, dvs. ved mætning

En del af fugten i bygninger forekommer naturligt, grundet luft som alle bygningskonstruktioner er omgivet af, som altid indeholder vanddamp, som vil søge at opnå ligevægtstilstand i forhold til de tilstødende porøse materialer. Når man måler fugtighed i materialer, er relativ fugtighed (%) at foretrække frem for vanddampindholdet (kg/m^3). Dette skyldes primært, at byggematerialers fugtindhold måles og bestemmes i forhold til relativ fugtighed normalt.

4.3.3.1. Udeklima

Udeklimaet om sommeren indeholder et større vanddampindhold end om vinteren. På Figur 16 kan der ses variationer i løbet af et år, under normale omstændigheder. Eksempelvis vil i juni kunne ses, at når temperaturen falder i løbet af aftenen/natten, vil den relative luftfugtighed stige. Her ses det, at hvis udeluften indeholder 11 g vanddamp pr. m^3 og temperaturerne falder til 12 °C, vil der dannes dug.

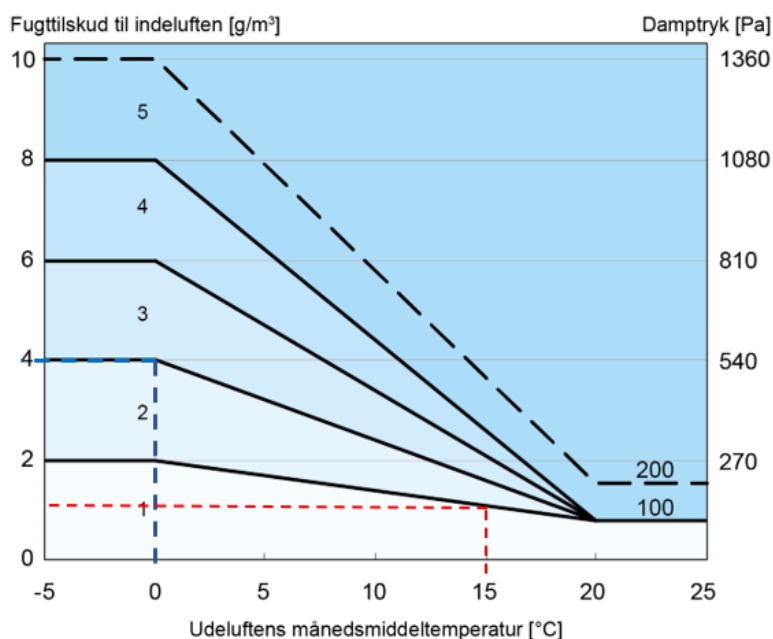


Figur 16: Udeluftens temperatur, vanddampindhold og relativ fugtighed, RF, varierer gennem året inden for det område, som er begrænset af den øverste kurve i vanddampdiagrammet og den kraftigt optrukne kurve. Diagrammet er udarbejdet på basis af meteorologiske data (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022)

4.3.3.2. Indeklima

For indeklimaet vil den relative luftfugtighed variere anderledes end udeluften. Det skyldes et samspil mellem fugtproduktion i bygningen, kontrolleret ventilation, udeluftens fugtindhold samt bygningens volumen.

Fugtproduktionen (fugttilskud), der tilføres bygningen, er normalt i fugtklasse 2 (boliger med normal beboelsestæthed). Fugttilskud til indeluften, i g/m^3 , afhænger af udeluftens månedsmiddeltemperatur i henhold til DS/EN ISO 13788. I Figur 17 ses der, at fugttilskuddet er størst i de kolde måneder. I fugtklasse 2, er der op til 4 g/m^3 (se de blå stiplede linjer) i perioder med en månedsmiddeltemperatur under 0°C . Ved en månedsmiddeltemperatur på 15°C er fugttilskuddet på 1 g/m^3 (se de røde stiplede linjer).



Figur 17: Der forventes et fugttilskud eller et øget damptryk i fugtbelastningsklasserne 1-5, der afhænger af udeluftens månedsmiddeltemperatur i henhold til DS/EN ISO 13788 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022)

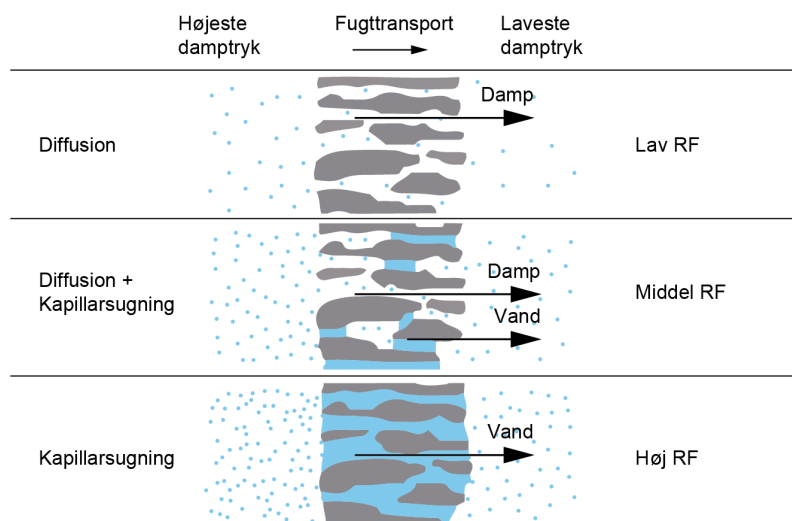
BR18 kræver at ventilation i boliger har en udelufttilførsel på mindst 0,3 l/s m², hvilket svarer til et luftskifte på mindst 0,5 gange pr. time. Ventilationens indflydelse på fugtindholdet er med til at sikre, at den relative luftfugtighed kan holdes på et lavt niveau.

Hvis der eksempelvis er talt om en hus på 120 m², med en loftshøjde på 2,5 m og en rumluft på 22 °C, og der er 60 % RF, indeholder luften (19,41 x 0,6), 11,6 g vand pr. m³, hvis udeluften er 7 °C, og der er 73 % RF, indeholder luften (7,747 x 0,73) 5,7 g vand pr. m³. Dermed fjernes der 5,9 g vand pr. m³ for hver m³ indeluft der fortrænges af udeluften. Fugtproduktionen fra en husstand med to voksne og to børn er ifølge svenske undersøgelser (Tolstoy, 1993) ca. 10.000 g vand i døgnet. Luftskiftet kan fastlægges som: (10.000/5,9) = 1695 m³ g pr døgn, huset rumfang (120 x 2,5) = 300 m³ heraf vil luftskiftet være (1695 m³g/24t) = 141,2 g vand i timen. Hvis luftskiftet er anslået til 0,5 gange pr time vil der mangle (1695 m³g/24t/300)-141,2 = 56,4 g pr time at blive bortventileret før kravet i BR18 er overholdt.

4.3.4. Fugttransport

Fugt kan transporteres både i væskeform og dampform. Fugttransport sker altid som følge af en potentialeforskel, som driver fugten i bevægelsesretningen. Potentialeforskelle er en forudsætning for, at der sker en transport. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 47)

Fugttransport vil enten foregå ved konvektion i luft, kapillarsugning i materialers porestruktur eller diffusion som følge af forskelligt vanddamptryk på de to sider af en konstruktion. I Figur 18 ses de typiske transportformer for fugt i materialer: kapillarsugning og diffusion.

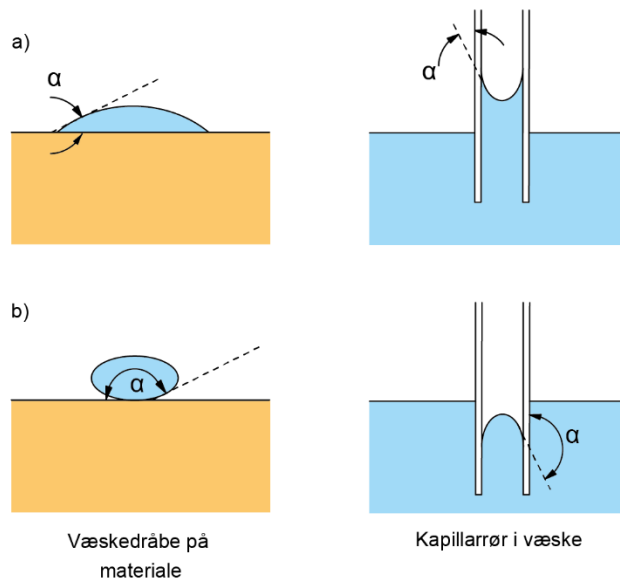


Figur 18: Fugttransport i materialer er afhængig af damptrykforskelle og relativ fugtighed.

4.3.4.1. Kapillarsugning

Kapillarsugning er fugttransport i væskeform, som opstår i porøse materialer, der har en porestruktur og fordeling, der tillader fugt i at trænge ind i materialet. For at kapillarsugning kan indtræde, skal materialet udsættes for et konstant vandtryk, eller være i direkte kontakt med et kraftigt opfugtet materiale. I materialer, hvor kapillarsugning finder sted, skyldes det at materialets porestruktur har porestørrelser med en større diameter end et vandmolekyle. Opsugningen sker ved vandmolekylernes kohæsiens- og adhæsienskræfter. Kohæsienskræfter gør at vandmolekylerne

hænger sammen med hinanden internt (sammenhængskraft) Adhæensionskræfterne sørger for at vandet holder sammen med materialet (vedhæftningskraft). I Figur 19 ses der, at hvis vanddråbens kontaktvinkel er stor (nederst t.v.) til materialets overflade, vil lidt af dråbens overflade være i kontakt med materialet. Hvis vanddråbens kontaktvinkel er lille (øverst t.v.), vil en større del af dråbens overflade have kontakt til materialet. Tegl har en lille kontaktvinkel til vanddråben, og dermed gode betingelser for kapillarsugning af vand grundet dets porestruktur.



Figur 19: Kontaktfladens størrelse for en dråbe vand er afhængig af kontaktvinkelen. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022)

4.3.4.2. Diffusion

Diffusion er fugttransport, der drives af forskelle i vanddamptrykket/vandindholdet i luften. Diffusion opstår, da vandmolekyler har evnen til at bevæge sig frit og uafhængigt af hinanden. Derved opstår en automatisk jævn fordeling af de forskellige vandmolekyler, der er i luften. Områder med større koncentrationer vil drive vandmolekylerne ud i områder med mindre koncentrationer. Bevægelsen sker i retning af det aftagende vanddamptryk/vandindhold. Om vinteren sker der transport af fugt ud af den opvarmede bygning grundet diffusion. Det sker fordi mængden af molekyler, der flyttes ved diffusion, afhænger af koncentrationsforskellen og af diffusionskoefficienten, som er temperaturafhængig og forøges med temperaturen. Diffusion af vanddamp i porøse materialer sker under forudsætning af, at materialet har en porestruktur og fordeling, der tillader vanddamp i at trænge igennem det. Vanddampdiffusionsmodstanden, også kaldet z-værdien, er et udtryk for mængden af vanddamp, der kan transporteres igennem et materiale.

Til beregning eller fugtteknisk vurdering af materialer med fast tykkelse anvendes normalt vanddampdiffusionsmodstanden:

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \left[\frac{\text{GPa s m}^2}{\text{kg}} \right]$$

hvor

d er tykkelsen af materialet (i strømningsretningen).

GPa (Giga Pascal) = 10⁹ Pa anvendes i stedet for Pa for at have enklere talværdier for Z

Der kan også anvendes andre enheder end Z-værdien, f.eks. s_d eller μ . Sammenligning mellem forskellige materials vanddampdiffusionsmodstand kræver omregning til de samme enheder. Nogle enheder, som er almindeligt anvendte i udlandet, og deres sammenhæng med Z-værdien, er givet i Appendiks A, tabel 22. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 52)

Skader som følge af fugttransport gennem bygningsdele i væg- og tagkonstruktioner kan f.eks. undgås ved at indbygge en dampspærre, som har tilstrækkelig diffusionsmodstand (høj Z-værdi).

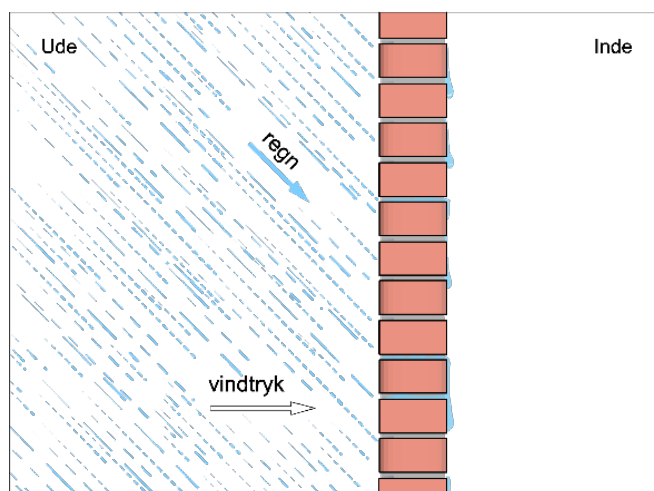
4.3.4.3. Konvektion

Konvektion opstår pga. luftstrømning fra et sted til et andet. Forskelle i atmosfærisk tryk er den drivende faktor for vanddamptransporten ved konvektion. Luftstrømningerne kan også opstå som følge af temperaturforskelle, som giver termisk opdrift, lufttryk fra bygningens ventilationssystem eller være forårsaget af udvendigt vindtryk.

Naturlig konvektion, der opstår i boligens rum, i luftfyldte spalter og hulrum i selv bygningsdelene eller meget diffusionsåbne isoleringsmaterialer, kan frembringe en omfordeling af fugt. Hvis der opstår en trykforskel over en konstruktion, kan der igennem utætheder i bygningens lufttætte lag ske transport af luft og vanddamp som følge af konvektion. Sker denne transport af varm luft indefra og ud i en kold bygningsdel, vil luftens relative fugtighed stige, når den varme luft afkøles. Når det sker, opstår der risiko for kritiske fugtforhold som kondensation. Sker transporten af vanddamp modsat fra de kolde omgivelser ind i en varmere konstruktion, vil den indtrængende lufts relative fugtighed falde ved opvarmning.

4.3.4.4. Et-trinstætning

En et-trinstætning kendetegnes ved, at den konstruktion, som adskiller inde- fra udeklima, består af en homogen vægflade, som både skal skærme for vind og vand. Når der er vindpåvirkning, sker der en trykforskel, hvor vandet presser indad igennem selv små utætheder. Selv om den indvendige efterisolerede ydervæg kan konstateres tør og varm, kan der bag isoleringen dannes fugt og skimmelsvamp. Dette er ofte forbundet med utætheder i dampspærren eller manglende vedligehold af facaden. Ved indvendig efterisolering reduceres varmetab igennem ydervægskonstruktionen som belastes af den manglende udtørring.

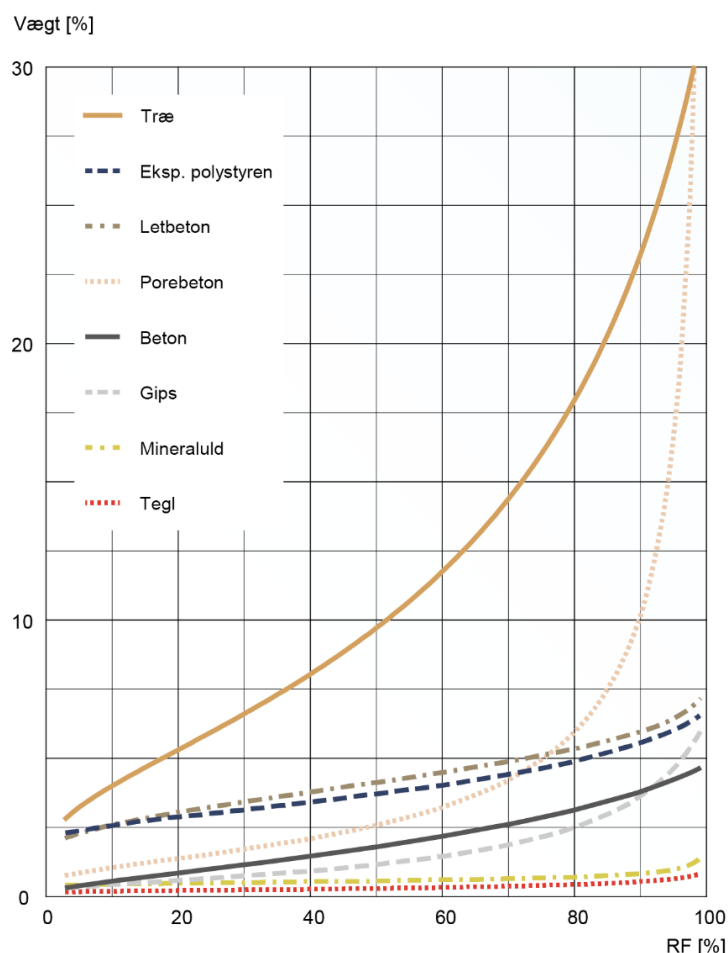


Figur 20: Ved et-trins tætning udsættes fugen for samtidig påvirkning af vand- og vindtryk. Normalt kan en helstøvsvej regnes som tæt over for vedvarende slagregn, mens det derimod er velkendt, at der kan trænge vand gennem en ½-støvsvej. (Brandt & m.fl., SBI anvisning 224: Fugt i Bygninger, 2019, s. 73, fig. 37)

4.3.5. Fugt i byggematerialer

Fugtindholdet i materialer er normalt betinget af fugttransport ved enten konvektion, kapillarsugning eller diffusion. Fugtoptagelsen er afhængig af materialets porestruktur samt omgivelsernes randbetingelser. Hygroskopiske materialer vil optage eller afgive fugt, indtil de når en ligevægtstilstand med det omgivende miljøes fugtindhold. Fugten kan være tilført ved produktion af materialerne, fra fugt i omgivende luft, ved direkte vandpåvirkning eller fra fugt i tilstødende materialer.

Materialers evne til at optage og afgive fugt kan ses i de specifikke sorptionskurver for de specifikke materialer. Sorptionskurver er normalt bestemt eksperimentelt, men kan også være bestemt ved et matematisk grundlag. Sorptionskurver kan variere meget indenfor samme materialegruppe. Hvis materialet indeholder salte, vil det medføre variationer i sorptionskurver. De kurver, der beskriver opfugtning kaldes absorption; de kurver der beskriver udtørring kaldes desorptionskurver. Kurvens afvigelser fra hinanden kaldes hysteres. Når et materiale delvis bliver udsat for opfugtning og udtørring, vil fugtindholdet bevæge sig imellem de to kurver. I praksis anvendes en sorptionskurve, som er en fugtligevægtskurve mellem absorption og desorption. I Figur 21 ses et udsnit af de mest anvendte materials sorptionskurver.

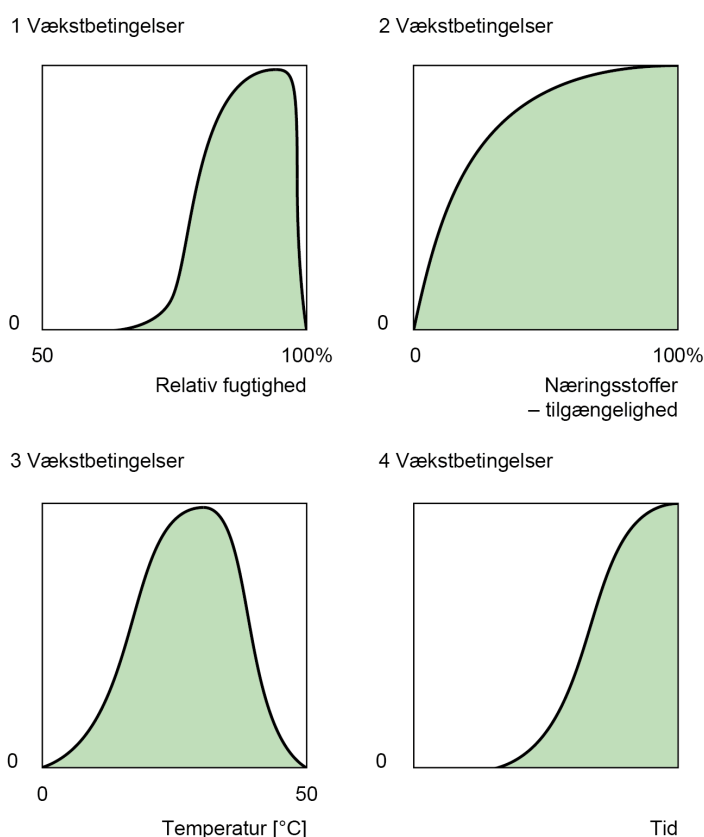


Figur 21: Skematiske sorptionskurver (fugtligevægtskurver) for almindelige byggematerialer. Sorptionskurverne afhænger i høj grad af materialets porestørrelse og -fordeling, så der er stor forskel på materialer med grove porer, fx tegl, og materialer med mange fine porer, f.eks. træ eller træbaserede materialer. Sorptionskurverne afhænger altså ikke alene af, hvilken type materiale der er tale om, men også af materialets sammensætning, så sorptionskurven er afhængig af det aktuelle materiale, f.eks. træarten eller den anvendte betonblanding. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 34)

4.3.6. Vækstbetingelser for skimmelsvamp

Normalt gør forekomst af sporer fra skimmelsvampe i tørre bygninger ikke noget problem. Flere undersøgelser har dog vist, at bare et område med skimmelsvampevækst på størrelse af et par håndflader, enten som synlig eller skjult skimmelsvampevækst, kan skabe gener og symptomer blandt brugere af bygninger. Både skimmelsvampe i vækst og udtørret, gammel skimmelsvampevækst kan være sundhedsskadelige. Er skimmelsvampe i vækst, frigiver den sporer, myceliefragmenter og mikropartikler til luften, der føres rundt i bygningen. Forekomster af skimmelsvampevækst ses mest på organiske materialer som træ og karton, ved en høj relativ luftfugtighed på over 75 %.

Følgende fire forudsætninger skal være til stede for skimmelsvampevækst: temperatur, næring, fugt og tid, se Figur 22. Vigtigst er, at der er næringsstoffer og fugt til stede.



Figur 22: Skimmelvækst afhænger af en række faktorer (Brandt & m.fl., SBI anvisning 224: Fugt i Bygninger, 2019)

På Figur 22, øverst t.v. ses der at skimmelsvampevækst først sker ved 75% relativ luftfugtighed, men klinger af igen ved relative fugtniveauer nær 100 %. Øverst t.h. ses der, at der skal være adgang til næring – selv ganske små mængder, f.eks. lidt forurening/smuds, er nok til, at der kan ske kraftig vækst. Nederst t.v. kan man se, at skimmelsvampevækst kan ske i et stort temperaturinterval. Væksten er størst ved temperaturer omkring 20-30 °C, mens den er ringe både ved lave og høje temperaturer. Væksten klinger af, både når temperaturen kommer ned omkring 0 °C og op mod ca. 50 °C. 4. Nederst t.h. kan man se, at vækst af skimmel kræver en vis tid, som afhængig af vækstbetingelserne kan være fra dage til måneder. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 88)

Hvis der indgår træ i bygningsdelene eller materialerne er tilsmudsede, er den sikreste måde at undgå skimmelsvampevækst på, at holde materialeoverfladen under den kritiske fugtighed 75 % RF, se Tabel 2.

Tabel 2: Eksempler på eksperimentel bestemt kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst på overfladen af byggematerialer (Johansson et al., 2005). Værdierne dækker lang tids påvirkning ved 20 °C.

Materiale	Kritisk RF for skimmelvækst, %
Træ og træbaserede materialer	75-80
Karton på gipskartonplader	80-85
Mineraluld	90-95
Ekspanderet polystyren (EPS)	90-95
Beton	90-95
Forurenede materialer, fx forurenede med jord eller støv	75

For at bestemme grænsen for vandaktiviteten på overfladen af en konstruktionsdele, kan den lavest tilladelige overfladetemperatur bestemmes ved hjælp af en metode, som er beskrevet i DS/EN ISO 13788:2013 (Dansk Standard, 2013), se Tabel 3.

Tabel 3: Kritiske indvendige overfladetemperaturer for fugtbelastningsklasserne 1-4. Beregnet iht. DS/EN ISO 13788:2013 (Dansk Standard, 2013) for hhv. kondensrisiko (100 % RF) og skimmelrisiko (75 % RF). Indelufttemperaturen er 20 °C, dog 22 °C i juni og september og 23 °C i juli og august. Udelufttemperaturen er baseret på månedsmiddelværdier fra DRY 2013. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Nielsen, & Morelli, 2022, s. 90)

Fugtbelastningsklasse	Måned	Ude-temperatur	Inde-temperatur	Kritisk overflade-temperatur	Kritisk overflade-temperatur
		°C	°C	100% RF, °C	75% RF, °C
1	December	0,7	20	4,8	9,0 ¹
2	December	0,7	20	8,6	13
3	December	0,7	20	11,8	16,2
4	December	0,7	20	14,4	18,9

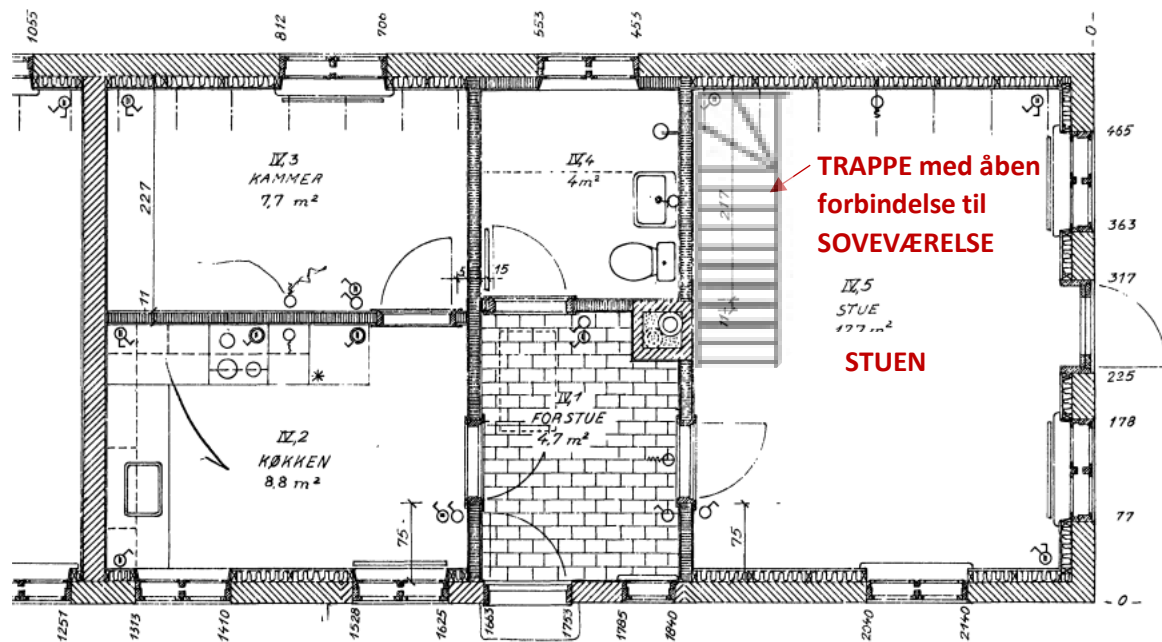
1. For fugtbelastningsklasse 1 og vurdering af skimmelrisiko ($T_{kritisk}$ 75%) er den kritiske måned oktober. Her vil kritisk temperatur være 10,3 °C.

5. Metode

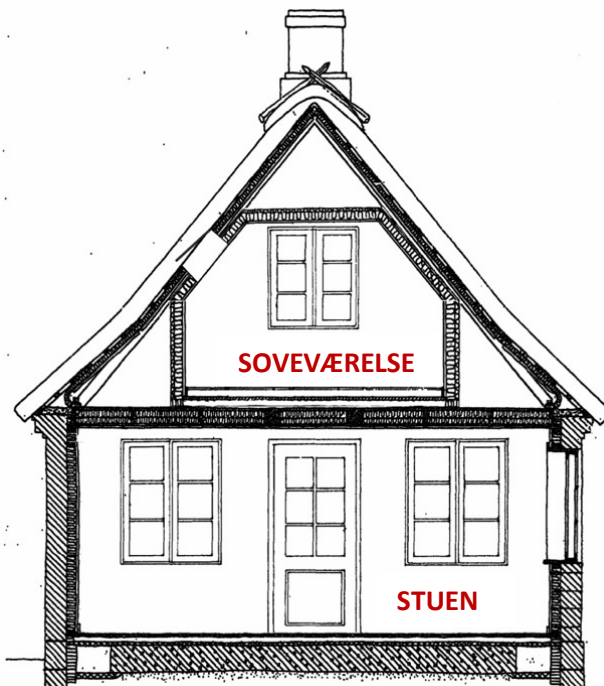
5.1. Målinger af det eksisterende hus

Som forundersøgelse laves der en tilstandsvurdering af huset med fokus på fugt forhold og termisk indeklima.

Fokus for målingerne er i stuen, se Figur 23 og Figur 24.



Figur 23: Gammel Lundtoftevej 34C. Plan tegning. Stueetagen.



Figur 24: Gammel Lundtoftevej 34C. Lodret snit.

5.1.1. Infiltration

Husets tæthed testes ved hjælp af en blower door test for at konstatere hvor meget infiltration bidrager til trækfølelsen.

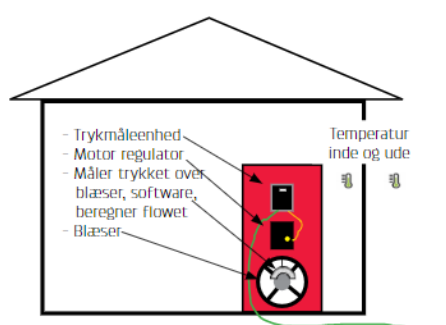
Test af tæthedsplanet med en blower door test bruges til at finde mængden af infiltration, men kan også hjælpe med at finde evt. utætheder, hvis den bruges i kombination med termografering. Termograferingen laves af overfladerne, mens forsøgsområdet har et undertryk på minimum 5 Pa jf. DS/EN 13187. Det er bare vigtigt at huske, at termografering ikke kan bestemme utæthedernes omfang men udelukkende kan anvendes til at lokalisere utætheder. Udover termografering blev der også anvendt røg og stearinlys for at spore hvor utæthederne kunne være.

Det anvendte blower door test udstyr hedder Minneapolis BlowerDoor MiniFan, fra BlowerDoor GmbH. Den tilhørende trykmåler er af typen DC-700. Applikationen der forbinder pc'en med trykmåleren, hedder TECTITE Express.

Nøjagtigheden af målingerne kommer an på størrelsen af åbningen til blæseren. Diameteren af åbningen for blæseren kan nemlig ændres via forskellige ringe som tages af og på som en del af testproceduren. Uden ring og for ring 1-3 er nøjagtigheden den største af: $\pm 4\%$ af målingen, eller $\pm 1.7 \text{ m}^3/\text{h}$. Med den mindste ring, ring 4, er nøjagtigheden den største af: $\pm 4\%$ af målingen, eller $\pm 0.9 \text{ m}^3/\text{h}$. Se Bilag 1: Datasheet for blower door test udstyr.

Blower door test udstyr har følgende basiskomponenter, se Figur 25:

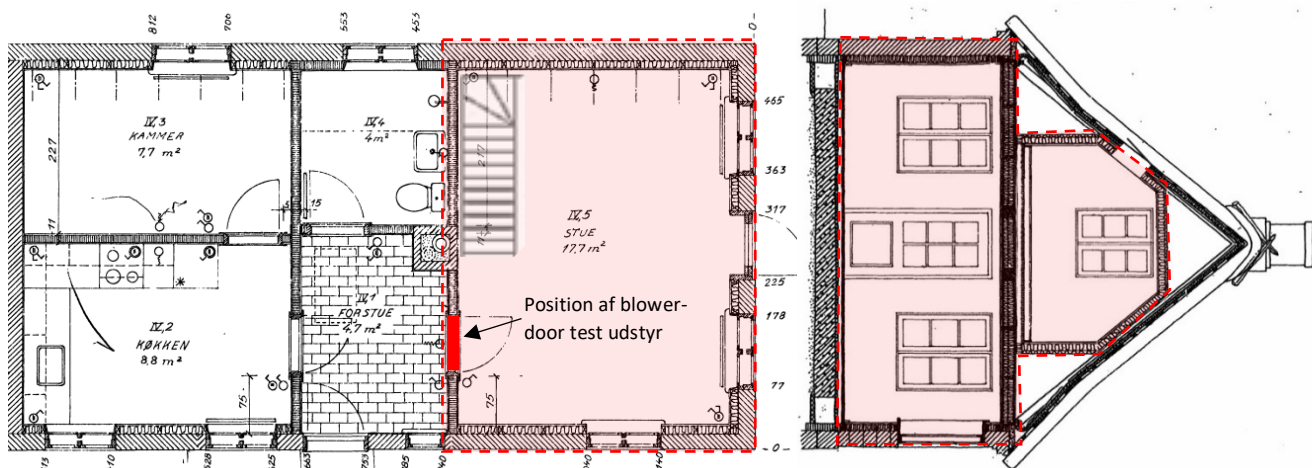
- En ventilator monteret i en fleksibel ramme så den kan tilpasses dørhul med forskellige størrelser
- En tryksensor monteret i ventilatoren til bestemmelse af luftstrømmen fra ventilatoren og den installerede ring. Sensoren er lavet af et tyndt rustfrit stålør.
- En enhed der tilsluttes ventilatoren til styring af lufthastigheden samt registrering af parametre under målingen.
- En PC som har styringssoftware installeret og kan sluttes til styreenheden med USB-kabel. Softwaren styrer testen, regner over- og undertryk og laver grafer og rapporter med testdata.



Figur 25: Principskitse af blower door test udstyr (Hansen, Vanhoutteghem, Nøhr, & Due, 2021)

Inden blower door testen påbegyndes, opdeles huset i målezone.

Målezone 01 er defineret som stue samt 1. sal, da disse to rum hænger sammen via trappen. Blower door monteres i dør mellem stue og gang, se Figur 23, Figur 24, og Figur 26.



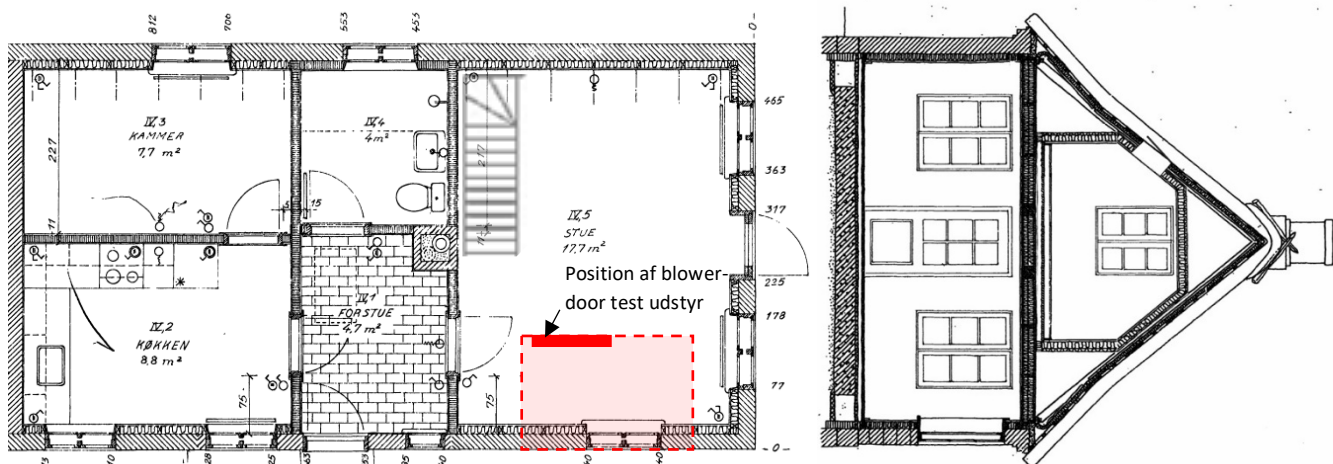
Figur 26: Målezone 01 er markeret med lyserødt. Området her inkluderer første sal.



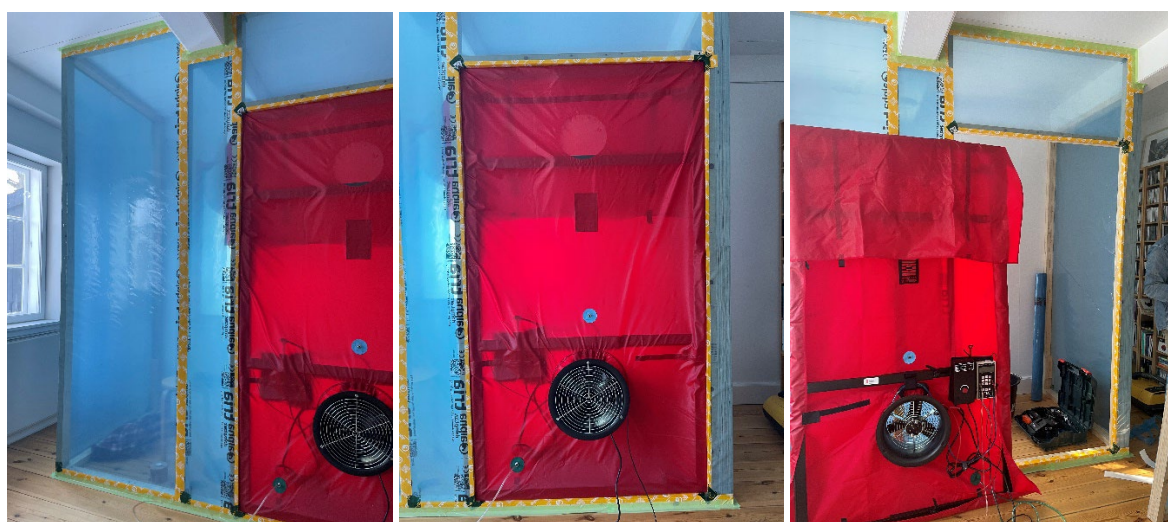
Figur 27: Blower door test udstyr monteret i døråbningen mellem stuen og indgangen.

Der blev lavet en test med målezone 01, se Tabel 4. Testen viste at usikkerhederne i målezonen var for store til at drage konklusioner om utætheder i konstruktionen, da den inkluderede første sal via den åbne forbindelse via trappen.

Målezone 02 oprettedes med henblik på at afgrænse resultaterne til kun at gælde test af området omkring et vindue, så både vindueskonstruktion og samlinger mellem bygningsdele kunne testes for utætheder. Vinduet, der blev valgt, var denne: uden radiator, med mindst solpåvirkning og hvor stuens indretning har stillesiddende pladser lige ved vinduet, langs væggen, se Figur 28. Her byggedes en forsatsvæg beklædt med dampspærre fra Dafa med en sd-værdi på 85 m, alle samlinger udførtes iht. membran-erfa (MEMBRAN-ERFA, 2023) eller producentens vejledning, se Figur 29.



Figur 28: Målezone 02 markeret med lyserødt. Områder her inkluderer ikke første sal.

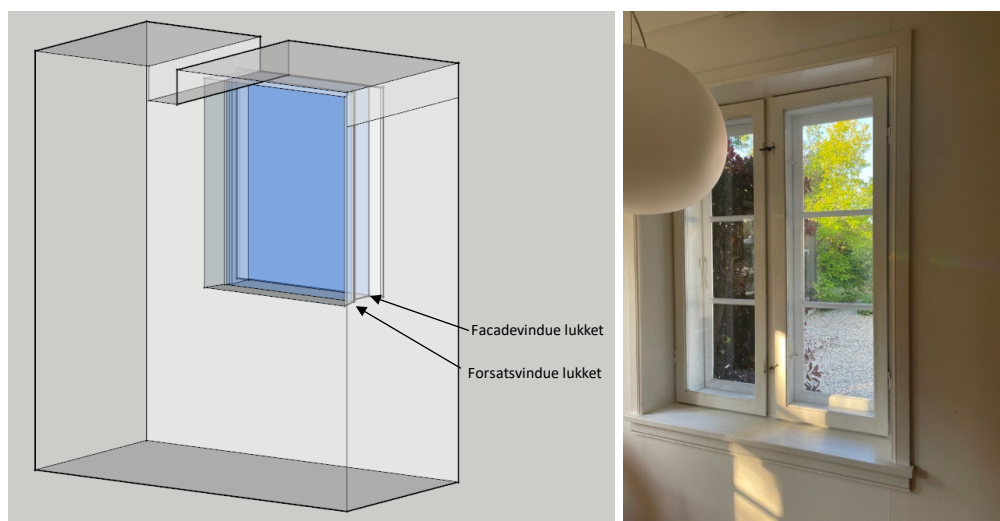


Figur 29: Billeder af blower door test kammeret i stuen. Med og uden dørhul lukket.

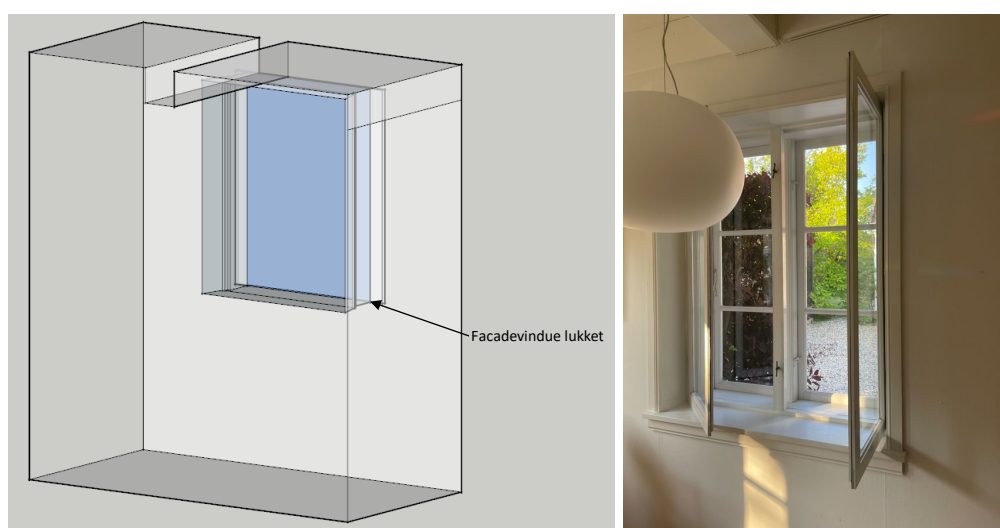
Der blev lavet tre tests med målezone 02 med forskellige konditioner for at isolere kilderne til infiltrationen og kvantificere deres bidrag til den total mængde infiltration, se Tabel 4 og Figur 30 - Figur 32.

Tabel 4: Oversigt over målezone og testnumre for blower door tests. Formålet med test beskrives og en figur reference henvises til.

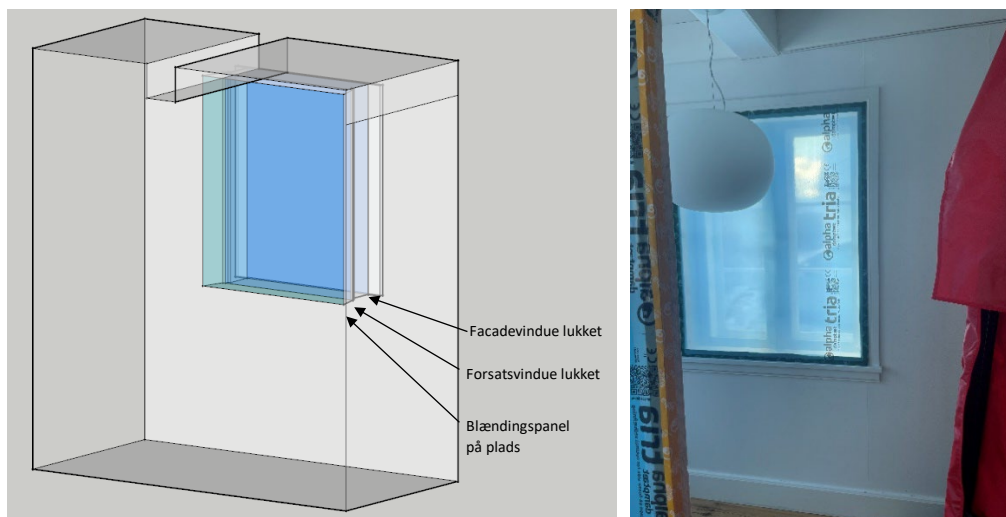
Målezone	Test nummer	Konditioner	Formål	Figur
01	A	Alle vinduer lukkede	At konstatere den samlede mængde infiltration	
02	01	Forsatsvindue og facadevindue lukkede	At konstatere den samlede mængde infiltration	Figur 30
02	02	Forsatsvindue åbent, facadevindue lukket	At isolere tæthedsbidrag af forsatsvinduet	Figur 31
02	03	Vindueskonstruktion blændet	Test af samlinger langs loft, gulv, og udenom vindueskonstruktion, og utætheder i dampspærren	Figur 32



Figur 30: Målezone 02, Test 01, Konditioner: Forsatsvindue og facadevindue lukkede.



Figur 31: Målezone 02, Test 02, Konditioner: **Forsatsvindue åbent**, facadevindue lukket.



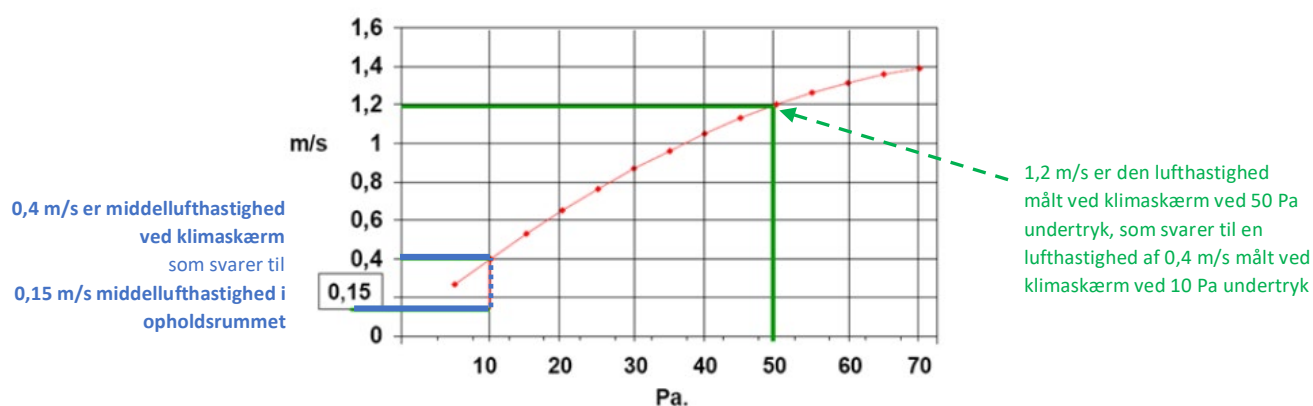
Figur 32: Målezone 02, Test 03, Konditioner: Vindueskonstruktion blændet med en ramme med dampspærre.

5.1.2. Luftstrømningshastighed

Et termisk anemometer, testo 405i, blev brugt til at måle lokale lufthastigheder for at vurdere deres bidrag til trækfølelse. Det kan måle alt mellem 0 – 30 m/s, med en nøjagtighed på $\pm (0.1 \text{ m/s} + 5 \% \text{ af den målte værdi})$ for hastigheder på 0 to 2 m/s og en nøjagtighed på $\pm (0.3 \text{ m/s} + 5 \% \text{ af den målte værdi})$ for hastigheder fra 2 to 15 m/s, se Bilag 2: Datasheet for anemometer.

For at undgå trækfølelse skal middelluftshastigheden, $\bar{v}$, i opholdszonen være under 0,15 m/s, som forklaret i teoriafsnit 4.2.2.1. For at opnå det skal lokale middellufthastigheder, v , ved klimaskærmen være under 0,4 m/s (Hansen, Vanhoutteghem, Nøhr, & Due, 2021, s. 52). Luftstrøms hastigheder på dette niveau ($\leq 0,4 \text{ m/s}$) er næsten umulige at måle. Der er derfor udviklet en metode, hvor man ved at øge undertrykket fra det normale undertryk indendørs, på 10 Pa, til 50 Pa kan få strømningshastigheder til at stige til et målbart niveau.

Strømhastigheder kan derefter omregnes til tilsvarende strømningshastigheder ved 10 Pa som illustreret i Figur 33. Værdierne på kurven er etableret empirisk (Hansen, Vanhoutteghem, Nøhr, & Due, 2021, s. 52).



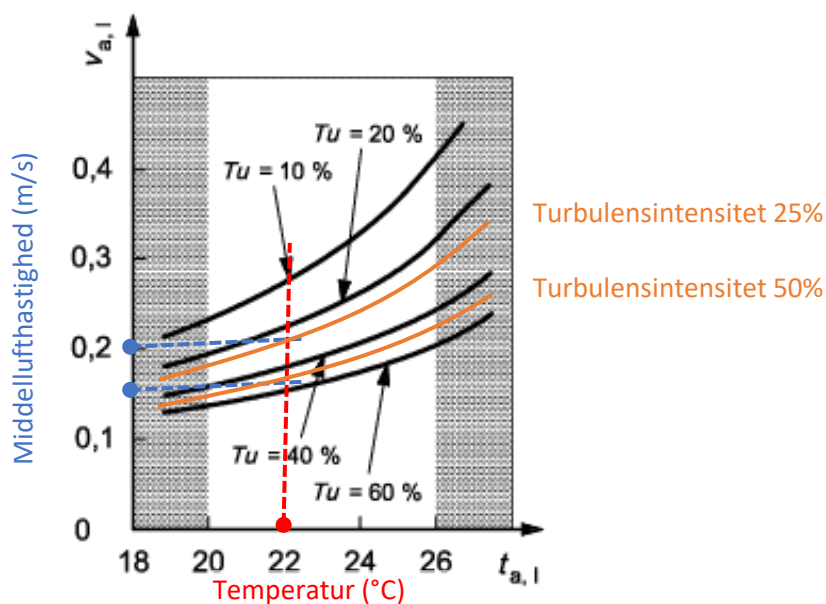
Figur 33: Kurve til omregning af maksimum ønskelig strømningshastighed ved 50 Pa til maksimum ønskelig strømningshastighed ved 10 Pa, som betragtes som den normale undertryksskondition indendørs. En maksimumstrømningshastighed på 0,4 m/s målt ved klimaskærmen svarer til en middelstrømningshastighed på 0,15 m/s i opholdsrummet (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 52).

Når man har en måling for lufthastigheder ved 10 Pa, en temperatur og en idé om turbulensens intensitet, kan man referere til modellen for trækvurdering i Figur 34 fra (Dansk Standard, 2006, s. 16).

Modellen for trækvurderingen er lavet ud fra en ligning, der relaterer procent utilfredse mennesker (DR) til: lufttemperaturen (t_l), middelstrømningshastigheder ($\bar{v}_l$) og turbulensintensitet.

$$DR = (34 - t_l) * (\bar{v}_l - 0,05)^{0,62} * (0,37 * \bar{v}_l * (Tu + 3,14))$$

Grafen i Figur 34 gælder for 20 % utilfredse (DR) (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 45). Den forklarer generelt at en høj turbulens gør folk mere sensible over for luftstrømninger og lave temperaturer. Turbulensintensiteten i stuen er nok højere end en gennemsnitlig bygning, som ligger omkring 40% (Dansk Standard, 2006, s. 17) pga. kolde vinduesflader og hullet i loftet, der bidrager betydelig til konvektion, så den vurderes til at være 50% for at have et mål at vurdere efter.



Figur 34: Grafen for 20% Utilfredse. Den viser relationen mellem lufttemperaturen (°C), middelluftstrømningshastighed (m/s) og Turbulensintensitet (%). To eksempler er illustreret for at forklare brugen af grafen. For en temperatur på 22 °C og middellufthastighed 0,15 m/s skal turbulensintensiteten være under 50%. For den samme temperatur ved en lufthastighed på 0,2 m/s skal turbulensintensiteten være under ca. 25%.

Metoden brugt til at beregne **lokale luftstrømningshastigheder** er følgende:

1. Etabler undertryk på 50 Pa i målezone 02 med blower door testudstyr
2. Mål lokale lufthastigheder med anemometer
3. Omregn lufthastigheder ved 50 Pa til en tilsvarende hastighed ved 10 Pa ved brug af grafen set i Figur 33
4. Sammenlign omregnet værdi med 0,4 m/s, som er den lufthastighed målt ved klimaskærmen, der svarer til en middellufthastighed i opholdsrummet på 0,15 m/s
5. Tjek modellen for trækvurdering, Figur 34, for at se om kombinationen af de målte lufthastigheder og temperaturer falder under kurven for 50% turbulensintensitet.

Denne metode er en meget forenklet måde at måle og vurdere luftstrømme/træk på med mange usikkerheder, og i praksis skal der stadig en vurdering til, for at afgøre om påvirkning fra et utæt område har påvirkning i den definerede opholdszone.

5.1.3. Temperaturer og relativ fugtighed

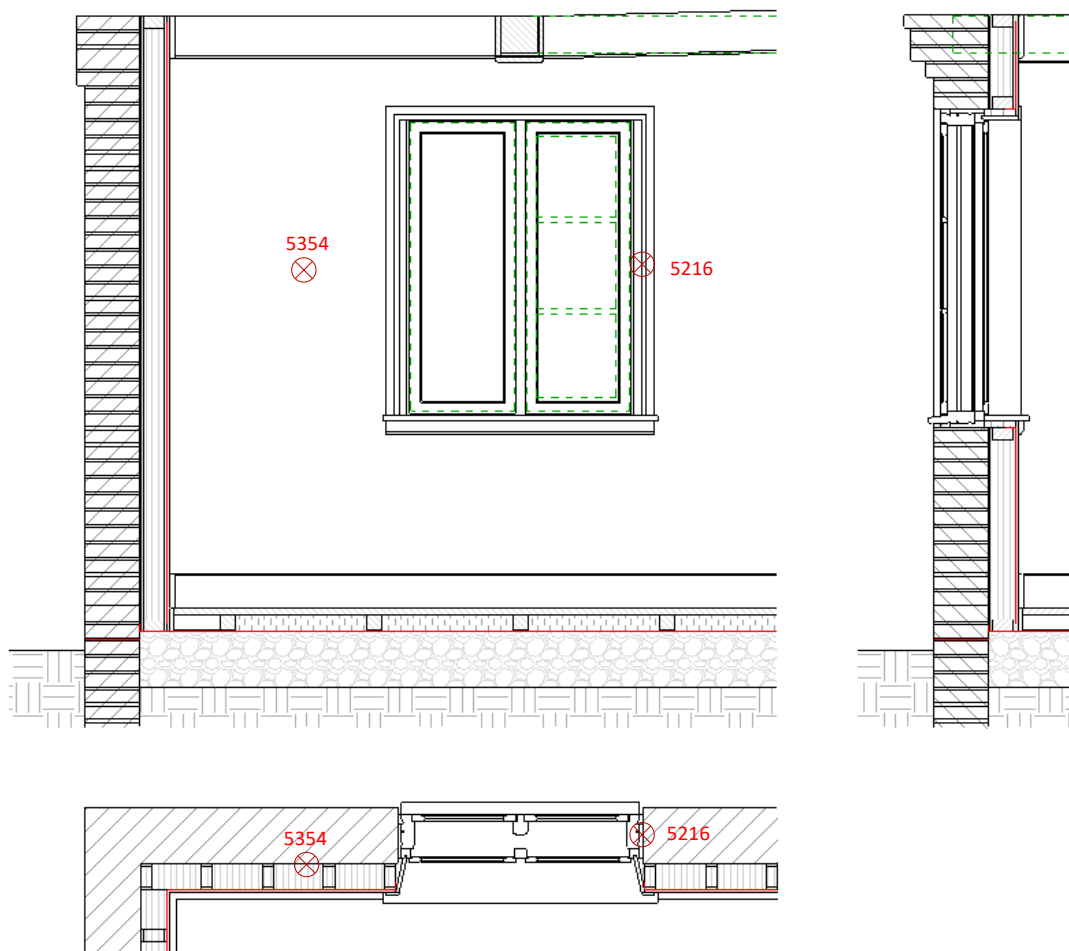
Temperatur og relativ fugtighed i konstruktionen og udendørs blev målt med Lascar EL-USB-2. Loggerne har et målespænd fra -35 °C to 80 °C og inden for det er nøjagtigheden ± 0.45 °C. For relativ fugtighed, har loggerne et spænd fra 0 – 100% og en nøjagtighed på 3% inden for et spænd mellem 20 og 80%. Se Bilag 3: Datasheet for dataloggere.

Dataloggerne har været indstillet til at måle en gang hver time fra 31. marts 2022 til 7. marts 2023. En datalogger blev placeret i stuen, en udendørs og to i konstruktionen, se Tabel 5.

For at placere loggerne i konstruktionen blev der boret huller i væggen og i lysningen, der var lidt større end loggernes diameter. Loggerne blev derefter placeret med sensoren indad, oppe mod murstenene, så de kunne måle temperaturerne mellem væggen og henholdsvis lysningen og isoleringslaget, se Figur 35. Hullerne blev derefter lukket og fuget, for at genskabe konditionerne inden hullerne blev boret.

Tabel 5: Oversigt over dataloggere

Datalogger nummer	Position
5028	indendørs, i stuen
5216	i konstruktionen, i lysningen, i hulrummet tæt på murstenene
5354	i konstruktionen, i væggen, tæt på murstenene
5457	udendørs, i skuret



Figur 35: Dataloggere: placeringer i konstruktionerne.

5.1.4. Overfladetemperaturer

Overfladetemperaturer blev målt manuelt på stedet, ikke løbende.

De blev målt med et digitaltermometer fra TECPEL, som hedder DTM_305, som har et enkelt input for et termoelement. Instrumentet har et målespænd fra -50 °C to 1300 °C, og inden for det er nøjagtigheden $\pm (0.3\% \text{måling} + 1 \text{ } ^\circ\text{C})$. Se Bilag 4: Datasheet for digitaltermometer.

Et termisk kamera blev også brugt til at registrere overfladetemperaturerne. Kameraet hedder FLIR One Pro og det sluttet til en iOS enhed via en 'lightning connector' og kontrolleres via FLIR One app. Kameraet har en nøjagtighed for billederne på: $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ eller $\pm 5\% \text{ måling}$ når kameraet er mellem 15 °C og 35 °C og scenen er mellem 5 °C og 120 °C. Se Bilag 5: Datasheet for termisk kamera.

5.1.4.1. Lokalisering af kuldebroer ved termografering

Termografering er en metode, som anvendes til at påpege termiske afvigelser i en bygnings klimaskærm uden destruktive indgreb i konstruktionen. Ved termografi anvendes infrarøde stråler, som det termograferede objekt udsender, hvilket bruges til at udarbejde et visuelt billede af overfladetemperaturen. Alle genstande/bygningsdele udstråler infrarød stråling (IR-stråling); dette sker fordi de er varmere end det absolutte nulpunkt (-273,15 °C). Dermed er de egnede til termografering.

Til brug for termografering findes der i princippet to typer kameraer. Det ene anvender mellembølget IR-stråling, det andet anvender langbølget IR-stråling. Et standardtermografikamera anvender langbølget IR-stråling og opfanger, ved hjælp af infrarød stråling bidrag fra materialet, både emitteret og reflekteret.

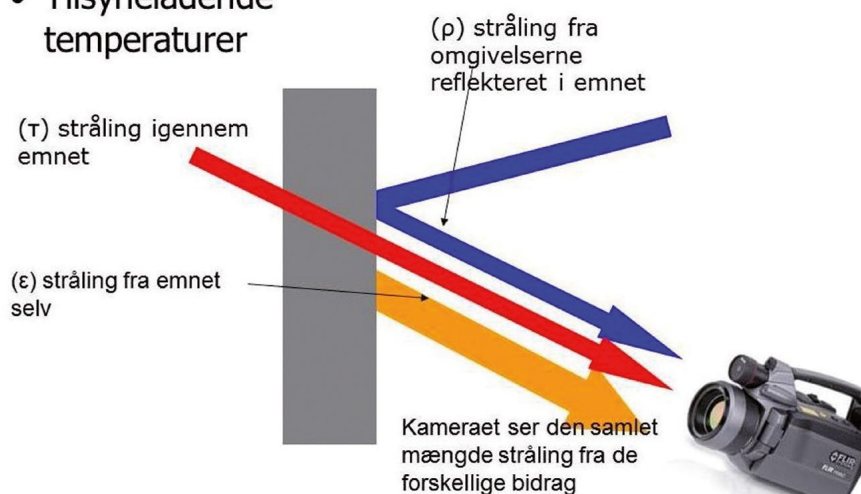
Emitteret bidrag, ϵ , er den mængde infrarød stråling, som emitteres (udsendes) af det termograferede objekt. Materialer med høj emissivitet er effektive udledere, mens materialer med lav emissivitet, som fx metaller, er dårlige ledere. Skalaen for emissivitet går fra 0 til 1. Ved bygningstermografi anbefales der at målte materials overflader har en emissivitet på mindst 0,6. For ældre bygninger opnås der derudover det bedste resultat ved minimumstemperaturdifferenser mellem ude og inde mellem 6 °C og 10 °C jf. Tabel 6.

Reflekteret bidrag, ρ , er den mængde infrarød stråling fra baggrunden, som reflekteres fra det termograferede objekt. Alle materialer har en reflektans på mellem 0,0 og 1,0. Glatte, polerede overflader har en høj reflektans, mens matte, ru overflader har en lav reflektans.

Transmitteret bidrag, τ , er den mængde infrarød stråling, som transmitteres gennem det termograferede objekt. (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

I bygninger er der relativt få materialer som har et transmitteret bidrag, og glas er et af dem. Ved bygningstermografering består bidraget derfor ofte kun af et emitteret og reflekteret bidrag. I Figur 13, ses emitteret (gul pil) og reflekteret (blå pil) bidrag.

- Tilsyneladende temperaturer



Figur 36: Emitteret (ϵ), reflekteret (ρ) og transmitteret bidrag (τ). (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

Ved bygningstermografering skal de rette vejrforhold være tilstede for at opnå et brugbart resultat. Vejrforholdene er ideale ved overskyet vejr, ligeledes skal overfladerne være tørre og fri for sne. Solskin skal undgås, idet de udvendige overflader på termograferede konstruktioner der, udsættes for solpåvirkning, vil blive opvarmet og målingen vil fremstå upræcis med en højere temperatur.

Temperaturdifferens mellem ude og inde skal være så stor som muligt for at fremhæve kuldebroer og utætheder i konstruktionerne. I Tabel 6 ses de anbefalede minimumstemperaturdifferenser (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015).

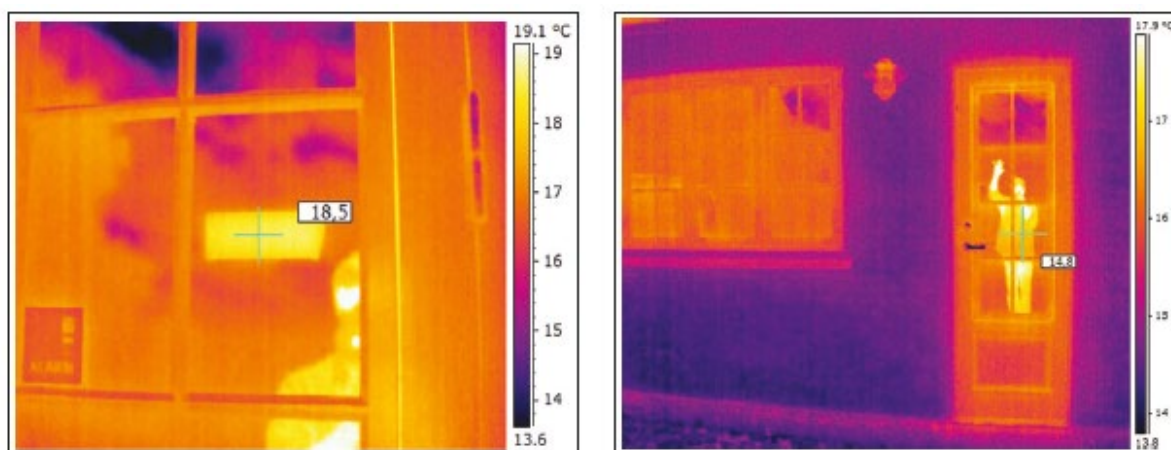
Tabel 6: Anbefalede minimumstemperaturdifferenser (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

Bygningstype	Minimum temperaturdifferens mellem ude og inde	
	Kuldebroer	Utætheder
Nye velisolerede bygninger (efter ca. år 2000)	15 °C	10 °C
Ældre bygninger (før ca. år 2000)	10 °C	6 °C

5.1.4.2. Termografering af vinduesdetaljer

Termografering af vinduesdetaljerne (ramme/karmkonstruktion og rude) viser ofte variationer i udstrålingen på overfladerne, når man kigger på termiskr billeder. Her er det vigtigt at kunne skelne mellem normale variationer forårsaget af materialeovergange, beslag, hjørnesamlinger, fuger, vinduesnicher samt overfladers forskellige emissivitet og variationer, der skyldes fejl i konstruktionerne. Fokuspunkter, der kan relatere til fejlrelaterede variationer i konstruktioner, kan være manglende tæthed mellem dampspærre og vindue/lysningspanel, manglende isolering i lysninger, utætte samlinger mellem ramme/karmkonstruktionen, nedbrudte samlinger samt mangelfuld justering af vinduer med dårligt anslag til tætningsliste/karm og utæthed til følge.

Ruder kan være svære at få et retvisende termografering af, da de har så højt et emissionstal. Figur 37 t.v. illustrerer en glasdør termograferet udefra hvor overfladetemperaturen er bestemt vha. tape med et kendt emissionstal. Tapen har siddet på glasset længe nok til at den har rudens temperatur. Overfladetemperaturen på billedet til højre er bestemt vha. en automatisk korrektion ift. termografens refleksion i glasset og er næsten 4 grader lavere, se Figur 37 t.h. Billederne illustrerer desuden, hvor store spejlinger glas kan medføre, idet operatøren ses meget tydeligt på begge billeder. (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015, s. 28)



Figur 37: Overfladetemperatur af glas bestemt ved anvendelse af tape (t.v.) og ved anvendelse af korrektion (t.h.) (Poulin, Nielsen, Due, Nøhr, & Nielsen, 2015)

5.1.4.3. Tidsperiode for termografering

I de måneder, hvor det er muligt at opnå en tilstrækkelig temperaturdifferens mellem ude og inde (november - april), er der koldere udenfor end indenfor, hvorfor varmestrømmen vil gå fra inde mod

ude. Visse kuldebroer ses tydeligt udvendig på facaden, da den er massiv. Kuldebroer som fugtsikring af soklen med stålplader ses også tydeligt.

5.1.5. Lufttemperatur

Lufttemperaturer i stuen blev målt løbende med en datalogger. Supplerende lufttemperaturer i stuen, udendørs og i hulrummet mellem facadevindue og forsatsvindue blev målt enkeltvis manuelt med et helt almindeligt termometer.

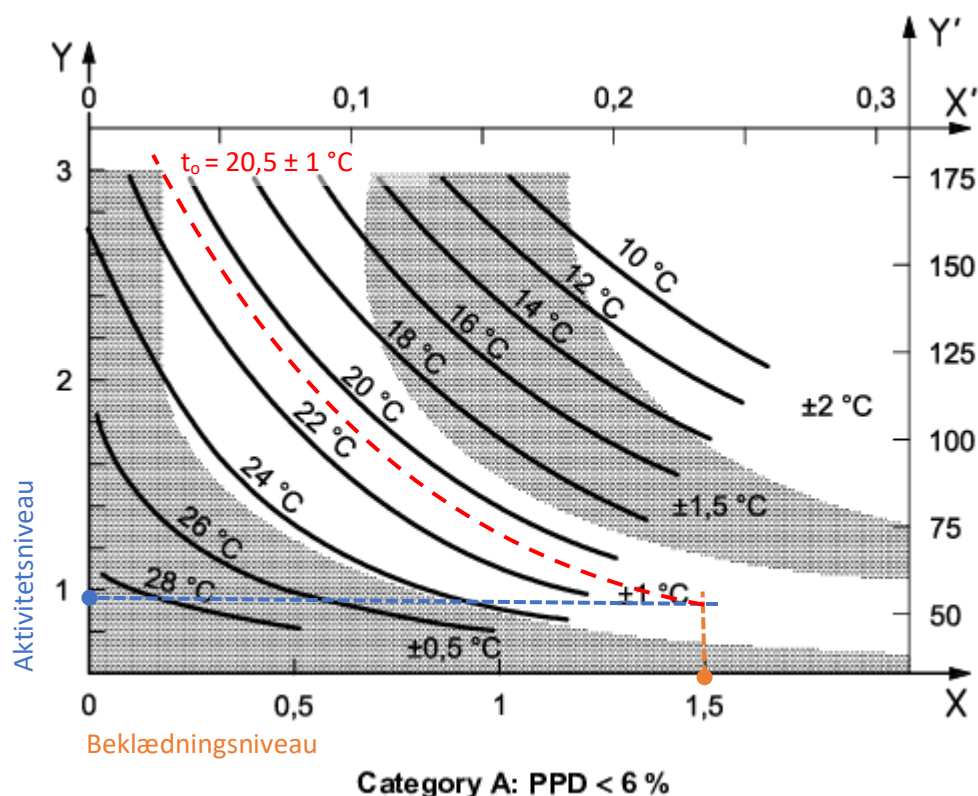
5.1.6. Operativ temperatur

Målet for operativ temperatur defineres ud fra en graf fra DS 7730, se Figur 38, (Dansk Standard, 2006, s. 14), hvor færre end 6% forventes at være utilfredse. Der er grafer for andre niveauer af utilfredshed, men grafen for det lave niveau blev valgt for at etablere det bedst mulige mål for termisk komfort.

De andre parametre som defineres, er fra vores forsøgsområde (stuen) i den kritiske årstid (vinter):

- **beklædningsniveau 1,5 (clo):** langærmet trøje, uldsweater, lange underbukser, tykke sokker, et tørklæde og et uldtæppe
- **aktivitetsniveau 1 (met):** afslappet, stillesiddende

For de parametre er den ønskede operative temperatur (t_o) for forsøgsområdet $20,5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, dvs. $19,5\text{ °C} - 21,5\text{ °C}$.



Figur 38: Operativ temperaturspændet er $20,5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, dvs. $19,5\text{ °C} - 21,5\text{ °C}$. Det er et beklædningsniveau på 1,5 og aktivitetsniveau på 1 der giver det resultat, se noter på grafen. Grafen er fra DS7730 (Dansk Standard, 2006, s. 14).

Operativtemperaturen bliver brugt som en parameter for at vurdere as-is-konditionen.

5.1.7. Middelstrålingstemperatur

Middelstrålingstemperatur er en vægtet gennemsnitstemperatur baseret på de forskellige omkringliggende overfladetemperaturer og deres geometriske relationer til målpositionen. Ideen med den er at "forenkle komplicerede strålingsforhold i et rum til en enkelt temperatur" (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 36).

For at regne **middelstrålingstemperatur** skal man:

1. definere en position i rummet (hvor man vil undersøge en persons oplevelse)
2. definere overfladetemperaturer på omkringliggende overflader, $t_1 - t_n$
3. definere vinkelforholdene mellem position og overflader, $F_{p-1} - F_{p-n}$
4. regne middelstrålingstemperatur, t_r , med denne formel:

$$t_r = F_{p-1} * t_1 + F_{p-2} * t_2 + \dots + F_{p-n} * t_n$$

Vinkelforholdet defineres fra:

- højden/længden og bredden af overfladen
- distancen fra målpositionen
- om fladen er vandret eller lodret i forhold til målpositionen

Højden/længden vægtes efter afstanden, og så bruger man en tabel for at aflæse vinkelforhold. Tabeller findes i appendiks A.01.06 i Varme- og klimateknik grundbogen (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 473-474). Se også Bilag 18: Strålingstemperaturer og asymmetri

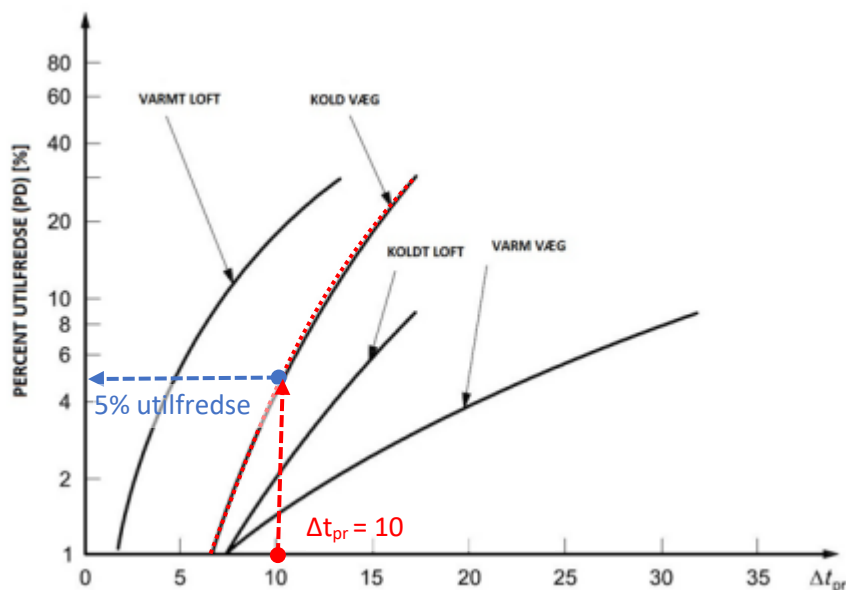
5.1.8. Strålingsasymmetri

Asymmetrien i strålingstemperaturer kan give en følelse af træk, og den er derfor vigtig at have med som parameter for evalueringen af as-is-konditioner og vurderinger af renoveringsforslag.

For at beregne **strålingstemperaturasymmetri**, skal man:

1. definere en lodret eller vandret, plan flade igennem en position i rummet (hvor man vil undersøge en persons oplevelse)
2. beregne middelstrålingstemperatur, t_{pr} for hver side af fladen (se forrige procedure)
3. trække middelstrålingstemperaturer fra hinanden, Δt_{pr}
4. plotte differencen i strålingstemperatur på hver side af fladen, Δt_{pr} , på Dansk Standards graf over strålingsasymmetrier, på kurven for 'kold væg,' se Figur 39

Strålingsasymmetri, Δt_{pr} , og procent utilfredse bruges som parameter for vurdering af termisk komfort. Generelt vil $\Delta t_{pr} < 10$ °C være acceptabelt for 95% (Dansk Standard, 2006, s. 10)



Figur 39: Værdier for strålingsasymmetri, Δt_{pr} , bliver plottet på kurven for 'kold væg' og procent utilfredse aflæses derfra. Eksempel på aflæsningen af grafen er illustreret med $\Delta t_{pr} = 10$ (Dansk Standard, 2006, s. 10)

5.2. Analyser af as-is-konstruktioner og renoveringsforslag

5.2.1. Varmetransmissionssimulering af as-is-konstruktioner i HEAT2

HEAT2 fra Blocon blev brugt til at simulere varmetransmission igennem konstruktionen. Programmet kan simulere dynamisk og statisk, men kun statiske simuleringer, med konstante randtemperaturer, blev brugt til opgaven. HEAT2-simuleringer blev brugt til at få temperaturer på rudens indvendige overflade, temperaturer på punkter i konstruktionen hvor dataloggere var placeret, og en beregnet varmestrøm igennem konstruktionen.

For at lave en retvisende varmetransmissionssimulering er der flere parametre, som skal være på plads. Der skal defineres:

1. et snit der skal simuleres på, og hvordan kan dets detaljeniveau kan forenkles
2. varmeledningsevner (λ værdi) for hvert materiale i snittet
3. ækvivalente varmeledningsevner (λ værdi) for komposit-ruder ud fra deres varmetransmissionskoefficienten (U-værdi)
4. randbetingelser for hver dele af konstruktionens omkreds (temperatur og overgangsisolans)
5. adiabatisk grænser

Projektet handler om termisk komfort, og forbedring af faktiske konditioner, så i stedet for at bruge dimensionerende temperaturer for randbetingelser, blev et gennemsnit af målte temperaturer for en periode i opvarmningsperioden defineret.

Data fra simuleringen af as-is-konstruktionen blev sammenlignet med målte data for at kontrollere opbygningen af modellen. HEAT2 blev derefter brugt til at få data på renoveringsforslagene som, kunne være en del af en overordnet vurdering af de forskellige forslag.

Overfladetemperaturer fra HEAT2-simuleringer blev brugt til at beregne middelstrålingstemperatur og strålingsasymmetri, så den parameter for termisk komfort kunne bruges til at vurdere renoveringsforslagene.

5.2.2. Estimering af transmissionstab igennem konstruktioner

Som en del af vurderingsgrundlaget for renoveringsforslag blev der regnet transmissionstab for as-is-konstruktioner og renoveringsforslag.

Varmemodstand for hvert materialelag skal først defineres ud fra følgende formel (Dansk Standard, 2020):

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

hvor

d er materialelagets tykkelse i m

λ er designvarmeledningsevnen for materialet eller produktet i W/mK

For at finde U-værdien for en hel konstruktion summeres varmemodstande for de individuelle materialelag og overgangsisolanser for indvendig og udvendig og divideres i 1, som vist i følgende formel (Dansk Standard, 2020):

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum_{i=1}^n R_i}$$

hvor

U er transmissionskoefficient for konstruktionen i W/m²K ¹

R_{si} er overgangsisolansen ved den indvendige overflade i m²K/W

R_{se} er overgangsisolansen ved den udvendige overflade i m²K/W

R_i er isolansen for de enkelte lag i m²K/W

n er antallet af lag

1. U-værdien er ikke korrigeret, ej heller er linjetab regnet med.

Varmetabet bliver derefter beregnet ved hjælp af følgende formel (Dansk Standard, 2020):

$$\phi_t = U * A (\theta_i - \theta_u)$$

hvor

ϕ_t er transmissionstabet i W

U er transmissionskoefficient for delekonstruktion i W/m²K

A er transmissionsarealet for delekonstruktion i m² ¹

θ_i er indetemperaturen i °C ²

θ_u er udetemperaturen i °C ²

1. Arealet er taget som de tre udvendige vægge for stuen.

2. Temperaturer ind og ude er for en vinterdag, ikke dimensionerende værdier, for at give en mere realistisk skala for varmetab.

As-is bliver sammenlignet med renoveringsforslag og en procentforskel bliver beregnet for at give forslagens effekt en skala.

5.2.3. Estimering af infiltrationstab fra utætheder

Som en del af vurderingsgrundlaget for renoveringsforslag, blev der også regnet ventilationstab fra utætheder for as-is og renoveringsforslag.

Følgende formel bliver brugt til det (Dansk Standard, 2020):

$$\phi_{v,i} = \rho * c * q (\theta_i - \theta_u)$$

hvor

$\phi_{v,i}$ er infiltrationstabet i W

ρ er luftens massefylde i kg/m³¹

c er luftens varmekapacitet i J/kg·K¹

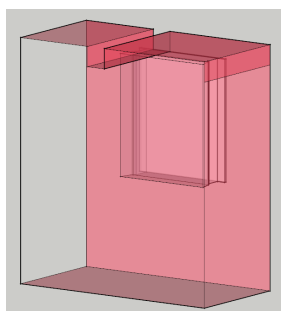
q er luftstrøm af udeluft tilført rummet i m³/s²

θ_i er indetemperaturen i °K³

θ_u er udetemperaturen i °K³

1. Prædefinerede værdier: $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$ (tør luft) og $c = 1005 \text{ J/kg·K}$ (Dansk Standard, 2020)

2. Luftstrømme (q_{50}) blev beregnet fra total luftstrømning (V_{50}) fra blower door test 01, 02 og 03. Total luftstrømme i m³/h bliver fordelt over overfladens areal af målezonen med utætheder, som kun er udvendig væg, loft og gulv, og ikke de tre vægge af testkammeret, der er bygget op med en helt tæt dampspærre, se Figur 40.



Figur 40: Areal fra målezone 02, som er en del af husets areal, er i rød.

Graden af tætheden opnået ved renoveringsforslag er antaget som 100%, da de bliver meget tæt på 100% og en antagelse af 100% tæthed forenkler beregningen.

3. Temperaturer inde og ude er for en vinterdag, ikke dimensionerende værdier, for at give en mere realistisk skala for varmetab.

As-is bliver sammenlignet med renoveringsforslag og en procentforskel bliver beregnet for at give forslagens effekt en skala.

5.2.4. Vurdering af skimmelsvamp risiko i normalkonstruktion

WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) fra Fraunhofer blev brugt til at simulere 1-dimensionel fugttransmission igennem normalkonstruktionen og at vurdere risikoen for skimmelsvampevækst. Programmet beregner varme- og fugttransport samtidig i bygningskomponenter i flere lag. Det muliggør en realistisk beregning af varme- og fugttransport i vægge og andre flerlagsbygningskomponenter udsat for naturligt vejr og brug.

Beregningen sker med varierende forhold, og medtager tidsaspektet i beregningen. Dette gør at WUFI er et godt redskab til at regne på opfugtnings- og udtørningsprocesser over længere tid.

WUFI Bio er et mere nuanceret tillægsprogram til WUFI for vurdering af risikoen for skimmelsvampevækst. Programmet bliver brugt til at vurdere risikoen for skimmelsvampevækst på overflader og i konstruktionen.

For at lave en retvisende fugttransmissionssimulering er der flere parametre, som skal være på plads. Der skal defineres:

- et snit der skal simuleres på
- materialeegenskaber bl.a.:
 - tykkelse
 - damppermeabilitet (δ værdi)
 - varmeledningsevner (λ værdi)
 - kapillarsugeevnen
- vejrdatasæt(s) for at definere udeklima
- indeklimaet

Perioden for simuleringen er 3 år som udgangspunkt, men det vigtige kriterie er, at materialerne opnår en ligevægt over perioden, uanset om perioden er 3 eller flere år. Dvs. at vandindholdet i materialerne skal opnå en harmonisk opfugtnings- og affugtningsrytme, så evt. effekter fra f.eks. indbygget byggefugt ikke har indflydelse mere.

Data fra simuleringer blev brugt til en vurdering af risikoen for skimmelsvampevækst i as-is-konstruktionen og renoveringsforslag.

5.2.5. Vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader

Risikoen for skimmelsvampevækst er et reelt emne, når konstruktionen har mange kolde indvendige overflader. For at give en idé om der kunne være en risiko for skimmelsvampevækst med as-is-konstruktioner og renoveringsforslagene for facaden og vinduer, se hhv. afsnit 6.4.3 og 7.2.5-7.3.4.3, blev HEAT2 brugt til at vurdere om indvendige overfladetemperaturer bliver kritisk lave for perioder med lave udendørstemperaturer.

Arbejdsgang for vurderingen:

- Definer kritiske udendørstemperaturer, som er den laveste døgnmiddeltemperatur for:
 - december
 - januar
 - februar
 - marts
- Definer den gennemsnitlige relative fugtighed indendørs for:
 - december
 - januar
 - februar
 - marts
- Regn kritisk overfladetemperatur for indvendige overflader
- Simuler as-is-konstruktion og renoveringsforslag i HEAT2 med de kritiske udendørstemperaturer
- Vurder overfladetemperaturer for konstruktionerne

5.2.5.1. Beregningsmetode for bestemmelse af kritiske overfladetemperaturer

Beregnings- og diagramlæsningsmetode for at bestemme den kritiske overfladetemperatur for skimmelsvampevækst følger (Brandt & m.fl., SBI anvisning 224: Fugt i Bygninger, 2019).

Betegnelser brugt i formlerne og diagrammet er følgende:

p = damptryk (Pa)

φ = relativ fugtighed (%)

θ = temperatur (°C)

v = vandindhold (g/m³luft)

En temperatur har et bestemt mætningsdamptryk som beregnes med følgende formel:

$$p_m = 610,5e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}} \quad \text{for } \theta > 0^\circ\text{C}$$

Efter man har beregnet mætningsdamptrykket, skal man gange den værdi med relativ fugtighed målt i stuen (døgnmiddel for relativ fugtighed) for at finde det aktuelle damptryk i stuen.

$$p_{inde} = p_m * \varphi_{inde}$$

Nu skal man finde mætningsdamptrykket hvor relativ fugtighed vil være kritisk:

$$p_{m \text{ for } \varphi_{kritisk}} = \frac{p_{inde}}{\varphi_{kritisk}}$$

Relative fugtigheder over 75% betragtes generelt som favorable for skimmelsvampevækst, hvis andre konditioner (temperatur, næring og tid) også er favorable.

Nu skal man finde den kritiske overfladetemperatur:

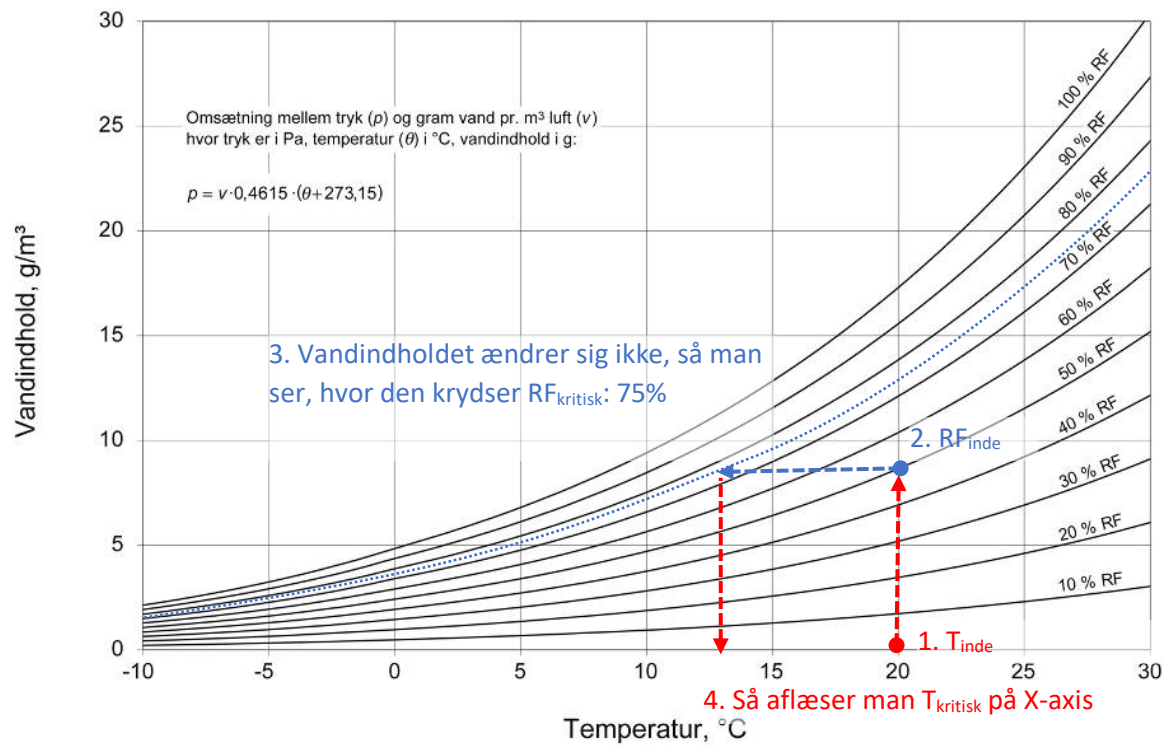
$$\theta_{kritisk} = \frac{237,3 \ln\left(\frac{p_{m \text{ for } \varphi_{kritisk}}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{m \text{ for } \varphi_{kritisk}}}{610,5}\right)} \quad \text{for } p_{m \text{ for } \varphi_{kritisk}} \geq 610,5 \text{ Pa}$$

Hvis nogle af de indvendige overflader er køligere end $\theta_{kritisk}$ og de andre betingelser (tid og næringsstoffer) er til stede, er der risiko for skimmelsvampevækst.

Man kan også få samme resultater på en mere visuel måde via brug af vanddampsdiagrammet, se Figur 41. Hvis man har en målt eller beregnet temperatur og relativ fugtighed, bruger man diagrammet for at finde den kritiske overfladetemperatur således:

1. Plot temperaturen (T_{inde}) på x-aksen.
2. Tegn en linje fra temperaturen (T_{inde}) lodret op til den krydser relativ fugtighed (RF_{inde}) for den pågældende temperatur.
3. Tegn en linje fra relativ fugtighed (RF_{inde}) vandret til venstre til den krydser kurven for relativ fugtighed 75% ($RF_{kritisk}$).
4. Tegn en linje fra den kritiske relativ fugtighed ($RF_{kritisk}$) lodret ned til den krydser x-aksen og aflæs den kritiske temperatur her ($T_{kritisk}$)

Vanddampdiagram



Figur 41: Damptryksdiagram for bestemmelse af kritiske overfladetemperaturer for skimmelsvampevækst på de indvendige overflader. (Brandt & m.fl., SBI anvisning 224: Fugt i Bygninger, 2019) Eksempel på brug af diagrammet er for $20^{\circ}C$ og 50% relativ fugtighed.

6. Resultater: As-is-konstruktion

6.1. Nuværende konstruktioner

6.1.1. Ydervægge

Ydervægge er fuldmurede 1-stensvægge med indvendig efterisolering. De er kalket udvendigt, og indvendig side er pudset.

Tæthedsplanet, som er defineret som den del af klimaskærmen, der sikrer bygningens lufttæthed, blev forsøgt etableret som en del af forsatsvæggen, som blev monteret på indvendige side af bygningens ydervægge ved renoveringen i 1980'erne. I ydervæggene er tæthedsplanet etableret med alu-kraft og en 12 mm spånplade og mod taget med 0,2 mm PE-folie monteret direkte på undersiden af spærrene.

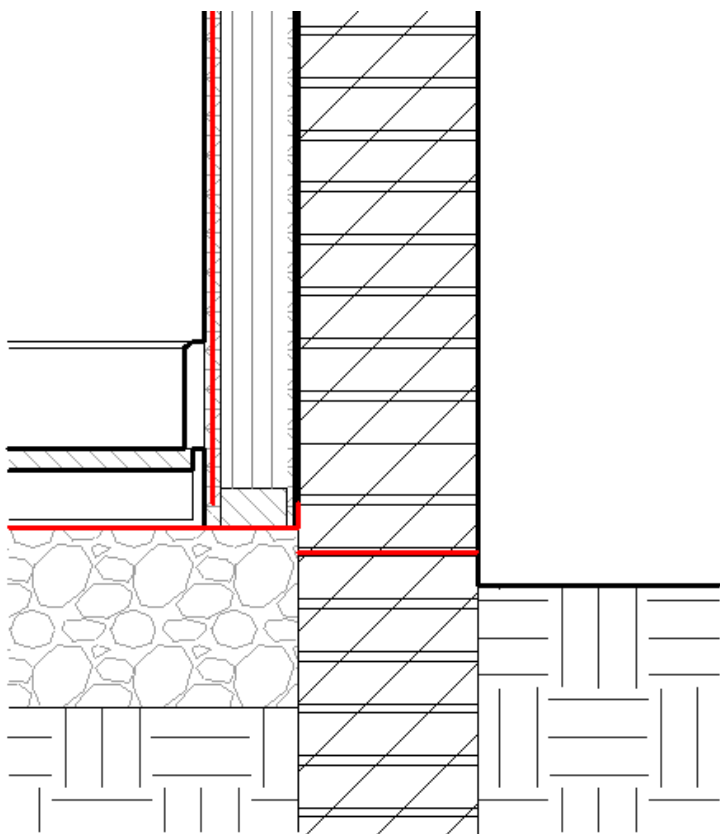
Vægkonstruktion er opbygget (udefra og ind) af, se Figur 42 og Figur 43:

- Kalklag (renoveret i 2005)
- Røde blødstrøgne teglsten (fra 1890)
- Mørtelopmuring med kalkmørtel (fugerne)
- Pudslag
- Indvendig forsatsvæg (fra 1986) opbygget som:
 - 45 x 95 termolægter og 9,5 cm Rockwool A batts.
 - Alu-kraft (dampspærre)
 - 12 mm spånplade
 - maling, diffusionsåben

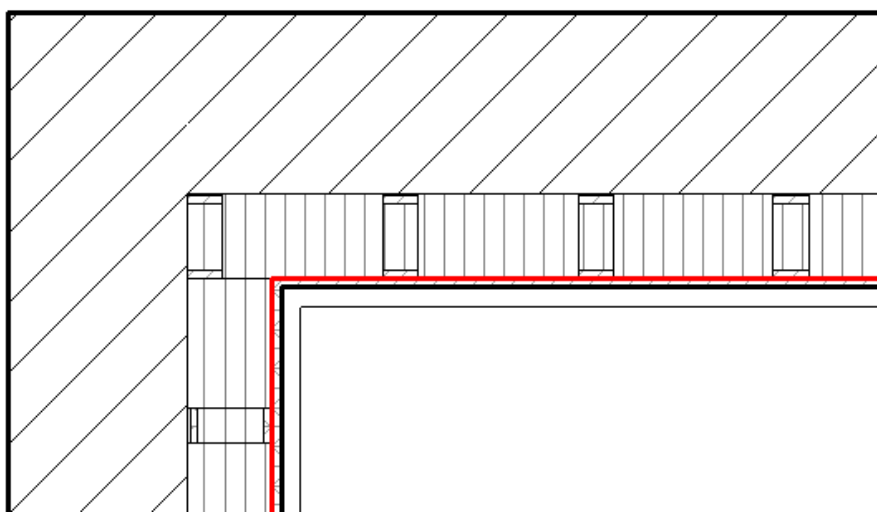
Fundament/sokkel er 150 mm høj.

I første liggefuge over terræn er der etableret stålplade som fungerer som en horisontal fugtspærre.

Udvendig langs soklen er der udlagt 75 cm piksten på langsiderne og 50 cm på gavlside.



Figur 42: Lodret snit af knudepunkt for fundament/ydervæg/terrændæk. De røde linjer indikerer fugt- og dampspærre.



Figur 43: Vandret snit af ydervægskonstruktionen. Den røde linje indikerer position af dampspærre.

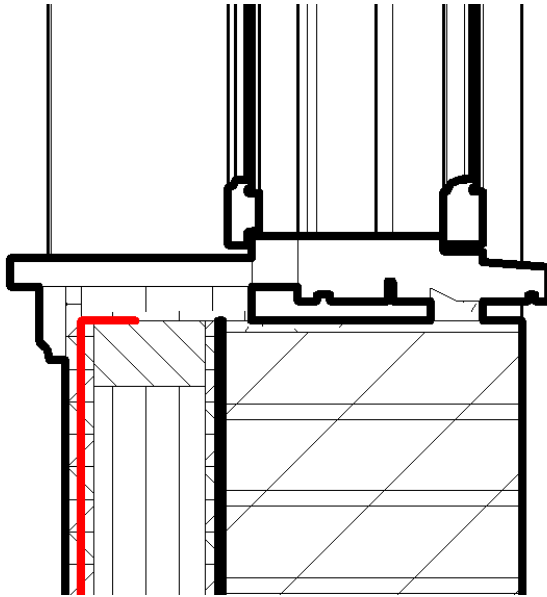
6.1.2. Lysning/vindue

Lysningen er udført i 25 mm spånplade der er malet med panelmaling.

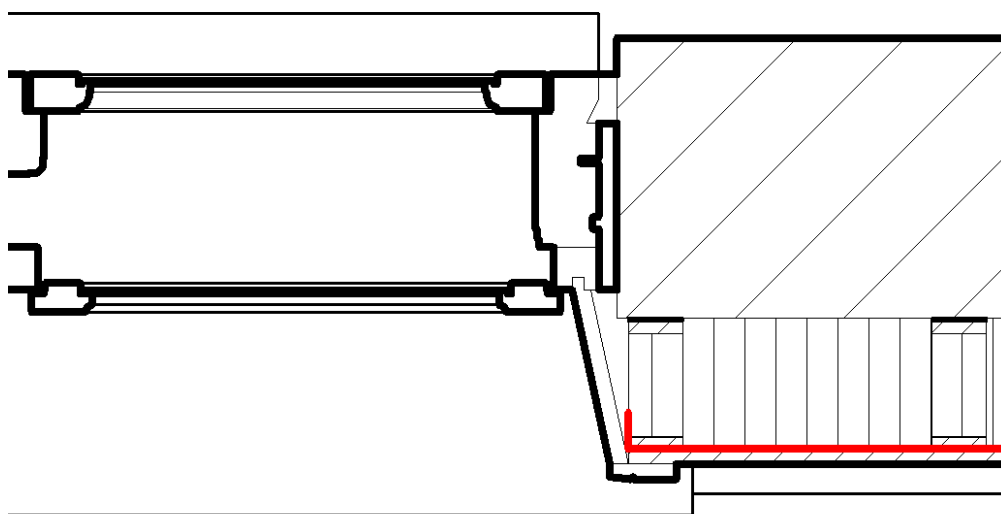
Vinduet er et ældre kitfalsvindue, med enkeltlagsglas. Indvendig er der monteret en forsatsløsning med enkeltlagsglas. På badeværelset er der dog en koblet løsning. Glasset udvendig er trukket glas.

Fugerne er udført som kalfatringsfuger med tjæret værk som bagstop.

Hulrummet bag lysningen er isoleret med bagstop af mineraluld men hulrummet bag vindueskarmen er ikke isoleret. Dampspærren (Alu-kraft) afsluttes ved termolægter og vinduesfals er lavet uden dampspærre, se Figur 44 og Figur 45.



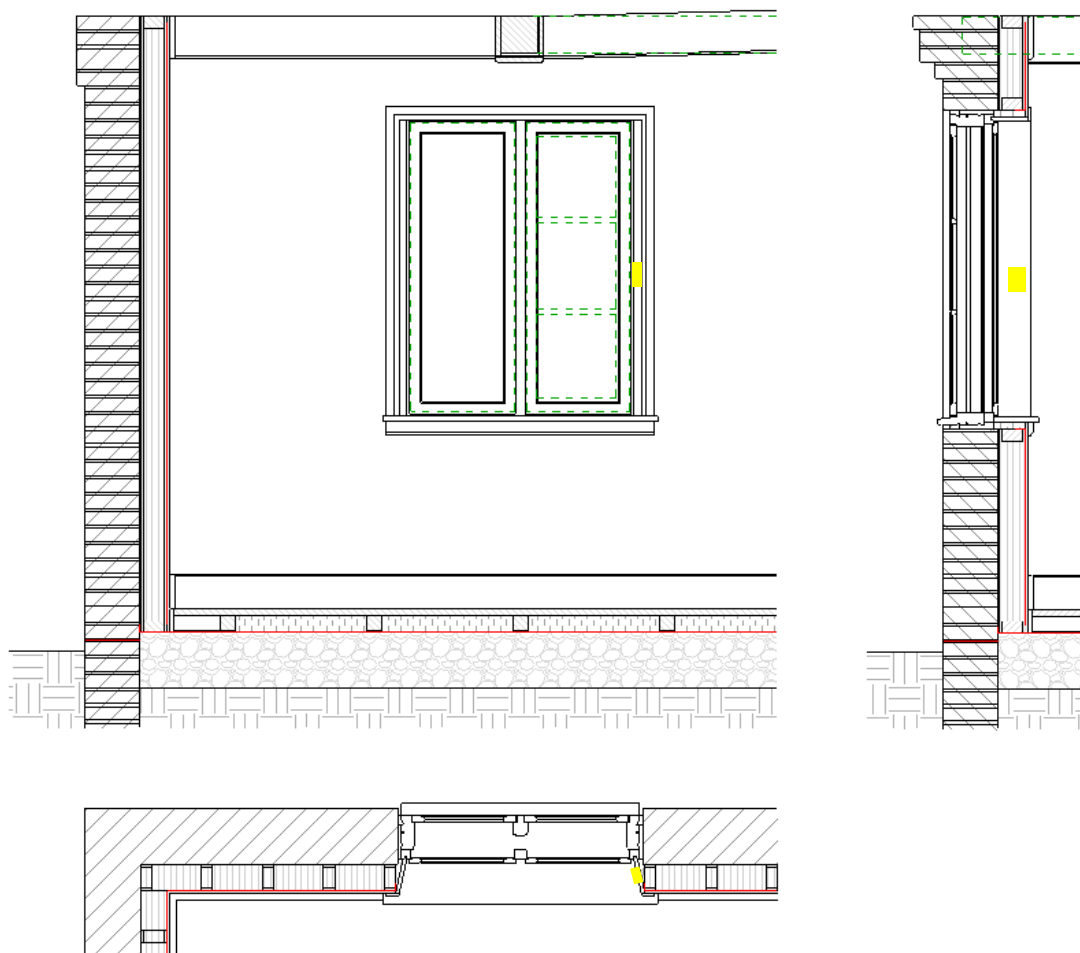
Figur 44: Lodret snit af vinduesfals/lysningen.



Figur 45: Vandret snit af vinduesfals/lysningen.

6.1.3. Lysning, via destruktiv undersøgelse

Et 6,5 cm bredt x 9 cm højt hul blev skåret i lysningen for at undersøge konstruktionen bag. Hullets position er midt på lysningen og 60 cm over vinduesplade, se Figur 46.



Figur 46: Opstalt, lodret snit og vandret snit viser positionen for hullet i lysningen med en gul plet.

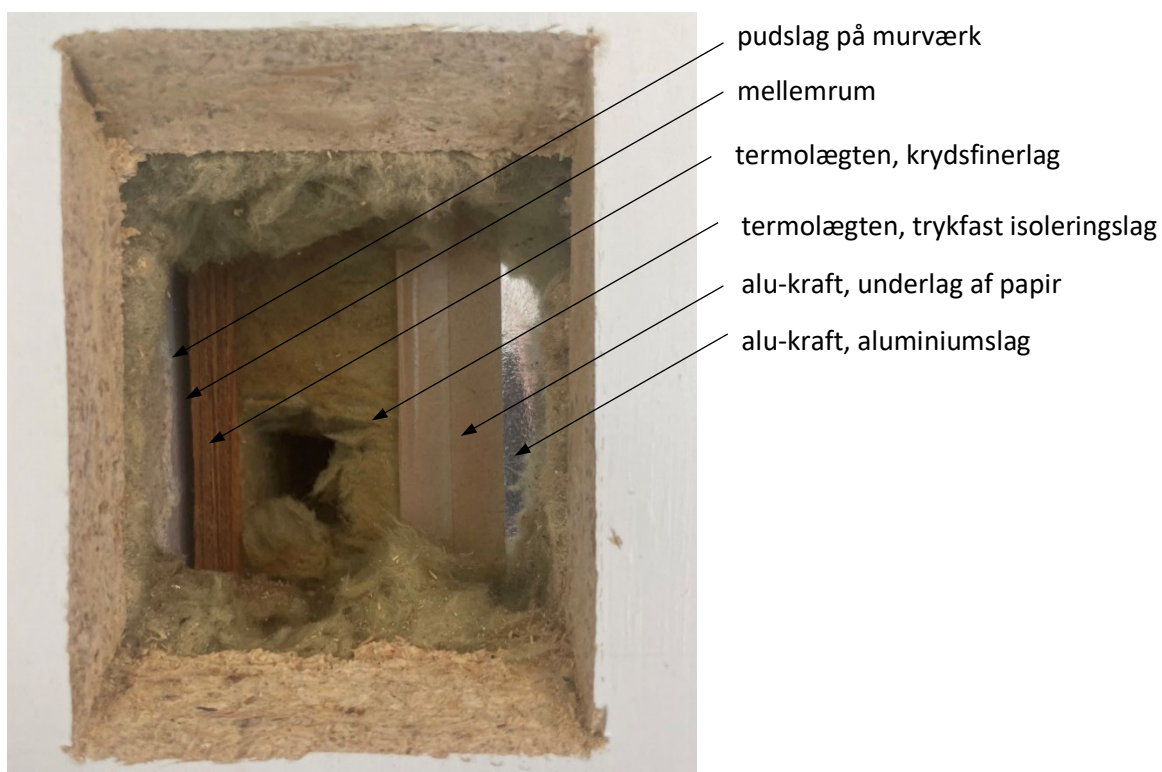
Da vi kunne kigge ind bag lysningen, kunne vi konstatere, at der ikke var tegn på skimmelsvampevækst i konstruktionen der. Det var tørt og lugtede ikke.

Vi kunne se mineraluld bag lysningen, se Figur 47 t.v., så der er lidt isolering bag lysningen. Da vi tog mineralulden ud, kunne vi se at murværket har et pudslag, men ikke tegn på tapet, se Figur 47 t.h. Hullet for dataloggeren bag vindueskarm er på samme højde, så vi brugte en lommelygte i det hul for at se om der var isolering bag karmen. Det var der ikke; hulrummet bag vindueskarmen er bare åbent.



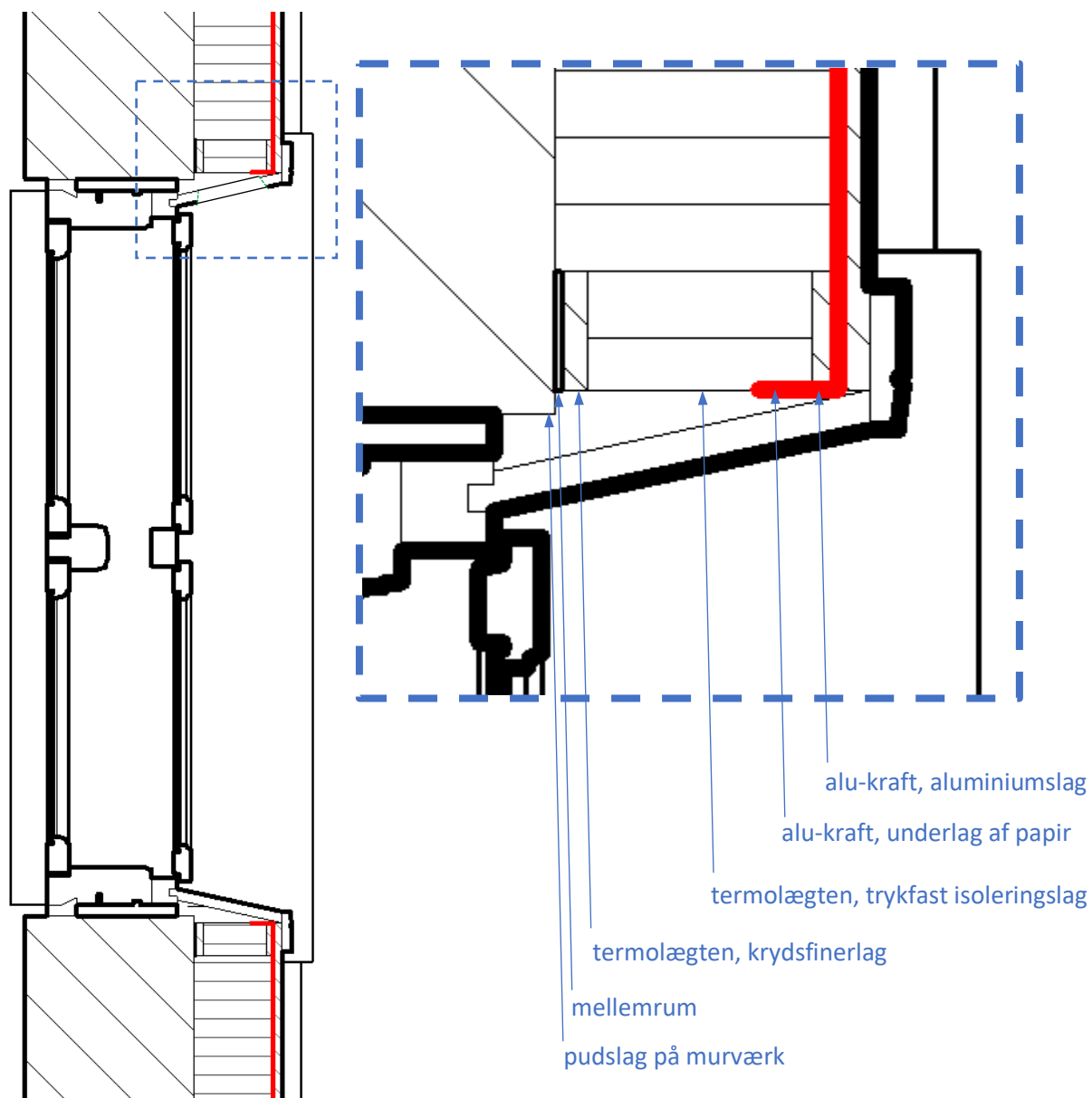
Figur 47: Hullet i lysningen hvor man kan se mineraluld, t.v., og murværk med forsatsvæg, t.h.

I Figur 48, kunne vi også se stolpeskelettet, som er bygget af termolægter, med et lille mellemrum mellem sit krydsfinerlag og pudslaget. En termolægte er en stolpe lavet af trykfast isolering med krydsfiner på kortsiderne. Mellemrummet mellem termolægten og væggen er nok pga. ujævnheder i væggen. Dampspærren, som er udført i alu-kraft, kunne også ses, se Figur 48. Den slutter midt på termolægten og er ikke ført ud til indvendig side af vindueskarm. Se også Figur 49.



Figur 48: Hullet i lysningen hvor man kan se, fra venstre til højre. Se også Figur 49

- murværket med pudslag
- et lille luftrum
- termolægten krydsfinerlag
- termolægten trykfast isoleringslag (med et hul i midten, da vi skulle pille ved den...)
- Alu-kraft (dampspærre) som slutter midt i termolægten.



Figur 49: Skitser for at tydeliggøre væggenes konstruktionslag, som ses i Figur 48.

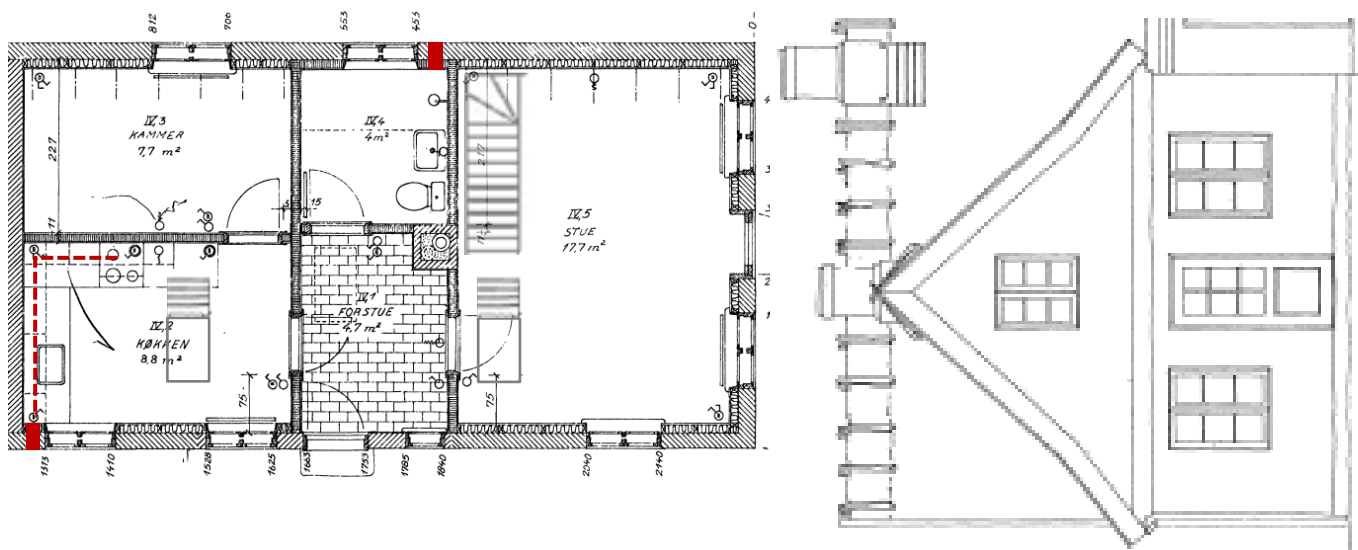
6.2. Ventilationsforhold

Boligen er ventileret med naturlig ventilation. Der er to ventiler i boligen: en i badeværelset og en anden i køkkenet, se Figur 50 - Figur 51. De er begge firkantede, 13x13 cm, med slidsede åbninger udvendig, se Figur 50. I badeværelset er der tilkoblet en fugtniveaustyret udsugningsventilator, og i køkkenet fører emhætten sit udsug gennem fleksible plastikrør fra emhætten til ventilen.

Boligen har en første sal med åben forbindelse til stuen og ovenlysvinduer, så luftstrømme fra stueetagen til første sal kan forventes.



Figur 50: Placering og udformning af ventilerne i boligens ydervæg. Ventilen til venstre er til køkkenet, til højre er ventilen til badeværelset.



Figur 51: Gammel Lundtoftevej 34C. Tegning med placering af ventiler.

Da ventilationsåbninger er knyttet til udsugning fra køkkenet og badeværelset, er den eneste reelle form for ventilation åbning af vinduer og døre. Ifølge en vejledende tekst for enfamilieshus i BR18, Ventilation (§ 420 - § 452) stk. 1.6. anbefales: Oplukkeligt vindue, lem eller yderdør og en eller flere udeluftventiler med en samlet fri åbning på mindst 60 cm² pr. 25 m² gulvareal.

Huset er omkring 54 m² på stueetagen og 20 m² på første sal, så der burde være et samlet frit åbningsareal på 180 cm². Med 8 oplukkelige vinduer, 2 døre og 2 ovenlysvinduer, er huset godt dækket ind, men det skal siges, at det påhviler beboerne at åbne dem jævnlige for at opnå det anbefalede luftskift på 0,5/h.

6.3. Infiltration

For at måle infiltration i as-is-konstruktion og begynde at komme frem til hvilke bygningsdele der bidrager til den og hvor meget, blev tre blower door tests udført som beskrevet i metodeafsnit 5.1.1, Tabel 4 og Figur 30 - Figur 32.

6.3.1. Mængde og fordeling

For at teste tætheden af de nuværende konstruktioner, blev der lavet en serie blower door tests, se Tabel 7. Se også: Bilag 6: Blower door test 01, Bilag 7: Blower door test 02, og Bilag 8: Blower door test 03, som er rapporter med de komplette resultater.

Der er ikke krav omkring utilsigtede utætheder for renoveringer i bygningsreglement. For nybyg er maksimumniveau for utilsigtet infiltration ifølge BR18 (kap. 11 §263) 1,0 l/sec·m² opvarmet etageareal, når der foretages en trykprøvning med 50 Pa. Erfaringer siger, at huse, der ligner Fogedgården i type og alder, har et niveau mellem 4,9-8,3 l/sec·m² (Jakob Jensen, 2023).

Tabel 7: Oversigt over blower door test-resultater. Test for målzone 01 kunne ikke gennemføres, da udstyret hverken kunne skabe et stabilt over- eller undertryk. Test for målzone 02 kunne gennemføres for det meste, men lige for test 03, af kammeret, med vindueskonstruktionen blændet, kunne der ikke skabes et stabilt overtryk.

Målzone	Test	Konditioner for test	Infiltration, gennemsnit ¹ (l/sec·m ² gulvareal)	Infiltration, overtryk ¹ (l/sec·m ² gulvareal)	Infiltration, undertryk ¹ (l/sec·m ² gulvareal)
			Luftskift, 50 Pa (1/h)	Luftskift, 50 Pa (1/h)	Luftskift, 50 Pa (1/h)
Reference-værdi		BR18 (for nybyggeri)	1,0		
			0,5		
Reference-værdi		Interview (Jysk Trykprøvning A/S ⁴)	4,9 - 8,3		
01	A	Dør, forsatsvindue og facadevindue lukkede	Ikke målbar ²	Ikke målbar ²	Ikke målbar ²
02	01	Forsatsvindue og facadevindue lukkede	9,9	5,7	13,9
			14,6	8,7	20,5
02	02	Forsatsvindue åbent, facadevindue lukket	12,1	13,2	10,9
			17,8	19,5	16,1
02	03	Vindueskonstruktion blændet	Ikke målbar ³	Ikke målbar ³	7,1
					10,5

1. Resultater for infiltration blev omregnet fra enheder: m³/h·m² gulvareal til enheder: l/sec·m² gulvareal så de kunne sammenlignes med kravet for nybyggeri i Bygningsreglement. Regnestykket ser sådan ud: X m³/h·m² gulvareal · 1000 l/m³ · 1 h/3600 sec = X l/sec·m² gulvareal

2. Blower door test-udstyr kunne ikke opnå en stabil trykforskel.

3. Blower door test-udstyr kunne ikke måle ved overtryk, fordi trykforskellen var for lille.

4. Fra et interview med Jakob Jensen fra Jysk Trykprøvning A/S (Jakob Jensen, 2023).

Resultatet for test 01, med forsatsvindue og facadevindue lukkede, er 9,9 l/sec·m² gulvareal som er næsten 10 gange højere end det acceptable niveau for nybyg som er 1,0 l/sec·m² gulvareal, se Tabel 7.

Resultater for test 02, med forsatsvindue åbent og facadevindue lukket, er 12,1 l/sec·m² gulvareal.

Resultatet for test 03, med vindueskonstruktion blændet, er ukomplet. Udstyret kunne kun måle ved undertryk men ikke overtryk, da kammeret var så tæt ved overtryk at, der intet kunne måles, se Tabel 7. Derfor er der ikke en gennemsnitsværdi, som kan sammenlignes med de andre tests.

For at finde frem til mængdefordelingen af infiltration per bygningsdele, sammenlignede vi resultaterne for de forskellige tests ved undertryk fra Tabel 7. Vi tager udgangspunkt i undertryksresultater både fordi de udgør det eneste komplette datasæt, men også fordi undertryk tilnærmer sig de normale konditioner i huset mere end overtryk gør. Det er fordi, at når den varme luft stiger opad og ud (exfiltration), skaber den et relativt undertryk.

For at konstatere hvilke procentdele af den samlede mængde infiltration **vindueskonstruktionen** (lysningen og vinduer) giver regner vi sådan: (se Tabel 8 for de samlede resultater)

$$\text{Infiltration}_{\text{med begge vinduer lukket}} - \text{Infiltration}_{\text{med vindueskonstruktion blændet}} = \text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}}$$
$$13,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} - 7,1 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} = 6,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal}$$

For procentdel regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}} / \text{Infiltration}_{\text{med begge vinduer lukket}} = \text{Procent infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}}$$
$$6,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} / 13,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} = \mathbf{49\% \text{ af total infiltration}}$$

For at konstatere, hvilke procentdele af den samlede mængde infiltration **øvrige bygningsdele** udover vindueskonstruktionen giver, regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{med begge vinduer lukket}} - \text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktion}} = \text{Infiltration}_{\text{for øvrige bygningsdele}}$$
$$13,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} - 6,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} = 7,1 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal}$$

For procentdel regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{for øvrige bygningsdele}} / \text{Infiltration}_{\text{med begge vinduer lukket}} = \text{Procent infiltration}_{\text{for øvrige bygningsdele}}$$
$$7,1 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} / 13,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} = \mathbf{51\% \text{ af total infiltration}}$$

For at konstatere, hvilke procentdele af den infiltration fra vindueskonstruktionen **forsatsvinduet** giver, regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}} - (\text{Infiltration}_{\text{med begge vinduer lukket}} - \text{Infiltration}_{\text{med forsatsvindue åben}}) =$$
$$\text{Infiltration}_{\text{for forsatsvinduet}}$$
$$6,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} - (13,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} - 10,9 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal}) = 3,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal}$$

For procentdel for forsatsvindue relativ til hele vindueskonstruktion regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{for forsatsvinduet}} / \text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}} = \text{Procent infiltration}_{\text{for forsatsvindue}}$$
$$3,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} / 6,8 \text{ l/sec} \cdot \text{m}^2 \text{ gulvareal} = \mathbf{56\% \text{ af vinduekonstruktionens infiltration}}$$

For at konstatere, hvilke procentdele af den infiltration fra vindueskonstruktionen **lysningen** giver, regner vi sådan:

$$\text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}} - \text{Infiltration}_{\text{for forsatsvindue}} = \text{Infiltration}_{\text{for lysningen}}$$

$$6,8 \text{ l/sec}\cdot\text{m}^2 \text{ gulvareal} - 3,8 \text{ l/sec}\cdot\text{m}^2 \text{ gulvareal} = 3,0 \text{ l/sec}\cdot\text{m}^2 \text{ gulvareal}$$

For procentdel for lysningen relativ til hele vindueskonstruktion regner vi sådan:

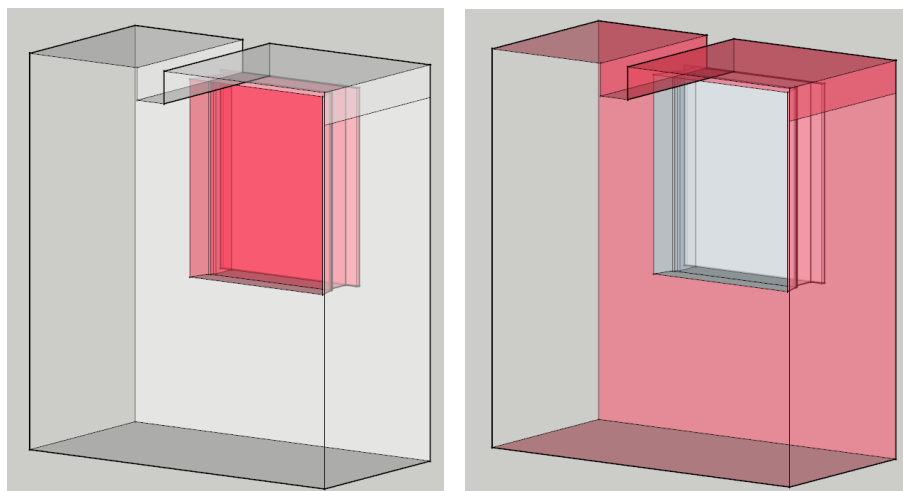
$$\text{Infiltration}_{\text{for lysningen}} / \text{Infiltration}_{\text{for vindueskonstruktionen}} = \text{Procent infiltration}_{\text{for lysningen}}$$

$$3,0 \text{ l/sec}\cdot\text{m}^2 \text{ gulvareal} / 6,8 \text{ l/sec}\cdot\text{m}^2 \text{ gulvareal} = \mathbf{44\%} \text{ af vindueskonstruktionens infiltration}$$

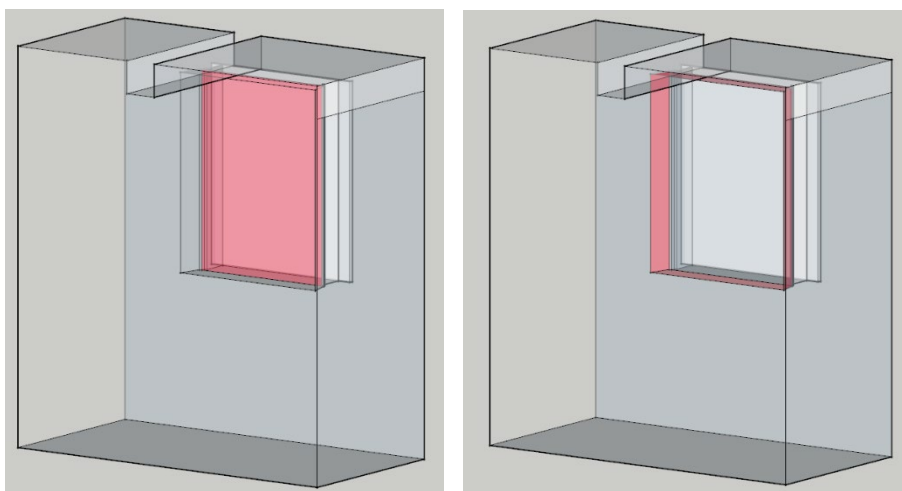
Tabel 8: Bidrag til infiltration per bygningsdel.

Bygningsdel	Infiltration, målt ved undertryk (l/sec·m ² gulvareal)	Procentandel (regnet på undertryksværdier)
Total for målområde 02	13,9	100
Vindueskonstruktion (Lysninger og forsatsvinduer)	6,8	49
Øvrige bygningsdele	7,1	51
Total for vindueskonstruktion	6,8	100
Forsatsvindue	3,8	56
Lysningen	3,0	44

Relative arealer for infiltration vises i Figur 52 og Figur 53.



Figur 52: Arealer som bidrager til infiltration. Vindueskonstruktionen t.v. bidrager med 49% og øvrige bygningsdele t.h. bidrager med 51%.



Figur 53: Arealer som bidrager til infiltration. Forsatsvindue t.v. bidrager med 56% og lysningen t.h. bidrager med 44%.

6.3.2. Lokalisering af infiltrationskilder

Termografering i sammenhæng med blower door test på kolde dage gør utætheder meget synlige. Det er fordi, undertrykket under testen trækker den kolde luft udefra ind igennem alle utætheder. Når den kolde luft kommer ind, bliver overfladerne omkring utæthederne meget koldere end de øvrige overflader.

I Figur 54- Figur 59 ser man utætheder, der hvor der er lilla/blålig farve, se skalaen ved figuren.



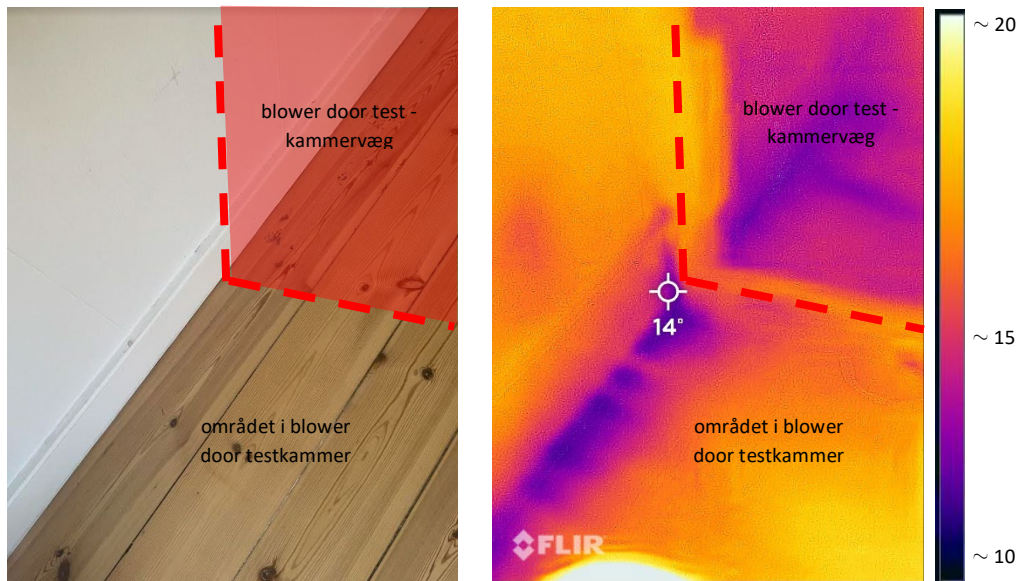
Figur 54: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk billede, t.h. Termograferinger ved undertrykdelen af blower door test på en kold dag afslører utætheder. Utætheder mellem forsatsruden og -rammen og evt. mellem forsatsrammen og lysningen blev synlige her.



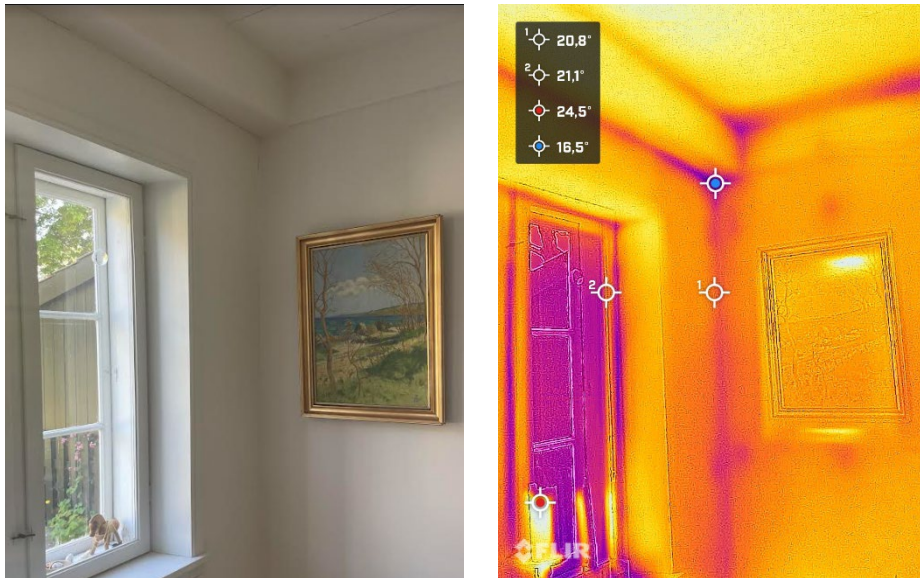
Figur 55: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk, t.h. Termograferinger ved undertrykdelen af blower door test på en kold dag afslører utætheder. Utætheder mellem forsatsruden og -rammen og evt. mellem forsatsrammen og lysningen blev synlige her.



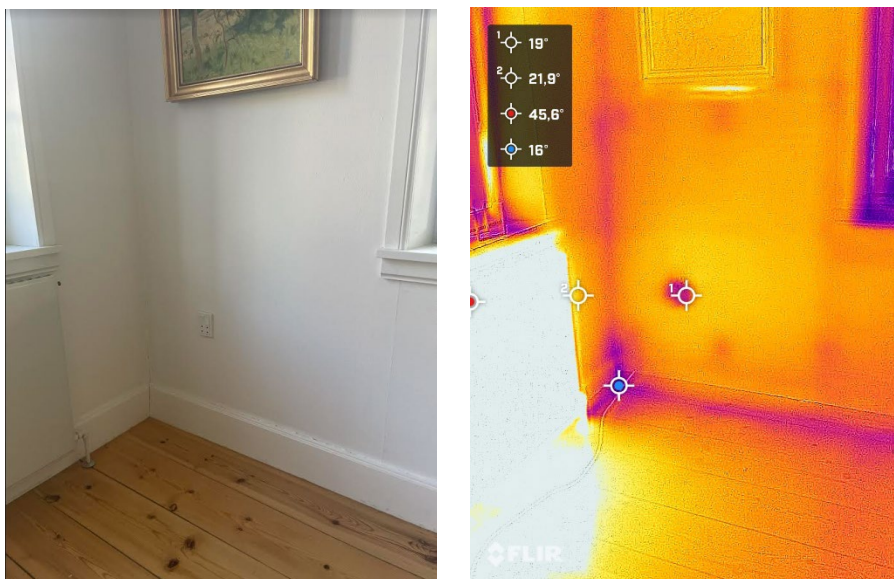
Figur 56: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk billede, t.h. Termograferinger ved undertrykdelen af blower door test på en kold dag afslører utætheder, her ved bjælkeenden.



Figur 57: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk billede, t.h. Utætheder langs fodpaneler ses især godt ved undertrykdel af blower door test.



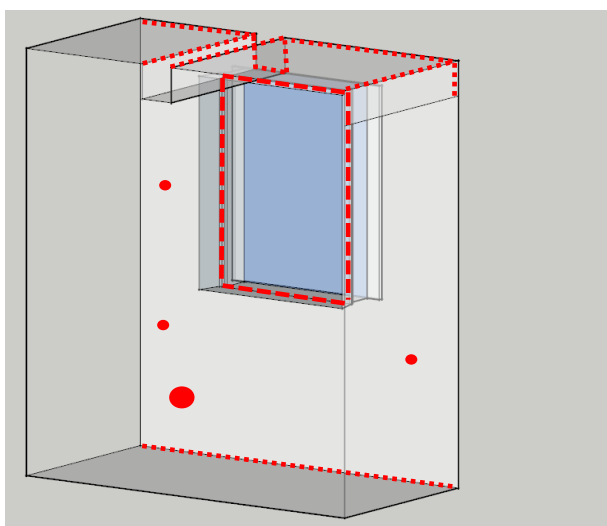
Figur 58: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk billede, t.h. Termograferinger uden undertryk på en kold dag afslører også utætheder og kuldebroer. Her kan man tydelig se utætheder ved en bjælkeende, en geometrisk kuldebro ved hjørnet og systematiske kuldebroer fra fastgørelsen af forsatsvæggens stolpelag (termolægterne).



Figur 59: Et almindeligt billede, t.v. og et termografisk billede, t.h. Termograferinger uden undertryk på en kold dag afslører også utætheder og kuldebroer. Her kan man se utætheder omkring en stikkontakt, tegn på utætheder langs fodpanelet, en geometriske kuldebro i hjørnet, systematiske kuldebroer fra fastgørelsen af forsatsvæggens stolpelag (termolægterne) og konvektive kuldebroer langs dem.

Utætheder var koncentreret fire steder, se Figur 60:

- Omkring vinduet, se også Figur 54 og Figur 55
- Samlingen ved bjælkelagets gennemførsel og langs samlingen ved tagfoden, se også Figur 56
- Samlingen ved fodpanelerne, ved soklen, Figur 57
- Utætheder i dampspærre, se også Figur 58 og Figur 59
 - omkring stikkontakter
 - ved fastgørelse af termolægterne med karmskruer i eksisterende murværk



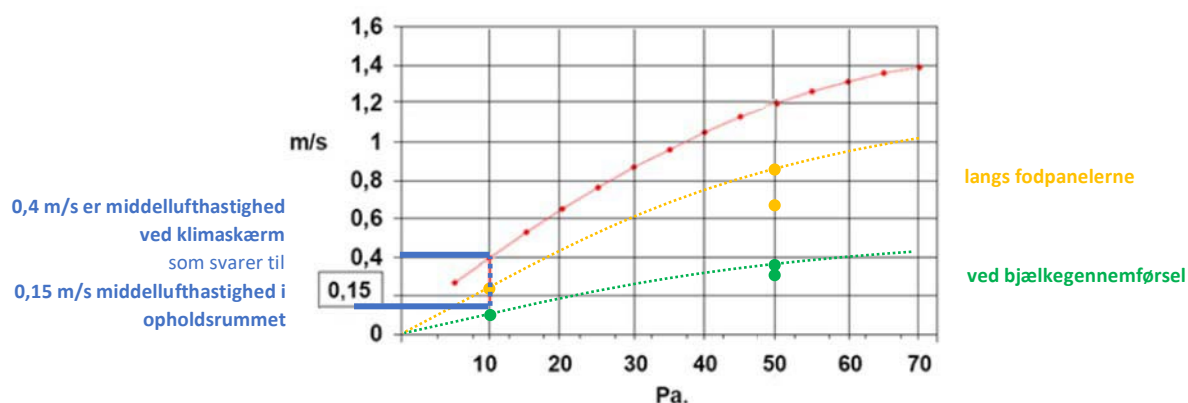
Figur 60: Diagram der viser generelt hvor utæthederne blev registreret.

6.3.3. Lokale strømningshastigheder

Lokale lufthastigheder blev målt, hvor termografien afslørede utætheder:

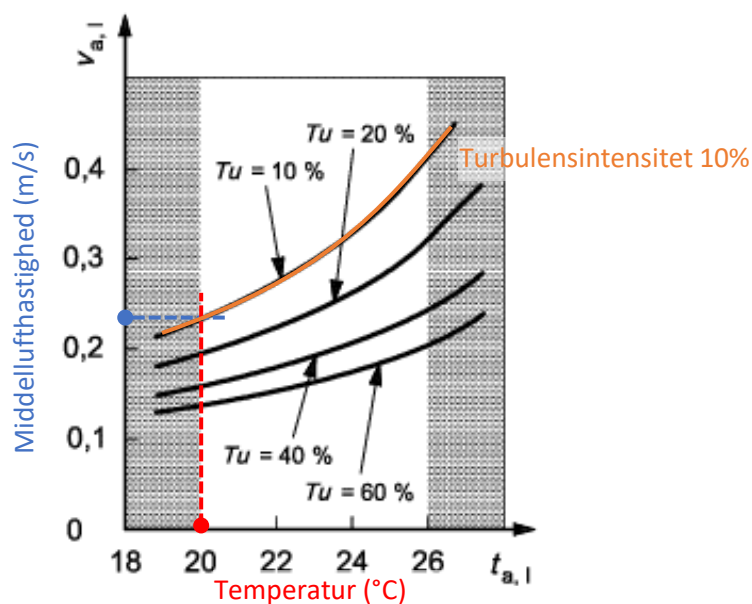
- samlingen mellem tagfod og væg / bjælkeender
- samlingen langs fodpanelerne ved soklen

Målinger blev lavet ved undertryk på 50 Pa og er mellem 0,85 m/s og 0,24 m/s, se Figur 61. Når man omregner de værdier til undertryk på 10 Pa, får man 0,22 m/s, som er under 0,4 m/s. 0,4 m/s er værdien ved klimaskærmen, der giver en ækvivalent middellufthastighed i opholdsrummet på 0,15 m/s. Det vil sige, at lufthastigheder målt ved fodpanelerne og bjælkegennemførsel har marginal betydning hvad angår middelluftshastigheden i opholdsrummet. Det sagt, kunne de stadig have stor indflydelse på turbulensintensiteten, som, hvis for høj, også bidrager til termisk ubehag.



Figur 61: Lokale lufthastigheder målt ved fodpanelerne (orange) og bjælkegennemførsel (grønne) mærkes som voldsomme ved 50 Pa, når man er helt tæt på. Selvom de ikke er over 1,2 m/s, kan de stadig bidrage til turbulensintensiteten i rummet hvilket giver lokalt ubehag. Kurven er fra Vejledning i bygningstermografi (Hansen, Kjerulf-Jensen, & Stampe, 2013, s. 52).

Når værdien for middelluftshastighed (0,22 m/s) plottes ind i modellen for trækvurderingen, kan vi se at turbulensintensiteten ikke skal være ret høj (10%) før flere end 20% vil være utilfredse.



Figur 62: Grafen for 20% Utilfredse. Den viser relationen mellem lufttemperatur (°C), middelluftstrømningshastighed (m/s) og Turbulensintensiteten (%). For en temperatur på 20 °C og middelluftshastighed 0,22 m/s skal turbulensintensiteten kun være over 10% før flere end 20% vil være utilfredse.

Det er svært at konkludere noget fra målingerne, da der er så meget usikkerhed i metoden, men det giver et godt overblik over de forskellige faktorer, der er på spil, når man skal vurdere trækgener fra konvektion.

6.4. Risiko for skimmelsvampevækst

Risikoen for skimmelsvampevækst i as-is-konstruktion er blevet vurderet på forskellige måder med følgende formål: at krydstjekke simuleringer op mod målte data, at bruge simuleringsprogrammer til det de kan, og for at tjekke simuleringer op mod hinanden. Resultater for risikovurderinger for skimmelsvampevækst er opdelt efter analysemetode, med en opsamling af alle resultater til sidst i afsnit 6.4.4.

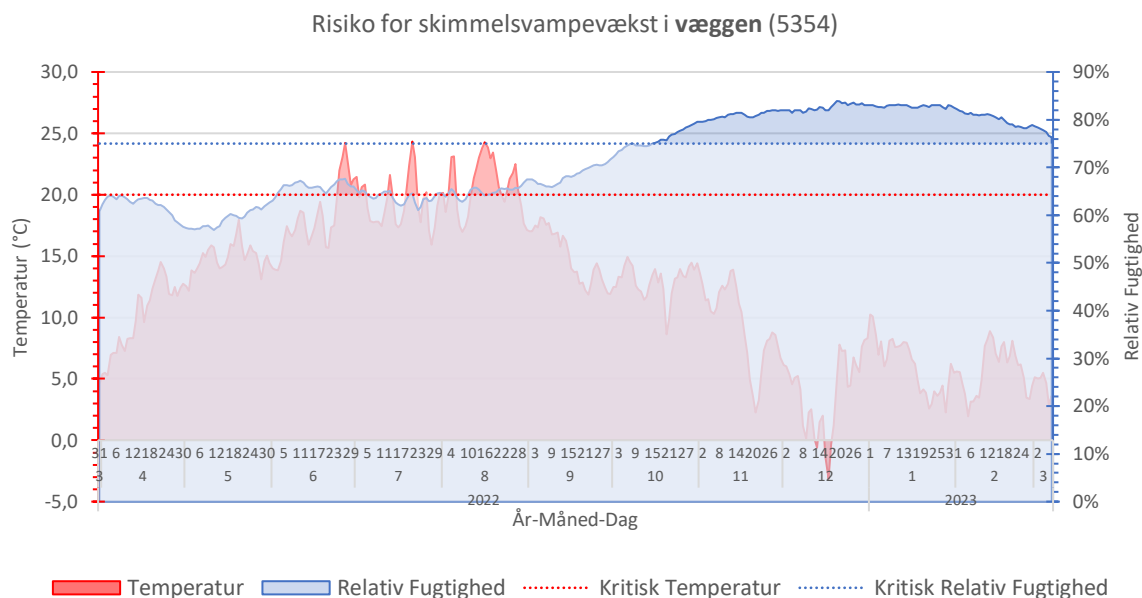
Følgende er en oversigt over, hvordan vurderingerne blev lavet opdelt efter bygningsdele:

- Ydervægkonstruktion
 - i væggen
 - risiko vurderet efter målte data, afsnit 6.4.1.1
 - risiko vurderet efter dynamiske fugtsimuleringer, se afsnit 6.4.2.3
 - bag lysningen
 - risiko vurderet efter målte data, afsnit 6.4.1.1
- Indvendige overflader
 - på vindueskonstruktion og lysningen
 - risiko vurderet efter statiske varmesimuleringer + kritisk overfladetemperatur, afsnit 6.4.3.2
 - på væggen
 - risiko vurderet efter dynamiske fugtsimuleringer, se afsnit 6.4.2.3
 - risiko vurderet efter statiske varmesimuleringer + kritisk overfladetemperatur, afsnit 6.4.3.2

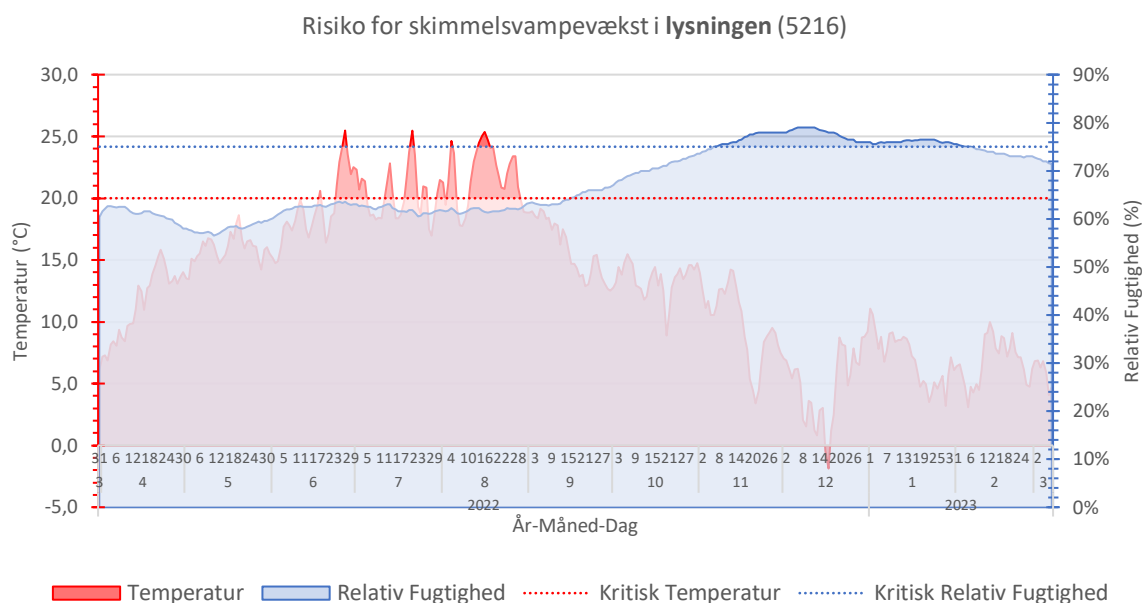
6.4.1. Risikovurdering baseret på målte data

6.4.1.1. Analyse

For både datalogger 5354 i væggen, og 5215, i lysningen, er relativ fugtighed høj når temperaturen er lav, se Figur 63 og Figur 64. Der er ikke nogen perioder, hvor relativ fugtigheden er over 75% og temperaturen over 20 °C. Det forklarer i grove træk hvorfor der slet ikke er tegn på skimmelsvampevækst de to steder i konstruktionen. Se Bilag 9: Data fra dataloggere, som er et Excel-ark med det komplette datasæt med behandling.



Figur 63: **Relativ fugtighed og temperatur målt i væggen**, med datalogger 5354. Datoer for målinger er vist på x-aksen. Perioden er 11,5 måneder: 31/3/2022 – 7/3/2023. Temperatur og relativ fugtighed blev målt en gang per time, men døgnmiddelværdier er plottet her. Temperatur (°C) er plottet på venstre y-akse, med en kritisk temperatur (20 °C) vist som en vandret prikket rød linje. Relativ fugtighed (%) er plottet på højre y-akse, med en kritisk relativ fugtighed (75%) vist som en vandret prikket blå linje.



Figur 64: **Relativ fugtighed og temperatur målt i lysningen**, med datalogger 5216. Datoer for målinger er vist på x-aksen. Perioden er 11,5 måneder: 31/3/2022 – 7/3/2023. Temperatur og relativ fugtighed blev målt en gang per time, men døgnmiddelværdier er plottet her. Temperatur (°C) er plottet på venstre y-akse, med en kritisk temperatur (20 °C) vist som en vandret prikket rød linje. Relativ fugtighed (%) er plottet på højre y-akse, med en kritisk relativ fugtighed (75%) vist som en vandret prikket blå linje.

Selv om graferne har kritisk relativ fugtighed (75%) og temperatur (20 °C) markeret som vandrette linjer, er risikoen for skimmelsvampevækst ikke så entydig. Der er en relation mellem flere faktorer: temperatur, relativ fugtighed, materialet og tid. Tilsammen skaber de det fulde billede. En 'isople-

model' er udviklet for at vurdere om skimmelsvamp vil vokse, og ud fra den model kan vi få en mere nuanceret fornemmelse for risiko for skimmelsvampevækst i konstruktionen (Sedlbauer, 2001).

Isopleth-modellen beskriver risikoen for skimmelsvampevækst efter temperatur og relativ fugtighed, men tilføjer to ekstra lag: tid og overflademateriale. 6 grafer er præsenteret i Figur 65. De plotter allesammen relativ fugtighed (%) på y-aksen og temperatur (°C) på x-aksen.

Der er 3 forskellige par af grafer, i kolonner fra venstre til højre, se Figur 65, som er efter hvor meget overfladen understøtter skimmelsvampevækst. Der er tre kategorier for overflader:

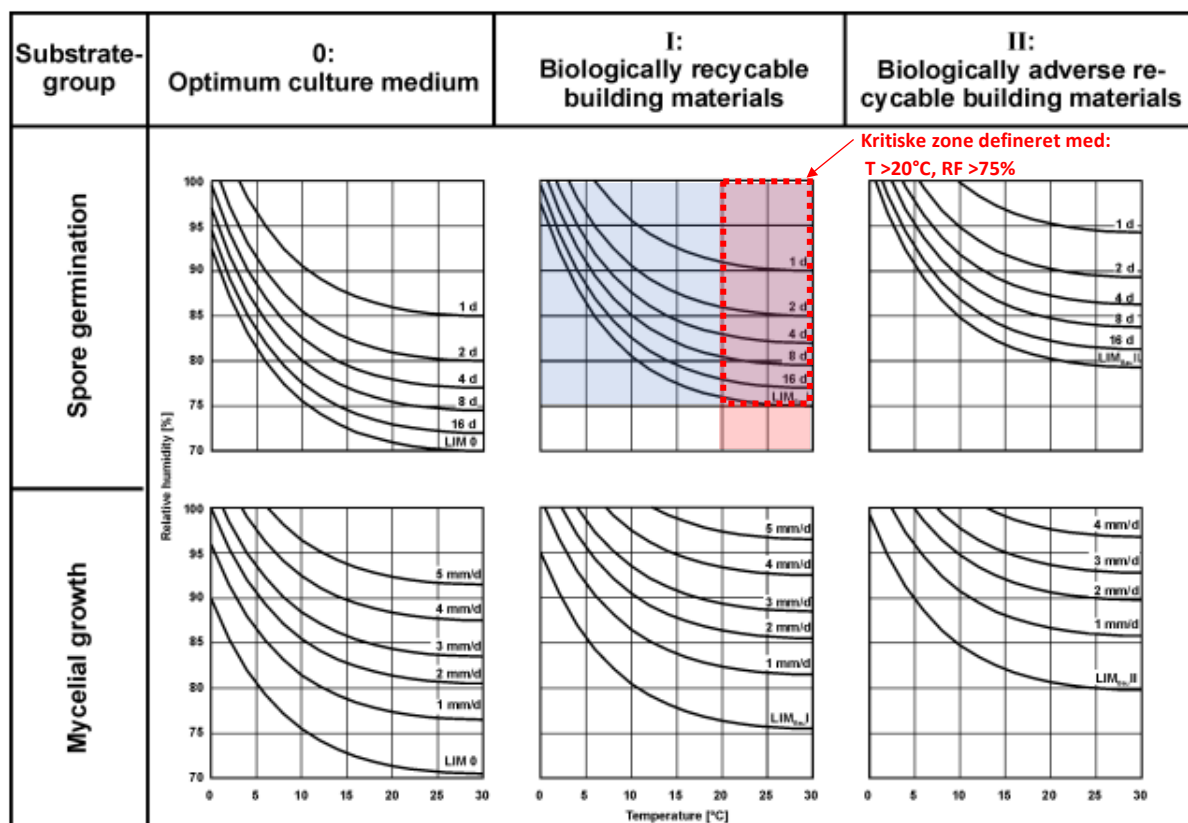
- Kategori 0: Optimalt kulturmedium
- Kategori 1: Biologisk nedbrydelige byggematerialer
- Kategori 2: Bioteknisk modstandsdygtige genanvendelige byggematerialer

Derefter er der to rækker med tre grafer hver; de øverste tre handler om spiringen af svampesporer, hvor de nederste tre handler om hvor meget hyferne (den tråde-agtige dele af svampen) vokser.

Graferne over svampesporer har en række nedadgående kurver, der angiver tidsperioderne, hvor svampesporer vil spire, hvis temperatur og relativ fugtighed varer ved i denne periode. Der er en kurve for hver tidsperiode fra 1 døgn til 16 døgn. Kurverne markeret med 'LIM' (lower limit for mold growth) indikerer grænsen for relativ fugtighed og temperatur, hvor skimmelsvamp ikke vil vokse, uanset hvor lang tid den har.

Graferne over hyfer-vækst har også en række nedadgående kurver, men disse indikerer, hvor mange mm hyferne vil vokse per døgn, hvis temperatur og relativ fugtighed er fordelagtige.

Graferne over svampesporer er mest interessante for vurderingen af skimmelsvampevækst. Konstruktionslaget, som bliver vurderet her, pudslaget mellem isoleringslag og murværket, falder i kategori 1: Biologisk nedbrydelige byggematerialer, da murværket i væggen og bag lysningen nok er smudset til pga. indbygget snavs og/eller udefrakommende støv fra utætheder i konstruktionen. Så den graf, der bliver brugt for vurderingen for skimmelsvampevækst, er den i øverste række i midten, se Figur 65.

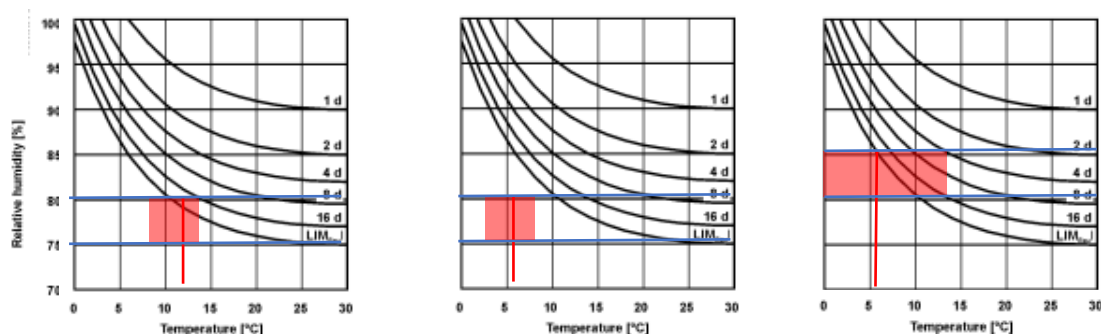


Figur 65: Sammenhæng mellem tid, temperatur og relativ fugtighed for at forudse skimmelsvampevækst på både organisk og ikke-organisk materiale. (Sedlbauer, 2001) Markeret med rødt og blå felter er hhv. den kritiske temperatur (20 °C) og relativ fugtighed (75%) som bliver brugt til vurderingen i Figur 63 og Figur 64.

På grafen i Figur 65 er der markeret et rødt felt og et blå felt, som betegner hhv. temperaturer og relative fugtigheder, som er fordelagtige for skimmelsvampevækst. Andre temperatur/relativ fugtighed kombinationer end 20 °C og 75% vurderes også, for at se om der er en risiko for skimmelsvampevækst ved nærmere undersøgelser, se oversigten i Tabel 9 og Figur 66.

Tabel 9: Dataoplæg for at vurdere om der er risiko for skimmelsvampevækst i væggen, baseret på Sedlbauers isopleth-model, se Figur 65 for modellen, som tager temperatur, relativ fugtighed, tid og mulighed for næringsstof i betragtning. Resultater er vist grafisk i Figur 66.

Relativ fugtighed (%)	Dage og Periode (højest antal sammenhængende dage, datoer)	Temperatur (gennemsnit, °C)	Temperatur (lav / høj for perioden, °C)	Figur
75 ≤ RF < 80	20 , 15. okt. – 3. nov.	12,9	8,6 / 14,5	Figur 66, t.v.
75 ≤ RF < 80	17 , 19. feb. – 7. mar.	5,2	2,9 / 8,1	Figur 66, m.
80 ≤ RF < 85	107 , 4. nov. - 18. feb.	6,1	-3,1 / 13,9	Figur 66, t.h.
85 ≤ RF	0			



Figur 66: Sedlbauers isoplet-model for skimmelsvampevækst på underlag med organisk materiale **med det område, hvor der er data fra væggen markeret med rødt**. Der vises gennemsnitstemperatur og høj/lav spænd:

- til venstre: **20 dage**, 15. okt. – 3. nov., med RF mellem 75-80%
- midt: **17, 19. feb. – 7. mar.**, med RF mellem 75-80%
- til højre: **107, 4. nov. - 18. feb.**, med RF mellem 80-85%

De røde felter i Figur 66 viser et mere nuanceret billede end linjerne med kritisk temperatur og kritisk relativ fugtighed i Figur 63, da de tager en tidsperiode med. I billedet t.v. indikerer det røde felt temperaturerne over en 20-dages periode med 75%-80% relativ fugtighed i efteråret. Den øverste del af feltet til højre vil krydse den kurve, der vil være for 20 dage, så det kan konstateres, at der er en lille risiko for skimmelsvampevækst i efteråret.

Det røde felt på grafen i midten viser de samme temperaturer over en 17-dages periode i vinterperioden med 75% - 80% relativ fugtighed. Feltet her er under LIM kurven, så skimmelsvampesporer vil ikke spire, uanset hvor lang tid konditionerne varer.

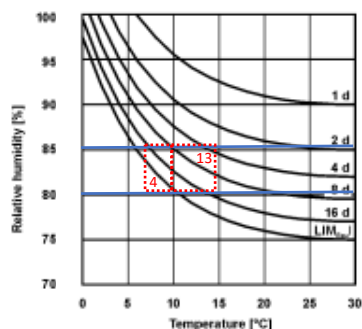
I billedet t.h. indikerer det røde felt temperaturerne over en 107-dages periode over vinteren hvor relativ fugtigheden var 80-85%. Her krydser feltet kurverne for 8 og 16 dage før skimmelsvampespiring. Da perioden er 107 dage, kan det konstateres, at der er en risiko for skimmelsvampevækst i denne periode.

For at undersøge om der er en faktisk risiko for skimmelsvamp over perioden, bliver data om temperaturer og relativ fugtighed vurderet nærmere. Det bliver undersøgt hvor mange dage, der falder i feltet, der krydser kurven for 8 dage før svampesporer spiringen. Der er faktisk kun 4 sammenhængende dage med temperaturer mellem 8 og 10 °C. Spiringen tager mere end 8 dage, så denne periode udgør ikke en risiko for skimmelsvampevækst. Men der er en periode på 13 dage med temperaturer mellem 10 og 15 °C, hvilket er over de 4 dage det tager under de konditioner før svampesporer spiring, se Tabel 10 og Figur 67.

Tabel 10: Oversigt over perioder i vinterperioden med kritisk høj relativ fugtighed. Data er vist grafisk i Figur 67.

Relativ fugtighed (%)	Temperatur (°C)	Dage (højst antal sammenhængende dage)	Kritisk antal sammenhængende dage ¹ (antal)	Risiko for skimmelsvampe-vækst	Figur
80 ≤ RF < 85	8 ≤ T < 10	4	> 8	nej	Figur 67
80 ≤ RF < 85	10 ≤ T ≤ 15	13	> 4	ja	Figur 67

1. Kritisk antal sammenhængende dage for det definerede temperaturspænd er fra isoplet-modellen vist i Figur 66.



Figur 67: Sedlbauers isopleth-model for skimmelsvampevækst på underlag med organisk materiale **med data fra de to kritiske perioder i vinterperioden med relativ fugtighed mellem 80-85%**

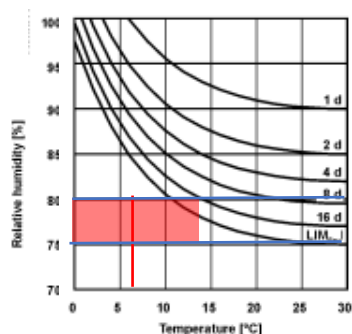
- Stiplet kasse til venstre: **4 dage**, temp. mellem 8-10 °C. Det kritiske antal dage er **over 8**.
- Stiplet kasse til højre: **13 dage**, temp. mellem 10-15 °C. Det kritiske antal dage er **over 4**.

Det viser sig, at der er en del af vinterperioden, hvor der kunne være en risiko for skimmelsvampevækst, se Figur 67, men risikoen er stadig lille, da relativ fugtighed over de 13 dage er i den lave ende, mellem 80,0 - 81,4%.

Andre kombinationer af temperatur og relativ fugtighed end 20 °C og 75% vurderes på samme måde for konstruktionen bag lysningen, se oversigten i Tabel 11 og Figur 68.

Tabel 11: Dataoplæg for at vurdere om der er risiko for skimmelsvampevækst i **lysningen**, baseret på Sedlbauers isopleth-model, se Figur 65 for modellen, som tager temperatur, relativ fugtighed, tid og mulighed for næringsstof i betragtning. Resultater er vist grafisk i Figur 68.

Relativ fugtighed (%)	Dage og Periode (højst antal sammenhængende dage, datoer)	Temperatur (gennemsnit, °C)	Temperatur (lav/høj for perioden, °C)	Figur
75 ≤ RF ≤ 80	93 , 6. nov. – 6. feb.	6,8	-1,9 / 14,3	Figur 68
80 ≤ RF ≤ 85	0			



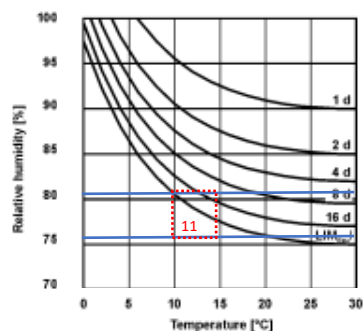
Figur 68: Sedlbauers isopleth-model for skimmelsvampevækst på underlag med organisk materiale **med data fra bag lysningen tegnet over**. Der vises gennemsnitstemperatur og høj/lav spænd for de 93 sammenhængende dage med relativ fugtighed mellem 75-80%.

Der er en lille risiko zone her i vinterperioden også, se Figur 68. For at vurdere risikoen nøjere, kræves der en mere detaljeret undersøgelse af konditionerne, se Tabel 12 og Figur 69.

Tabel 12: Oversigt over perioden med kritisk høj relativ fugtighed. Data er vist grafisk i Figur 69.

Relativ fugtighed (%)	Temperatur (°C)	Dage (højest antal sammenhængende dage)	Kritisk antal sammenhængende dage ¹ (antal)	Risiko for skimmelsvampe-vækst	Figur
$75 \leq RF < 80$	$10 \leq T < 15$	11	> 16	nej	Figur 69

1. Kritisk antal sammenhængende dage for det definerede temperaturspænd er fra isopleth-modellen vist i Figur 66.



Figur 69: Sedlbauers isopleth-model for skimmelsvampevækst på underlag med organisk materiale med data fra den kritiske periode med relativ fugtighed mellem 75-80%

- Stiplet kasse: **11 dage**, temp. mellem 8-10 °C. Det kritiske antal dage er **over 16**.

Generelt kan vi konstatere at der ikke er skimmelsvampevækst i væggen eller i lysningen, fordi når relativ fugtighed er høj, er temperaturen lav, også med LIM konditioner taget i betragtning.

6.4.2. Risikovurdering baseret på fugttransportsimuleringer

Fugttransmission i eksisterende konstruktion bliver også vurderet med en dynamisk simulering over 3 år for at konstatere om der er risiko for skimmelsvampevækst i konstruktionen.

6.4.2.1. Materialedata

Materialeparametre som afspejler virkeligheden, er vigtige for at opnå et retvisende fugtsimulering i WUFI. Der er flere karakteristika som densitet, porøsitet og varmekapacitet, der bidrager til et materiales mulighed for at transportere fugt. Nogle af de vigtigste parametre at definere for simuleringen er vist i Tabel 13. Hvis materialet er hygroskopisk, det vil sige, hvis det er i stand til at absorbere væske direkte f.eks. fra slagregn, som mursten er, er materialets kapillarsugeevne også vigtigt at definere. Kapillarsugeevne er ikke beskrevet med et tal, men med kurver, som beskriver opfugtnings- og udtørringsevner. Data for disse for mursten, og andre hygroskopiske materialer, er tilgængelige i WUFIs materialebibliotek. Se Bilag 11: WUFI-rapporter for alle data brugt for fugtsimuleringer.

Tabel 13: Materialedata til brug for fugttransportsimuleringen i WUFI.

Materiale	Tykkelse, d (m)	Varmeledningsevne, λ værdi (W/m·K)	Dampdiffusionsmodstandsfaktor, μ ⁴ (-)	sd-værdi ⁵ (m)	Indbygget fugtindhold ⁶ (kg/m ³)
Kalklag				0,01	
Murværk (mursten + mørtel)	0,230	0,70 ¹	10		18,0
Puds	0,002	0,80 ²	7,9		10,6
Isolering	0,108	0,05 ³	1,3		1,79
Alu-kraft	0,001			50	
Spånplade	0,012	0,14 ³	165		95,0
Maling				0,2	

1. Murværkets lambdaværdi er en kombination af dem for mørtel og mursten. Se Bilag 10: Varmeledningsevner.

2. Varmeledningsevner er blevet taget fra DS 418, Figur F.4. (Dansk Standard, 2020)

3. Varmeledningsevner, er blevet taget fra DS 418, Tabel G1 bl.a. (Dansk Standard, 2020)

4. Materialer med en reel tykkelse bliver beskrevet med en dampdiffusionsmodstandsfaktor, μ -værdi. Faktoren er et forhold mellem diffusionskoefficienter for vanddamp i et materiale og i luft. Faktoren sammenligner, hvor meget mere et materiale hæmmer dampdiffusion end luft, derfor har materialer, der nærmer sig luft (som mineraluld), en μ -værdi tæt på 1, mens materialer, der hæmmer mere (som gips), har en værdi ved 8.

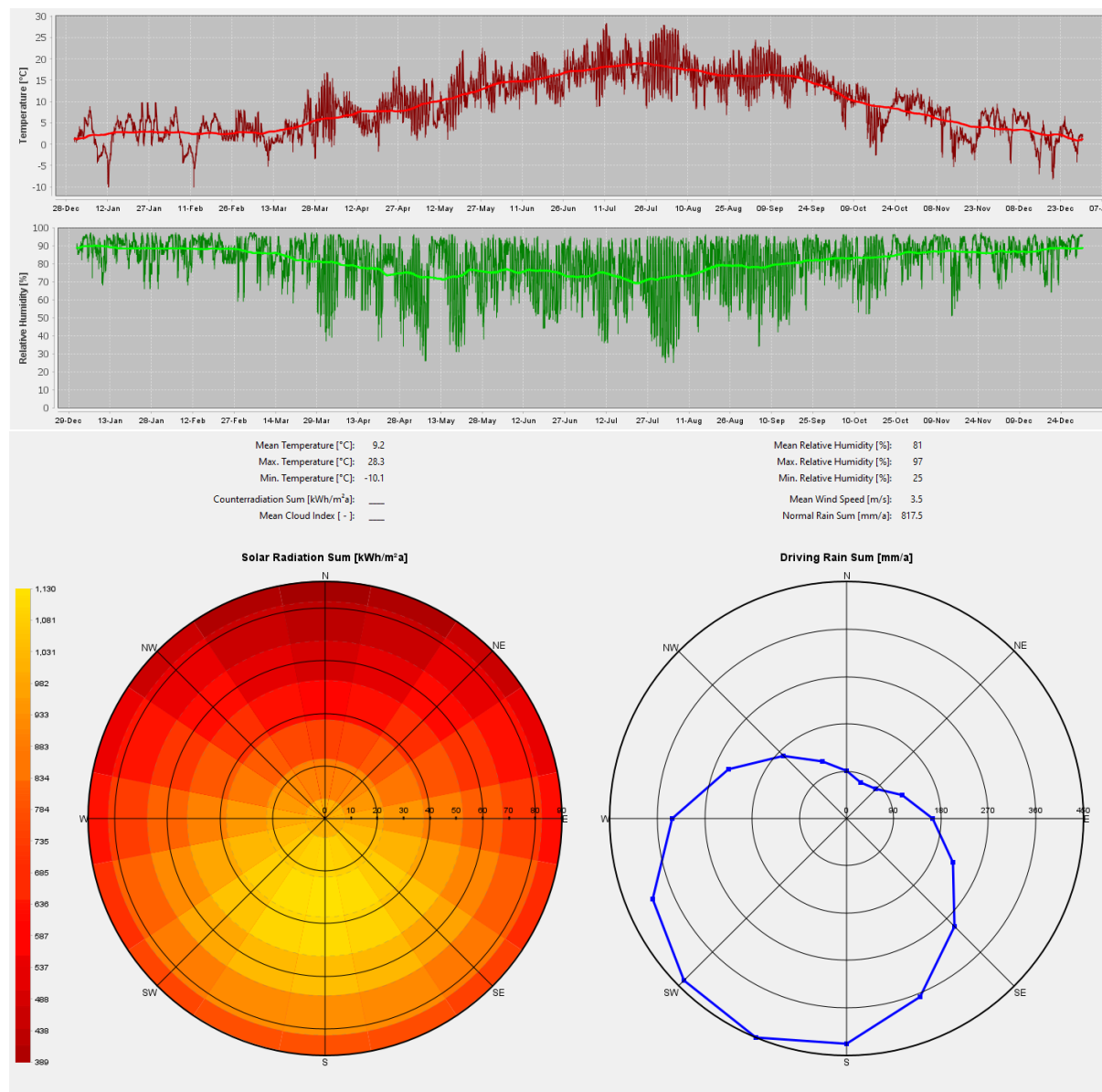
5. Materialerne uden en vis tykkelse bliver kun beskrevet med en sd-værdi, som repræsenterer $\mu \cdot d$. Sd-værdien er defineret som tykkelsen af et fiktivt luftlag, der har den samme fugtmodstand som materialet. En høj sd-værdi betyder at materialet har en bedre evne til at forhindre fugt i at trænge igennem. En sd-værdi på 1 meter betyder, at materialet har samme fugtmodstand som et luftlag med en tykkelse på 1 meter. En dampspærre vil have en sd-værdi over 1000 m og en diffusionsåben maling vil have en sd-værdi omkring 0,01 m.

6. Indbygget fugtindhold er beregnet ud fra materialets fugtlagringskapacitet og en relativ fugtighed og temperatur. Det er sat til RF 80% og 20 °C, som vil være typisk for nybyg, men det er også passende at starte med i disse og de andre simuleringer, da man vil kunne se om vandindholdet falder over tid.

6.4.2.2. Klimadata

Klimadata og placeringen på kloden er også vigtige at indstille for en fugtsimulering. I WUFI kan man vælge imellem forskellige sted-specifikke datasæt. Det sæt, der er tættest på vores klima i Københavnsområdet, er fra Lund, Sverige.

Klimadatasættet er for et referenceår og inkluderer temperatur, relativ fugtighed, og data om solstråling og retningen og mængden af slagregn bl.a., se Figur 70.



Figur 70: Diagrammer for klimadata blev brugt til simuleringer i WUFI. Datasættet er sted-specifikt for Lund, Sverige og inkluderer temperatur (øverst), relativ fugtighed (næstøverst), solstråling (nederst t.v.) og slagregn (nederst t.h.).

Det indvendige klima skal også defineres. For at være på den sikre side simuleres der med det der hedder 'Medium Moisture Load +5%' i WUFI.

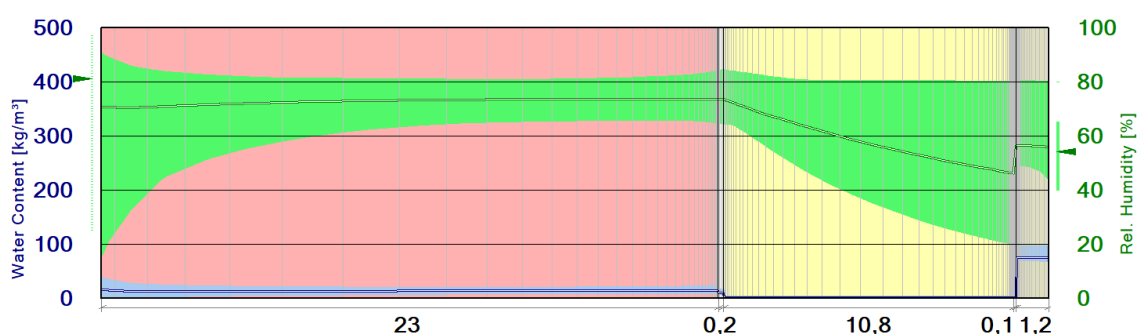
6.4.2.3. Analyse

En dynamisk simulering over en treårig periode blev lavet for den normale vægkonstruktion.

Diagrammet i Figur 71 viser et lodret snit igennem en repræsentativ del af vægkonstruktionen fra WUFI. Venstre er den udvendige side, og højre er den indvendige side. Materialelagene er: murværk, pudslag, isolering, dampspærre og spånplade. Kalkmaling udvendig og maling indvendig ses ikke som separate lag, da de er modelleret som overflader med en fugtmodstand i stedet for som materialelag.

Vandindhold i materialerne vises i blå, med y-akse til venstre, og relativ fugtighed vises i grøn, med y-akse til højre. Den grønne streg er niveauet for relativ fugtighed efter den treårige periode er simuleret, mens den grønne farve viser hvor strengen har ligget over perioden.

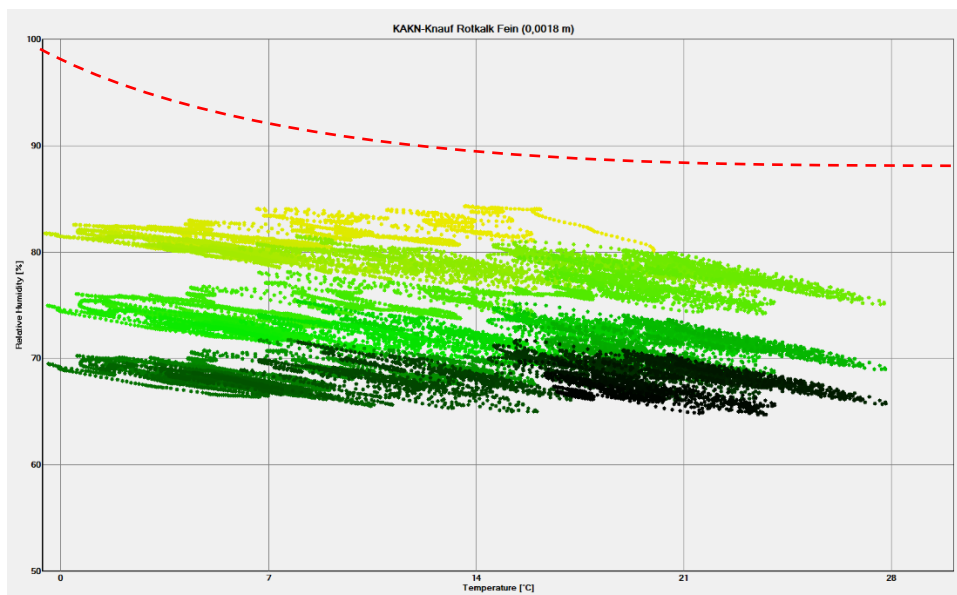
Man kan læse ud fra diagrammet, at der ikke opstår kondens i konstruktionen, da niveauet for relativ fugtighed aldrig bliver 100%. Man kan også se, at fugt fra den udvendige side når hele vejen igennem konstruktionen til dampspærren, og at indvendig fugt diffunderer fra højre ind til dampspærren.



Figur 71: Diagram fra WUFI af fugttransmission igennem normalkonstruktionen over en treårig periode. Materialelag fra venstre (ude) til højre (inde) er: Murværk, pudslag, isoleringslag, dampspærre og spånplade.

En enkelt indikation for skimmelvækst på overfladerne for hvert materialelag bliver lavet samtidig med simuleringen i WUFI. Se eksempel for pudslaget i Figur 72. Grafen viser en oversigt over temperatur (x-aksen) og relativ fugtighed (y-aksen) på hvert tidspunkt (gul = første tidspunkt -> sort = sidste tidspunkt) af simuleringen. Pudslaget mellem murværket og isoleringen er det mest kritiske sted i konstruktionen, fordi det er der, hvor fugt i et potentielt varmere isoleringslag kan møde en kold væg og skabe høje niveauer af relativ fugtighed, så det blev nøje undersøgt.

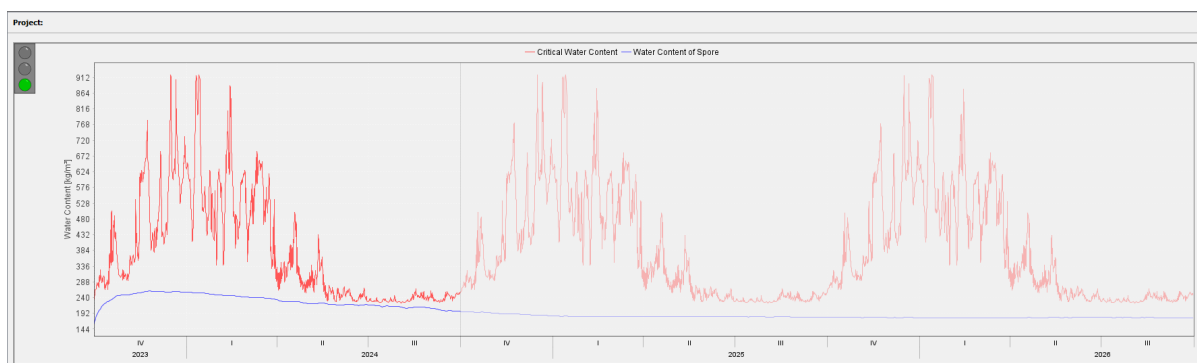
En lav grænse for skimmelsvampevækst er på graferne, se den røde kurve i Figur 72, og hvis alle punkter ligger under den, er der ikke risiko for skimmelsvampevækst. Ifølge den graf vises der **ikke risiko** for skimmelsvampevækst på pudslaget. Se også Bilag 11: WUFI-rapporter for de fulde resultater.



Figur 72: Relativ fugtighed og temperatur for pudslaget er plottet for en treårig periode (gul->sort). Den røde stiplede linje er den nedre grænse for skimmelsvampevækst (LIM, lower limit for mold) (Sedlbauer, 2001). Da alle punkter ligger under LIM, **vurderes det, at der ikke er risiko** for skimmelsvampevækst.

En mere dybdegående vurdering for risiko for skimmelsvampevækst laves i tillægsprogrammet: WUFI BIO, og resultater for pudslaget ses i Figur 73. Grafen viser relationen mellem det kritiske niveau for vandindhold for skimmelsvampevækst (rød) og vandindholdet af svampesporer (blå). For hver time over den treårige kalkulationsperiode tjekker WUFI-Bio LIM-værdien for underlagsklasse (pudslaget har klasse 2) for at finde den relative luftfugtighed, der adskiller spiring/vækstbetingelser fra ikke-spining/vækstbetingelser for den times omgivelsestemperatur. Denne kritiske relative luftfugtighed konverteres derefter til det kritiske vandindhold ved hjælp af sporens fugtlagringsfunktion. Så snart vandindholdet i sporen overskrider det kritiske vandindhold, antages det, at sporen spirer, og myceliet vokser.

Da vandindholdet af svampesporet aldrig er over det kritiske vandindhold, **vurderes det, at der ikke er risiko** for skimmelsvampevækst på pudslaget. Se også Bilag 11: WUFI-rapporter for de fulde resultater.



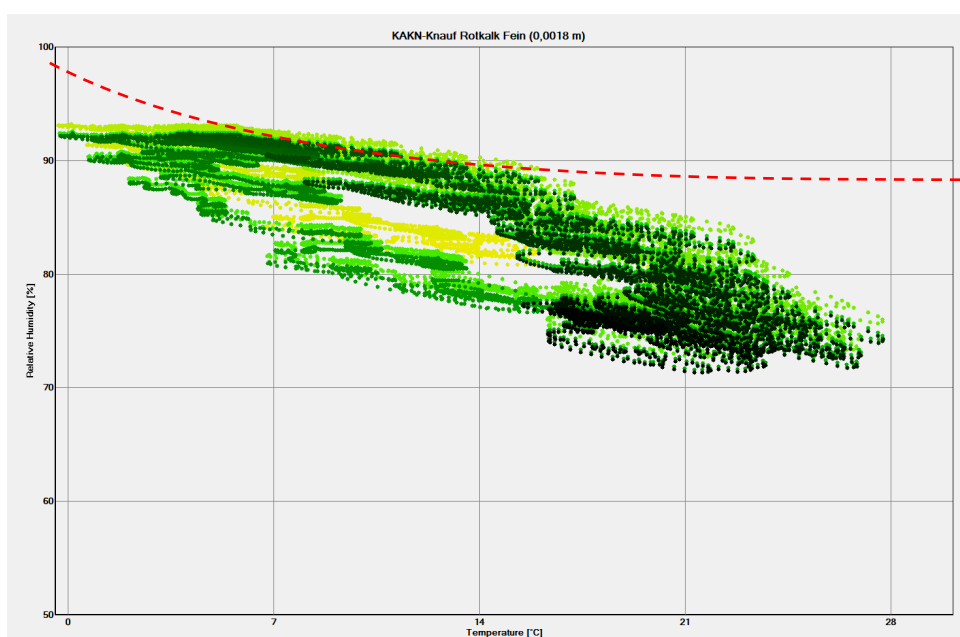
Figur 73: Vandindholdet for pudslaget (rød) og vandindholdet af svampesporer (blå) er plottet for en treårig periode. Da vandindholdet af svampesporer aldrig er over vandindholdet for pudslaget, **vurderes det, at der ikke er risiko** for skimmelsvampevækst. Det er bekræftet af det grønne trafiksignal.

Der kan dog konstateres fra termograferingen ved tilstandsvurderingen, at der faktisk er utætheder i dampspærre, og blower door test-resultater giver os en idé om mængden. Det kan også konstateres

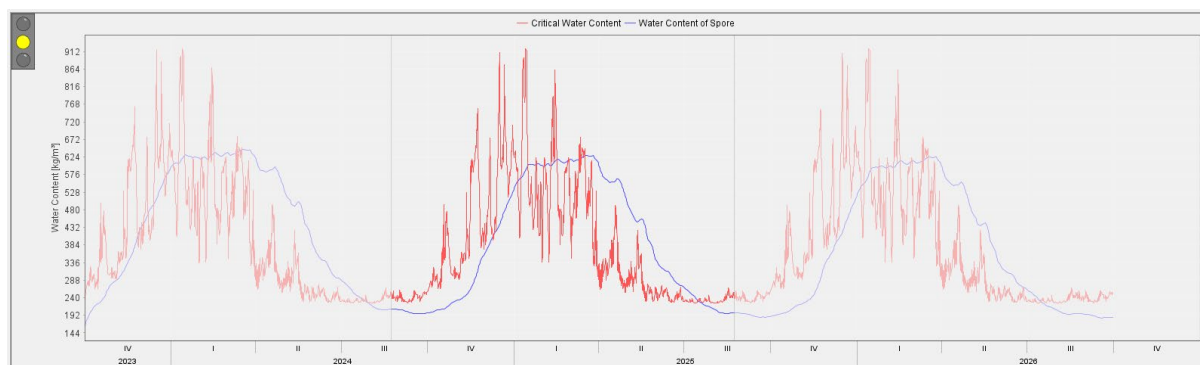
fra huller boret i væggen for dataloggerne og den destruktive undersøgelse af lysningen, at der ikke er skimmelsvampevækst i konstruktionen.

Det vides ikke, hvor meget af utætheden skyldes utætheder i dampspærren frem for de andre utætheder. Blower door test med vindueskonstruktionen blændet, se Bilag 8: Blower door test 03, påviste en luftudskiftning af 10,52/h. Den mængde vil være fordelt over alle utætheder, på en ukendt måde. Der er derfor lavet en serie simuleringer i WUFI med forskellige grader af utæthed af dampspærren for at etablere en nedre grænse for utæthederne relative til skimmelsvampevækst, dvs. for at etablere hvor utæt dampspærren må være, før der konstateres risiko for skimmelsvampevækst.

Utætheder fra 10/h til 0,1/h blev simuleret, og alle over omkring 0,2/h viste risiko for skimmelsvampevækst. Ved 0,2/h falder de fleste prikker under grænsen for skimmelsvampevækst, se Figur 74. Og fra analysen i WUFI BIO, se Figur 75 ser vi, at niveauet 0,2/h giver kritisk vandindhold af svampesporen om efteråret, men så er der en udtørningsperiode hvor risikoen forsvinder igen.



Figur 74: Relativ fugtighed og temperatur for pudslaget er plottet for en treårig periode (gul->sort). Den røde stiplede linje er den nedre grænse for skimmelsvampevækst (LIM). Da nogle punkter ligger over LIM, **vurderes 0,2/h som utæthedsniveauet hvorefter der kommer risiko for skimmelsvampevækst.**



Figur 75: Vandindholdet for pudslaget (rød) og vandindholdet af svampesporer (blå) er plottet for en treårig periode. Da vandindholdet af svampesporer kommer over vandindholdet for pudslaget, men så tørrer ud igen hvert år, **vurderes 0,2/h som utæthedsniveauet, hvorefter der kommer risiko for skimmelsvampevækst.** Det gule trafiksignalikon betyder at skimmelsvampevækst er mellem 50 mm/år og 200 mm/år.

En ligning baseret på blower door test resultater giver et areal for utætheder, som ikke skal overskrides, hvis utætheder skal holdes under 0,2/h. Fra blower door test 03, som målte på alle utætheder, var graden af utætheder 10,52/h som gav et areal på 23,2 cm² ved 10 Pa, se Bilag 8: Blower door test 03.

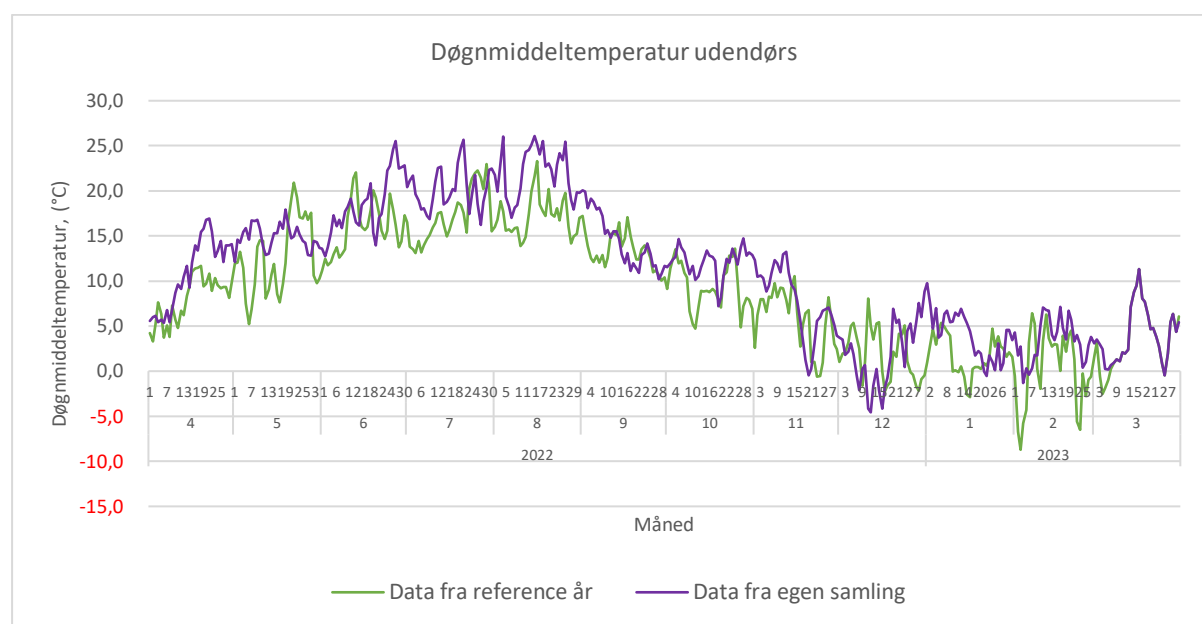
Hvis det konstateres, at utætheder i dampspærren skal være under 0,2/h, må arealet højst være 0,44 cm² ved 10 Pa. Dvs. at et hul på størrelse med to ærter i dampspærren kan give problemer med skimmelsvampevekst.

6.4.3. Risikovurdering baseret på varmetransportsimuleringer + kritisk overfladetemperatur

6.4.3.1. Kritisk overfladetemperatur

For at vurdere om der er risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader i huset, blev kritiske udendørstemperaturer samlet med to forskellige datasæt. Den ene datasæt er samlet med en datalogger på adressen fra 31/03/2022 – 07/03/2023 og det andet er fra et referencesår, som er lavet fra data samlet fra 2001-2019 (eksklusiv 2010) fra data fra en vejrstation i Sjælsmark, DK.

Risiko for skimmelsvampevækst er højere ved lave udendørstemperaturer. Det var et mildere år i 2022-2023 end det var i referenceåret, se Figur 76 og Bilag 13: Vejrdata for vurdering af kritiske temperaturer, som er et Excel-ark med de komplette vejrdatasæt. Derfor valgte vi at bruge data fra referenceåret for risikovurdering for skimmelsvampevækst.



Figur 76: Døgnmiddeltemperaturer per måned, for egne data (lilla linje) og for et referenceår (grøn linje)

Ud fra referenceårets datasæt, fandt vi frem til den laveste døgnmiddeltemperatur for hver af de koldeste fire måneder: december, januar, februar og marts. Med de temperaturer og månedsgennemsnit for relativ fugtighed målt i stuen, kunne kritiske overfladetemperaturer beregnes, se Tabel 14 og Bilag 13: Vejrdata for vurdering af kritiske temperaturer.

Tabel 14: Udendørstemperaturer til at vurdere om der bliver risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader. Referenceår er fra DK_fugtreferenceår_Sjælsmark; lavet fra data indsamlet fra 2001-2019 (eksklusiv 2010).

Måned	Temperatur, ude (lavest døgnmiddel) (°C)	Relativ fugtighed, inde (månedsgennemsnit) (%)	Kritisk overflade temperatur (°C)
december	-2,2	43	11,32
januar	-2,9	44	11,66
februar	-8,7	38	9,47
marts	-2,5	33	7,39

Konstruktionerne blev derefter simuleret i HEAT2 med udvendig temperatur for februar på -8,7 °C. Hvis nogle af de indvendige overflader er køligere end den kritiske overfladetemperatur beregnet for februars gennemsnitlige relativ fugtighed i stuen, og de andre betingelser (tid og næringsstoffer) er til stede, vil der være risiko for skimmelsvampevækst.

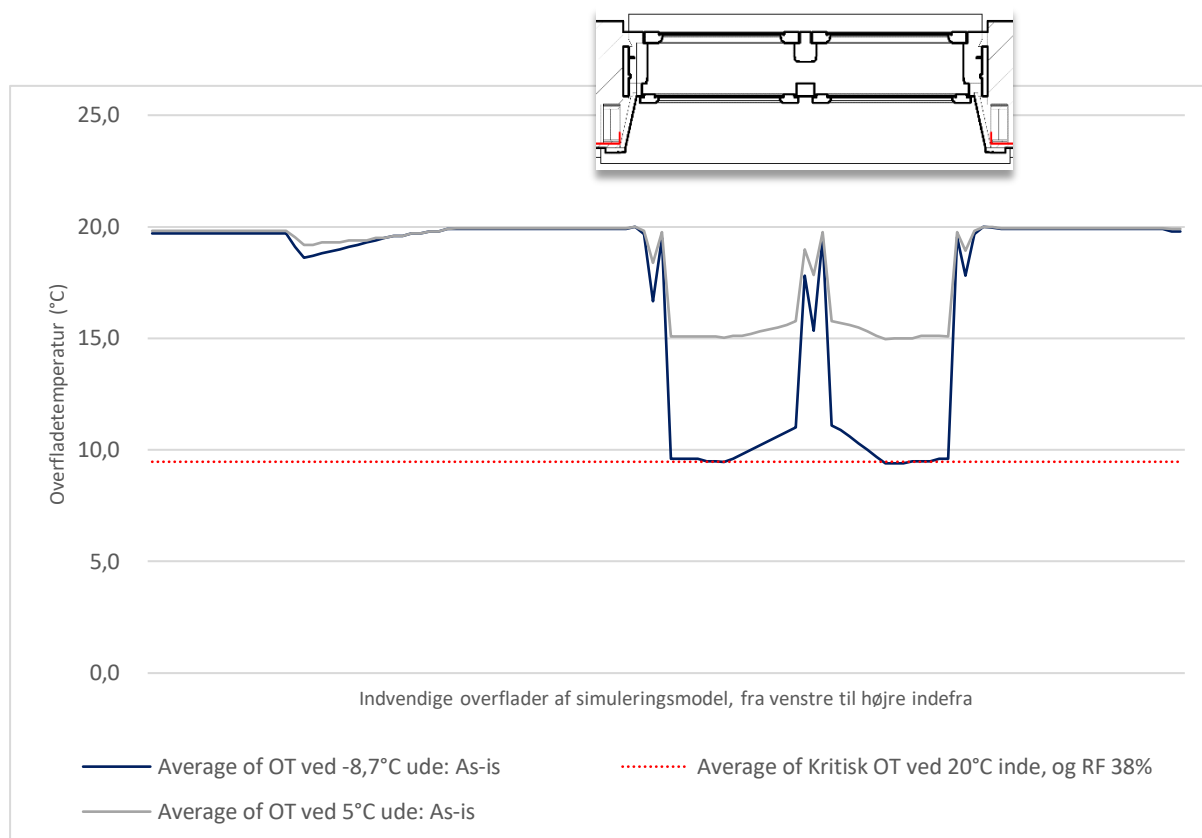
6.4.3.2. Analyse

Der var ikke skimmelsvampevækst på indvendige overflader ved tilstandsvurderingen. Simuleringen i HEAT2 viser en lille risiko i samlingen mellem forsatsruden og dens gående ramme, som kan ses i Figur 77. Alle data brugt til vurderingen kan ses i: Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.

Data for risikovurderingen er:

- samme udetemperatur som dagen for blower door test/ termografering: **5 °C**
- laveste døgnmiddel udendørstemperatur (februar): **-8,7 °C**
- kritisk overfladetemperatur: **9,5 °C**
(beregnet fra februars gennemsnitlige relativ fugtighed 38% og indetemperatur 20 °C)

For at orientere sig om hvor temperaturerne forekommer på den indvendige overflade, er en skitse af konstruktionen klippet ind lodret over det mest kritiske område.

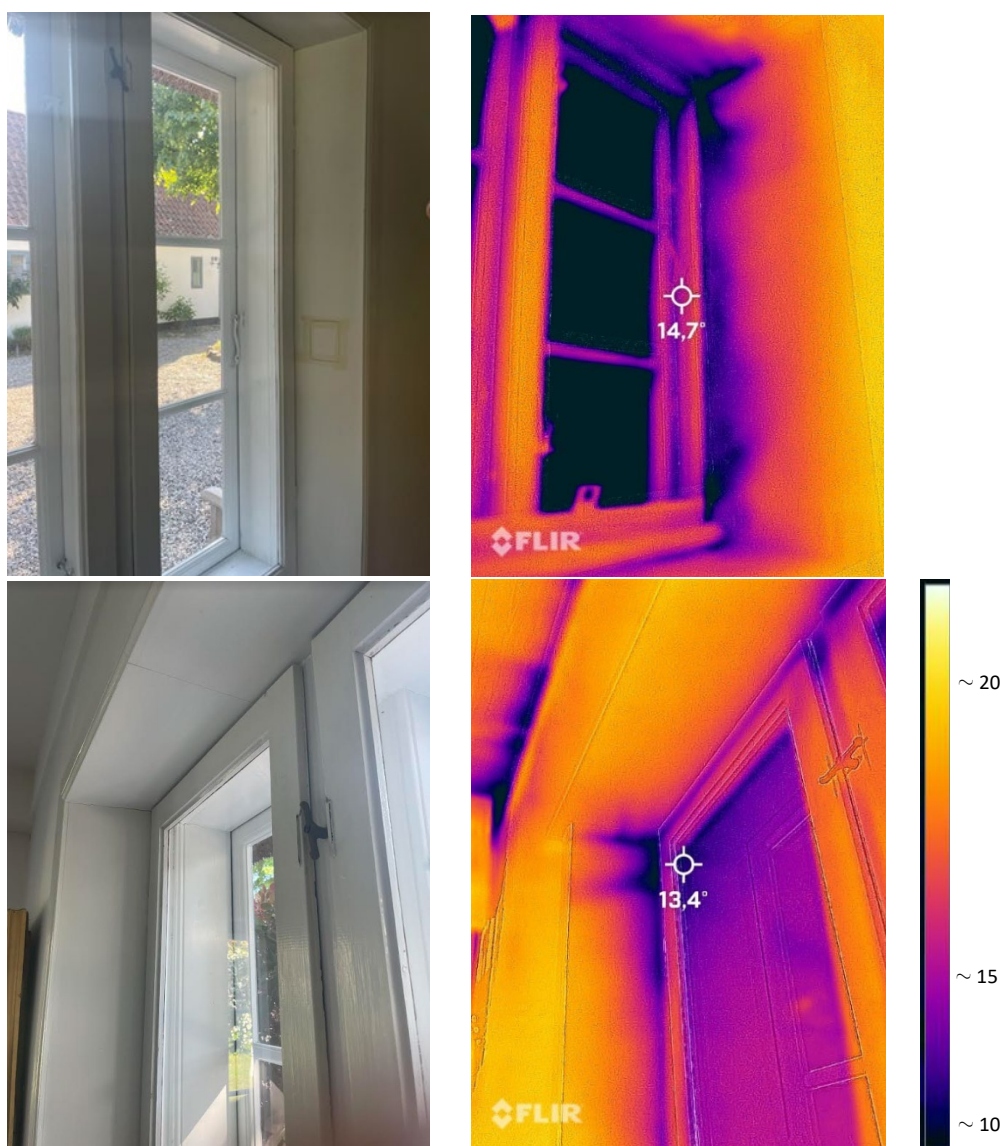


Figur 77: *As-is-konstruktion, enkeltlagsglas i facadevindue og forsatsruden. Overfladetemperaturer (OT) simuleret både ved 5 °C og -8,7 °C udendørs blev plottet relativ til en kritisk overfladetemperatur for at vurdere, om der er risiko for skimmelsvampevækst. Kurverne viser kun en lille risikozone mellem forsatsrude og dens gående ramme og kun ved en meget lav temperatur. Skitse af konstruktionen er indsat for orientering.*

Selv om simuleringen viser at meget lidt af overfladerne kan betragtes som kritisk for skimmelsvampevækst, viser termografering et andet billede, da de tager infiltration i betragtning. De termiske billeder blev taget da udendørstemperaturen for dagen var 4,4 °C, hvilket burde give overfladetemperaturer der er lidt lavere end den lyseblå kurve, simuleret ved 5 °C, i Figur 77.

Ifølge simuleringen for en dag med en udvendig temperatur på 5 °C, vil overfladerne omkring forsatsvinduet og lysningen være omkring 18-20 °C, se den grå kurve i Figur 77. Hvis man kigger på termografiske billeder taget på en dag, hvor temperaturen var omkring 5 °C udendørs, se Figur 78, kan man se på farveskalaen, at temperaturerne på overfladerne er nede ved 13-10 °C ved utæthederne.

De lave temperaturer, som utæthederne forårsager, er ved den kritiske temperatur, 9,5 °C, så det kan forventes, at de vil være under den kritiske overfladetemperatur, hvis de blev målt på en dag med -8,7 °C udendørs. Risiko for skimmelsvampevækst på de kolde dele af overfladerne kan derfor forventes, selvom det ikke kunne ses fra simuleringen.



Figur 78: To almindelige billeder, t.v. og to termografiske billeder, t.h. De termiske billeder blev taget på en dag hvor den gennemsnitlige udendørstemperatur var 4,4 °C. Overfladetemperaturer er lejlighedsvis meget lavere end de simulerede værdier pga. utætheder.

6.4.4. Oversigt over analyser for risiko for skimmelsvampevækst

Resultater for de forskellige måder at vurdere risikoen for skimmelsvampevækst er samlet i Tabel 15.

Tabel 15: Oversigt over vurderinger af risiko for skimmelsvampevækst for as-is-konstruktionen. Bindestreg (-) indikerer at risikoen ikke er vurderet.

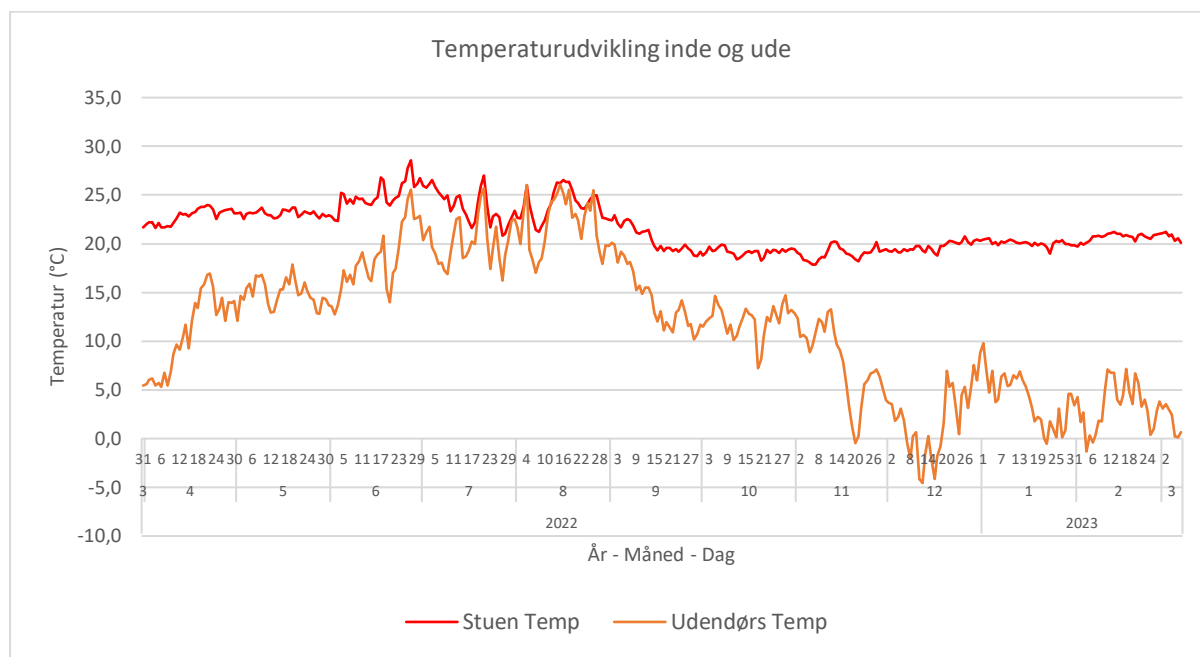
Analysetype / Position	Målte data	Dynamiske fugt-simuleringer	Statiske varmesimuleringer + kritisk overfladetemperatur
I konstruktionen			
bag lysningen	Nej	-	-
i væggen (tæt)		Nej	-
i væggen (0,2/h utæthed)	Ja*	Ja*	
Indvendige overflader			
på vindue og lysningen	-	-	Lille
på væggen	-	Nej	Nej

*Risikoen for skimmelsvampevækst i konstruktionen kommer an på hvor utæt dampspærren er, og det er ukendt. Der opstår først risiko for skimmelsvampevækst ved 0,2/h luftskift igennem dampspærren ifølge WUFI simuleringer.

6.5. Varmetransmission

6.5.1. Temperaturer for simuleringer

Temperaturudviklingen inde og ude over hele året kan ses i Figur 79, men temperaturen er mest interessant at kigge på under opvarmningsperioden (oktober – april), fordi fokus er en forbedring af termisk komfort.



Figur 79: Temperaturudvikling indendørs ses med den røde linje, og udendørs med den orange. Over efterår og vinter er gennemsnitstemperaturen omkring 20 °C indvendig og 5 °C udvendig.

Perioden for simuleringerne er yderligere specificeret efter perioder, hvor de målte relative fugtigheder i konstruktionen er over $\geq 75\%$, se Tabel 16. De perioder er mest interessante at simulere mht. evt. skimmelsvampevækst. Perioden, der blev valgt, er fra 15. oktober – 6. marts, hvor der var en gennemsnitsudendørstemperatur på 5,1 °C og gennemsnitsindendørstemperatur af 19,8 °C. Temperaturerne, der blev brugt for simuleringerne, er udendørs: 5 °C og indendørs: 20 °C, se Tabel 17.

Tabel 16: Beslutning om perioden for temperaturmålinger.

Position	Periode hvor relativ fugtighed er $\geq 75\%$	Gennemsnit af relativ fugtighed, (%)
I væggen	15. oktober - 6. marts	80,9%
Bag lysningen	6. november – 6. februar	76,8%

Tabel 17: Beregning for temperaturer til brug for retvisende simulering.

Perioden valgt:	Gennemsnit af målte temperaturer, (°C)	Temperatur brugt for simuleringen (°C)
15. oktober - 6. marts		
I stuen	19,8	20,0
Udendørs	5,1	5,0

6.5.2. Materialerne

Varmeledningsevner, Lambda-værdier, for bygningsmaterialer blev taget fra DS 418 så vidt muligt. Ruderne blev modelleret som en firkant med en ækvivalent lambda-værdi i HEAT2, i stedet for at modellere flere lag. Det er fordi HEAT2 ikke kan modellere flere lag med flere lag af isolans-værdier. Se Tabel 18 for oversigten over lambda-værdier, og Bilag 10: Varmeledningsevner for at gå igennem hvordan murværkets og rudernes ækvivalente lambda-værdier blev beregnet.

Tabel 18: Varmeledningsevner og ækvivalente varmeledningsevner for materialerne brugt i simuleringerne i HEAT2

Materiale	Varmeledningsevne, λ værdi (W/m·K)
Murværk (mursten + mørtelfuger)	0,70 ¹
Mørtel (kalfatringsfuger)	0,9
Isolering, blødt	0,050
Isolering, trykfast	0,050
Isolering, ny	0,032
Krydsfiner	0,15
Spånplade	0,14
Træ – hårdt	0,18
Træ - blødt	0,13
Rude type 1: Enkeltlagsglas <i>lag: glas, tykkelse: 3 mm</i>	4,01 ²
Rude type 2: Termorude <i>lag: glas-argon-glas</i> <i>tykkelser: 4-12-4 mm</i>	0,10 ²
Rude type 3: Termorude + lavenergilag <i>lag: glas-argon-*glas</i> <i>tykkelser: 4-12-*4 mm</i>	0,044 ²
Rude type 4: Koblet 1+1, med lavenergilag <i>lag: glas-(mellemrum) -*glas</i> <i>tykkelser: 4 + (20) + *4 mm</i>	0,072 ²
Rude type 5: Koblet 1+2, med lavenergilag <i>lag: glas-(mellemrum)-glas-luft-*glas</i> <i>tykkelser: 4 + (20) + 4-12-*4 mm</i>	0,073 ²

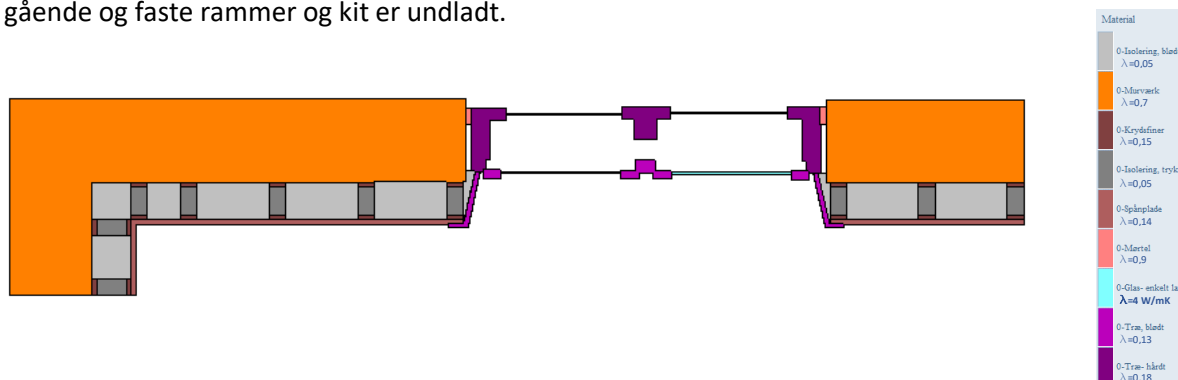
1. Murværkets lambda-værdi er en kombination af dem for mørtel og mursten. Se Bilag 10: Varmeledningsevner.

2. Beregninger for ækvivalente lambda-værdier kan ses i Bilag 10: Varmeledningsevner.

6.5.3. As-is-konstruktion, med yderrude

6.5.3.1. Opbygningen

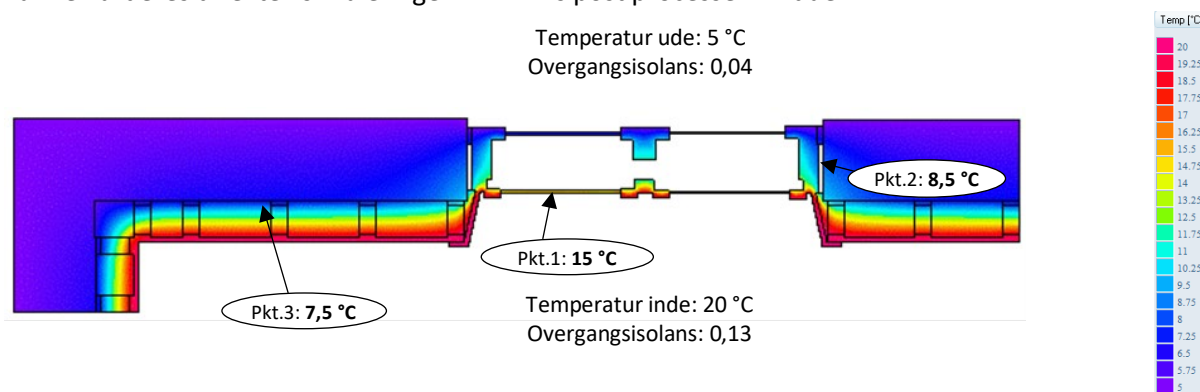
For varmetransmissionssimuleringer skulle konstruktionen forenkles for brug med HEAT 2. Geometrien er forenklet, så runde kanter blev til firkanter, og udskæringer og mellemrum mellem gående og faste rammer og kit er undladt.



Figur 80: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringen. Se også Bilag 15: HEAT2 rapport – As-is.

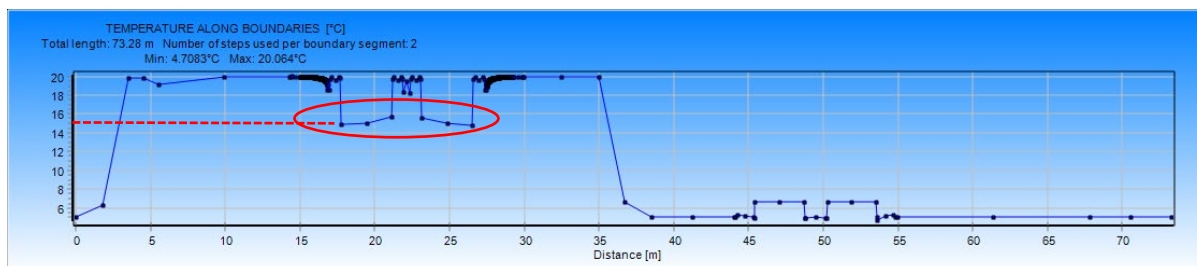
6.5.3.2. Varmetransmission

Varmetransmissionen blev simuleret med HEAT2 i as-is-konstruktion og temperaturerne i tre punkter blev sammenlignet med målte data, se Figur 81. Punkter i konstruktionen, nummer 2 og 3, kunne vurderes direkte i simuleringen i HEAT2s post processer-vindue.



Figur 81: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen. Målt og simuleret temperaturer på punkt 1, 2 og 3 bliver sammenlignet med de målte for at tjekke om simuleringen svarer til virkeligheden.

Overfladetemperaturen, punkt nummer 1, blev læst fra en graf som plotter overfladetemperaturer langs omkredsen af modellen, se Figur 82. Kurven starter med det nederste venstre hjørne af modellen i Figur 81. De næste punkter er længde (x) og overfladetemperatur (y) for hvert segment af omkredsen, i en rækkefølge mod uret, hele vejen rundt. Temperaturen for den indvendige overflade af ruden er markeret med en rød ellipse i Figur 82.

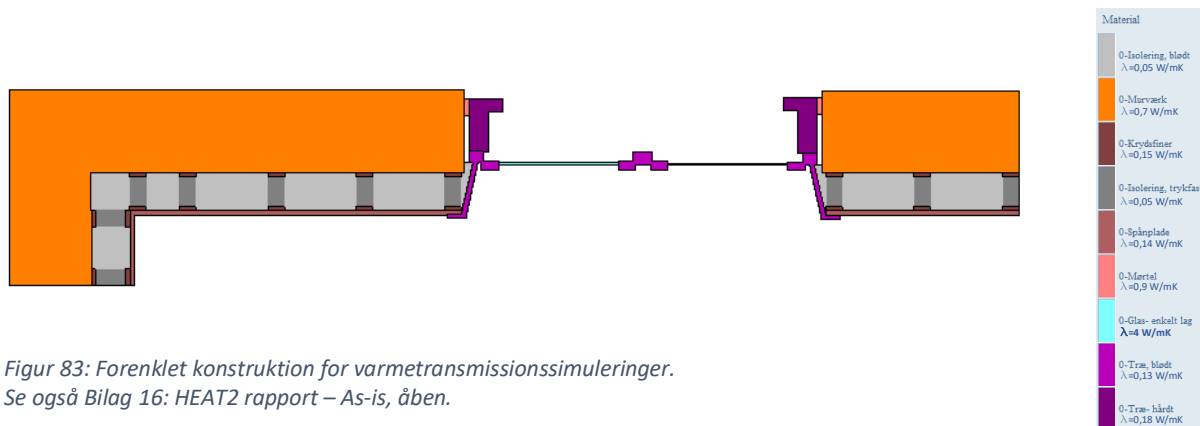


Figur 82: Overfladetemperaturer for konstruktionen vist i Figur 81. Den indvendige overflade for glasset er omkring 15 °C.

6.5.4. As-is-konstruktion, uden yderrude

6.5.4.1. Materialerne og opbygningen

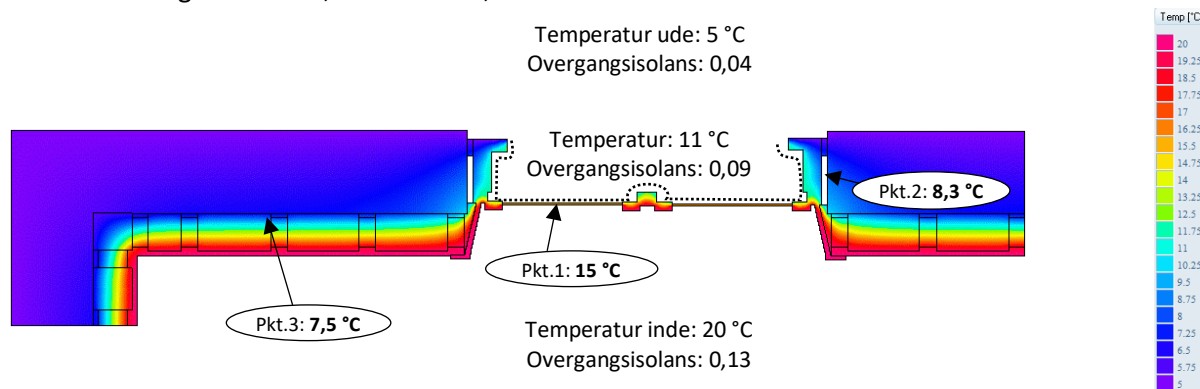
Simuleringen med yderruden på plads kunne være misvisende, fordi hulrummet imellem vinduet og forsatsvinduet faktisk er utæt. I virkeligheden er luftrummet svagt ventileret, som det skal være for at forhindre kondensdannelse på glasset i hulrummet. Modellen blev opbygget uden yderrude for at vurdere hvilken opbygning, der gav resultater, der var tættest på de virkelige målinger, se Tabel 23.



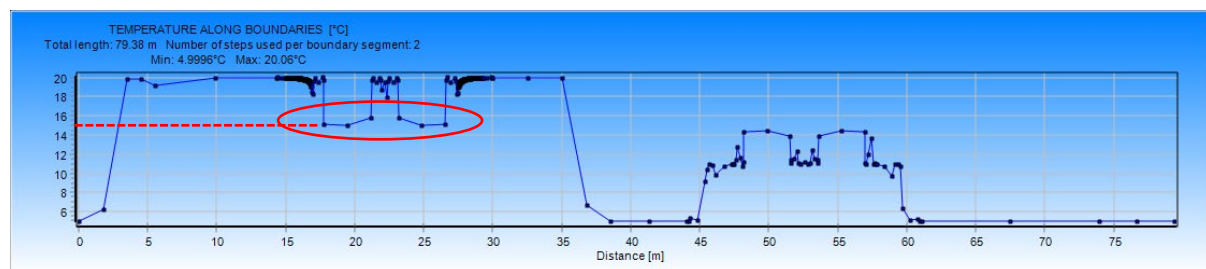
Figur 83: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringer.
Se også Bilag 16: HEAT2 rapport – As-is, åben.

6.5.4.2. Varmetransmission

For at simulere varmetransmission med et svagt ventileret hulrum, blev det yderste lag glas fjernet om og omkredsen for hulrummet defineret med andre temperaturer og overgangsisolanser end dem der blev brugt for de udvendige og indvendige overflader. Temperaturen, 11 °C, blev målt i hulrummet på en overskyet dag da det var 5 °C udendørs. Overgangsisolansen, 0,09, er taget fra DS418, Tabel 6.4.1, som giver en oversigt over overgangsisolanser for ikke-ventileret hulrum. Hulrummet er 150 mm, og overgangsisolansen er 0,18. Den værdi skal divideres med 2, fordi rummet er svagt ventileret, så får man 0,09.



Figur 84: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen. Målte og simulerede temperaturer på punkt 1, 2 og 3 bliver sammenlignet for at tjekke om simuleringen svarer til virkeligheden.



Figur 85: Overfladetemperaturer for konstruktionen vist i Figur 83. Den indvendige overflade for glasset er omkring 15 °C.

6.5.5. Sammenligning og vurdering af opbygninger for simuleringen

Temperaturerne fra simuleringer med og uden yderrude blev holdt op imod målte temperaturer fra samme position for at vælge simuleringemetoden, der kom tættest på virkeligheden, se Tabel 19.

Tabel 19: Temperaturforskelle mellem simuleret og målt, med simuleringmodeller som ses i Figur 80 og Figur 83.

Punktnummer og position	Temperatur, Målt (°C)	Temperatur, Simuleret, med yderrude (°C) (Figur 80)	Temperatur, Simuleret, uden yderrude, som ventileret hulrum (°C) (Figur 83)
1. Indvendig overflade, Forsatsvindue	16,7 ¹	15 ³	15 ³
2. I konstruktionen, bag lysningen	7,8 ²	8,5 ⁴	8,3 ⁴
3. I konstruktionen, i væggen	7,0 ²	7,5 ⁴	7,5 ⁴
Varmestrøm ⁵		290,06 W/m	295,46 W/m

1. Overfladetemperatur på glasset på punkt 1, blev målt på en overskyet dag da det var 5 °C udendørs

2. Gennemsnittet for målte temperaturer på punkt 2 og 3 er beregnet fra temperaturdatasensorerne fra perioden 15. oktober til 6. marts.

3. Temperaturer for punkt 1 blev taget fra HEAT2s outputkurver over overfladetemperaturer, se Bilag 15: HEAT2 rapport – As-is og Bilag 16: HEAT2 rapport – As-is, åben.

4. Temperaturer for punkt 2 og 3 blev taget fra simuleringresultat i HEAT2s post processer, se Bilag 15: HEAT2 rapport – As-is og Bilag 16: HEAT2 rapport – As-is, åben.

5. Varmestrøm blev taget fra HEAT2s resultater for simuleringen, se Bilag 15: HEAT2 rapport – As-is og Bilag 16: HEAT2 rapport – As-is, åben.

Temperaturerne for overfladen af ruden, punkt 1, er 15 °C i begge simuleringer. Temperaturerne for punktet bag lysningen, punkt 2, (8,5 og 8,3 °C) i opbygningen med yderrude ligger 0,7 °C over den målte, mens samme punkt i opbygningen uden yderrude ligger 0,5 °C over.

Temperaturerne i normalkonstruktionen, punkt 3, (7,5 °C) ligger indenfor 0,5 °C af de målte værdier i begge simuleringer, se Tabel 19.

Selvom begge simuleringer ligger tæt på de målte værdier, kunne simuleringen med yderruden på plads være misvisende mht. varmetransmissionen, da facadevinduet faktisk er utæt. Den forskel kan ses i den lidt lavere temperatur bag lysningen og lidt højere varmemestrømning målt i simuleringen uden yderrude, se Tabel 19.

Værdierne er meget tæt på hinanden, også varmemestrømmen, så opbygningen med svagt ventileret rum (uden ydervindue) bliver brugt som en basis for simuleringer af renoveringsforslag, da den afspejler de faktiske konditioner lidt bedre.

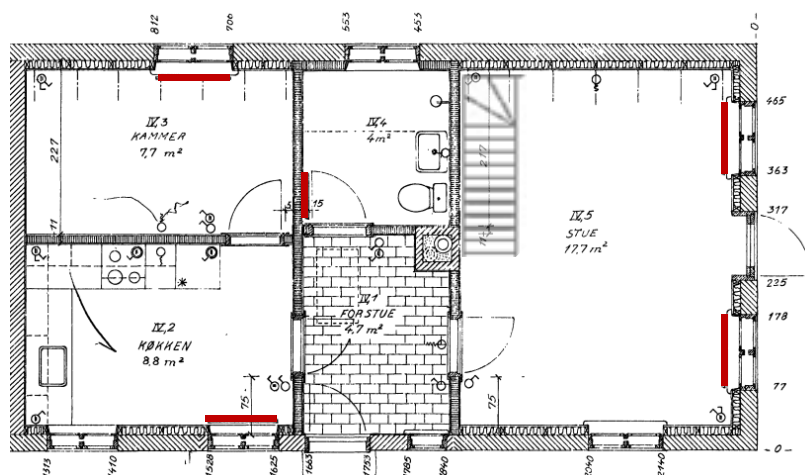
6.6. Temperaturforhold

6.6.1. Generelt

Lufttemperaturerne er behagelige, især på første sal. På stueetagen føles vægge og trægulve varme, mens karme ved vinduer og døre mærkes meget koldere. Der er mærkbare gener fra træk og kuldenedfald, og beboerne siger, at solindfald forårsager for høje temperaturer om sommeren, særligt på første sal. Luftbevægelser i boligen er især forårsaget af utætheder og kuldenedfald fra vinduer og døre og den åbne forbindelse fra stuen til 1. sal, hvor der er et ovenlysvindue, som ofte står på klem.

Der er to døre og otte vinduer på stueetagen og et vindue samt to ovenlysvinduer på første sal. Vinduerne er en blanding af koblede vinduer og forsatsvinduer med de oprindelige facadevinduer. Alle vinduer har kernetræ som ramme-karmkonstruktion, og alle vinduer har enkeltlagsglas i hver ramme. På forsatsrammer på vinduet i indgangen og i soveværelset er der skruet et ekstra lag akrylglas på den gående ramme. Glasset er sat i rammerne med kit. Ruderne er gennemsigtigt, klart glas. De to ovenlysvinduer har metalrammer og er tolagsglas. Vinduer i gavlen har ingen solafskærmning/udhæng, mens dem på langs af bygningen har 600 mm udhæng, der er 900 mm oppe fra et punkt midt på ruden. Vinduerne i den sydvestlige ydervæg har i øvrigt en bygning og et træ overfor, der giver en øget skyggefaktor.

I stuen, hvor forsøgsområdet ligger, er der en dør og tre vinduer. Vinduer er udført med forsatsvinduer med gående indvendige og udvendige rammer. Yderrammer er meget utætte, da de ikke lukker helt til. Vinduerne er især udsatte på gavlsiden, og malingen falmer ekstra her. Døren er udført som koblet, og fremstår meget utæt ved dørtærsklen og åbningssiden. Den er også udsat ved dens placering i gavlen. Der er radiatorer under to ud af tre vinduer i stuen, se Figur 86.

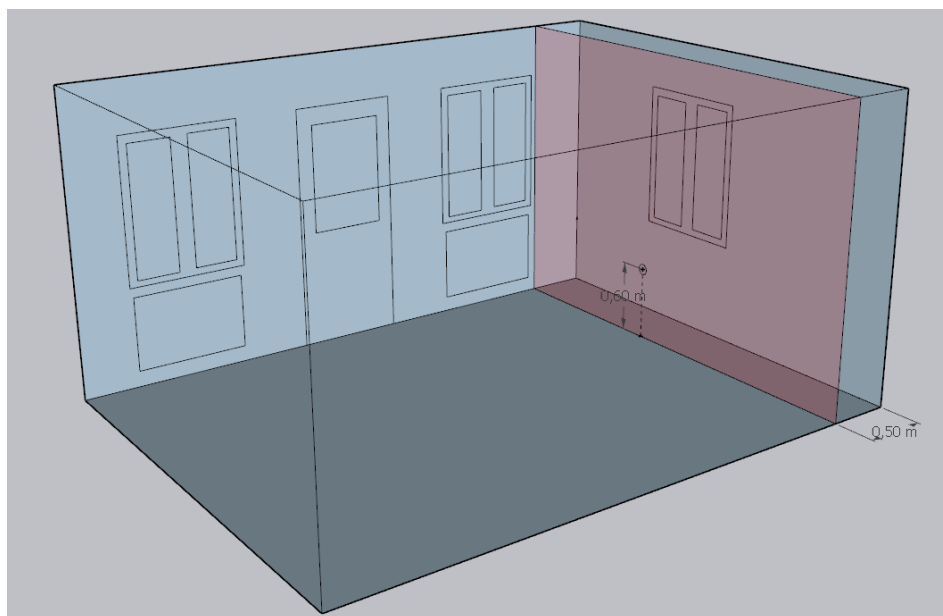


Figur 86: Gammel Lundtoftevej 34C, diagram med placering af radiatorer.

6.6.2. Stråling

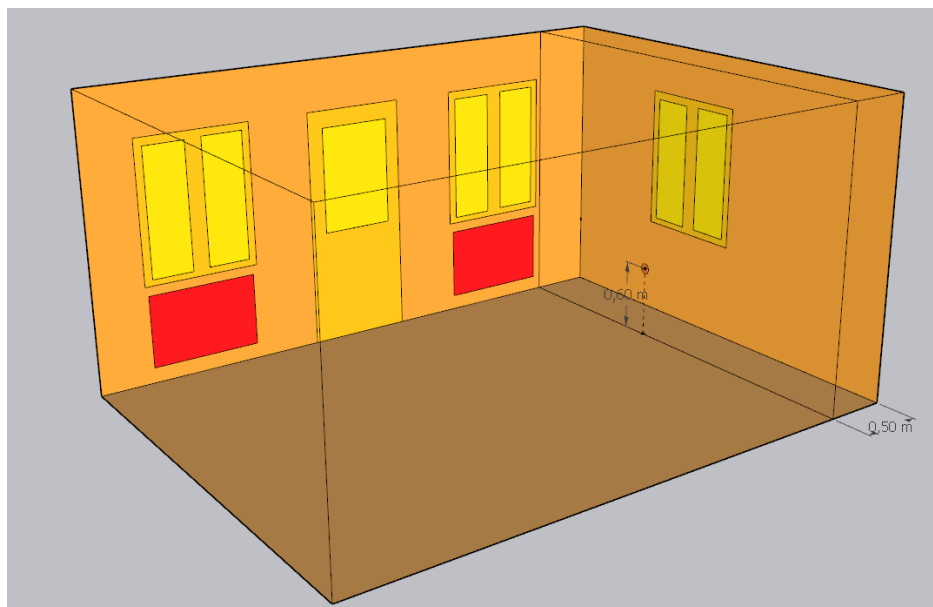
Strålingsasymmetrien beregnes for stuen for at få en fornemmelse for, hvor meget overfladetemperaturerne for vinduer påvirker den termisk komfort. Overflader der er med i beregningen, dækker hele stuen, dvs. alle fire vægge, gulvet og loftet.

Positionen for middelstrålingstemperatur er defineret som foran vinduet i forsøgsområdet, 0,6 m fra gulvet. Skæringsfladen for at beregne strålingstemperatursymmetri går igennem samme punkt, parallelt med vinduet, se Figur 87.



Figur 87: Referencepunkt og referenceflade brugt til beregning af hhv. middelstrålingstemperatur og strålingstemperatursymmetri.

Overfladetemperaturerne for bestemmelse af middelstrålingstemperatur og strålingsasymmetri er vist i Figur 88 og Tabel 20.



Figur 88: Overfladetemperaturfordeling på indvendige overflader.

Tabel 20: Overfladetemperaturer for beregning af middelstrålingstemperatur og strålingsasymmetri.

Overflade	Temperatur, t (°C)
Glas	12
Kolde træværk (rammer til vinduer og træpaneler i døren)	15
Vægge	19
Radiatorer	50
Loft	20
Gulv	18

Middelstrålingstemperatur, (t_r) for as-is-konstruktion er: **14,4 °C**

Strålingstemperaturasymmetri, (Δt_{pr}) for as-is-konstruktion er: **3,0 °C**, som giver **0%** utilfredse.

Operativ temperatur, (t_o), med lufttemperatur 20 °C for as-is-konstruktionen er: **17,5 °C**

Se Bilag 18: Strålingstemperaturer og asymmetri for detaljer om beregningen.

7. Resultater: Renoveringsforslag

Bygningen er bevaringsværdig, hvilket i dette tilfælde betyder at renoveringer ikke må ændre det udvendige udseende. Der blev hverken fundet tegn på skimmelsvampevækst eller fugtophobning under tilstandsvurderingen, ej heller ifølge beregningerne. Tilstandsvurderingen viste problemer med temperatur og træk, med delelementer: kuldenedfald, lufthastighed, turbulensintensitet og strålingsasymmetri. Disse negative effekter på termisk komfort kunne forbedres med etablering af sammenhængende tæthedsplan og øgning af overfladetemperaturerne, så renoveringsforslag der etablerer tæthedsplanen og forbedrer vinduerne bliver præsenteret her.

Etablering af tæthedsplanet bliver foreslået i to hovedkategorier med underelementer / optioner: tætning af samlinger mellem bygningsdele og tætning og efterisolering af væggen. Tætning af vindueskonstruktioner bliver en naturlig del af forbedring af vinduerne, hvilket bliver foreslået i det næste afsnit, som har fokus på øgning af overfladetemperaturer.

Forslag til etablering af tæthedsplanet bliver udtænkt og præsenteret med fokus på deres bygbarhed, da nøje udførsel er kritisk for den endelig tæthedsgrad. Risikoen for skimmelsvampevækst bliver også vurderet.

Facadeforslag er:

- **Tætning af samlinger mellem bygningsdele**
 - Tætning mellem vindueskarm og vægkonstruktion (facadeforslag 1, afsnit 7.2.1)
 - Tætning mellem tagfod og væg / bjælkeender (facadeforslag 2, afsnit 7.2.2)
 - Tætning langs fodpanelerne ved soklen (facadeforslag 3, afsnit 7.2.3)
- **Tætning og efterisolering af væggen**
 - Ny dampspærre og fibergips (facadeforslag 4, afsnit 7.2.4.1)
 - Ny dampspærre og skift af isolering (facadeforslag 4a, afsnit 7.2.4.2)
 - Ny dampspærre, skift af isolering og efterisolering (facadeforslag 4b, afsnit 7.2.4.3)

Øgning af overfladetemperatur bliver foreslået primært ved forbedringer til vinduer, da deres overfladareal og temperatur har stor påvirkning på middelstrålingstemperaturer og strålingsasymmetrier. Forbedringer til vinduer mht. øgning af overfladetemperaturer har også den fordel at vindueskonstruktioner også bliver en del af tæthedsplanet. Selv om lokalplanen kræver at facadeglas er enkeltlagsglas med kittet fals, er der stadig måder hvorpå vinduerne kan forbedres betydeligt. Præsentationen af forslagene har fokus på deres termiske egenskaber og vægter simulering af varmetransmission og de endelig overfladetemperaturer. Risikoen for skimmelsvampevækst bliver også vurderet.

Vinduesforslag er:

- **Forbedringer til forsatsvinduer**
 - Forsatsvindue med termorude (vinduesforslag 1, afsnit 7.3.1)
 - Forsatsvindue med termorude med energibelægning (vinduesforslag 2, afsnit 7.3.2)
- **Konvertering til koblede løsninger (uden forsatsvinduer)**
 - Koblet vindue med to lag enkeltlagsglas (vinduesforslag 3, afsnit 7.3.3)
 - Koblet vindue med et lag enkeltlagsglas og et lag dobbeltlagsglas (vinduesforslag 4, afsnit 7.3.4)

Næsten alle forslag mindsker termisk transmittans igennem klimaskærmen, så en oversigt over varmeoverførselskoefficienter (U-værdierne), som renoveringsforslagene bidrager med, ses i Tabel 21.

Tabel 21: Oversigt over varmeoverførselskoefficienter (U-værdier) som de forskellige renoveringsforslag bidrager med. Den giver en oversigt over påvirkningen af renoveringsforslagene på klimaskærmens termiske evner.

Forslag	U-værdi (W/m ² ·K)
As-is-konstruktion: væg	0,37
Facadeforslag 4: Ny dampspærre og fibergips (afsnit 7.2.4.1)	0,37
Facadeforslag 4a: Ny dampspærre og skift af isolering (afsnit 7.2.4.2)	0,26
Facadeforslag 4b: Ny dampspærre, skift af isolering og efterisolering (afsnit 7.2.4.3)	0,19
As-is-konstruktion: vinduer	5,9
Vinduesforslag 1: Forsatsvindue med termorude (afsnit 7.3.1)	2,7
Vinduesforslag 2: Forsatsvindue med termorude med energibelægning (afsnit 7.3.2)	1,6
Vinduesforslag 3: Koblet vindue med to lag enkeltlagsglas (afsnit 7.3.3)	1,8
Vinduesforslag 4: Koblet vindue med et lag enkeltlagsglas og et lag dobbeltlagsglas (afsnit 7.3.4)	1,3

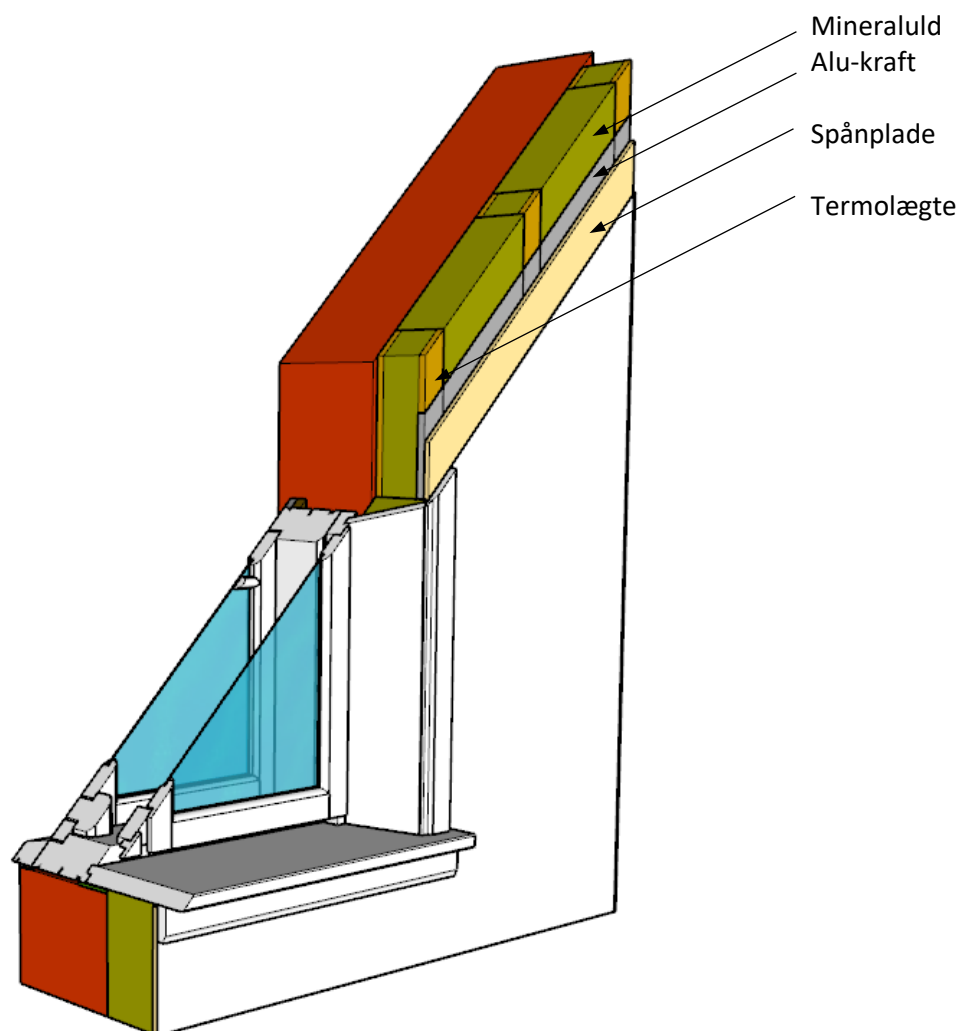
Oversigten over alle data, der anbefales som vurderingsgrundlag for renoveringsforslagene, kan ses i Tabel 23, i afsnit 8.1: Vurderingsparametre for renoveringsforslag.

7.1. As-is-konstruktion

As-is-konstruktionen er vist her som sammenligningsreference for renoveringsforslag, se Figur 89.

Materialespecifikationer for fugtsimuleringen i WUFI, se oversigten i afsnit 7.2.5:

- Mineraluld: 95 mm, λ -værdi: 0,050 W/m·K, μ -faktor = 1,3
- Alu-kraft: sd-værdi 50 m
- Spånplade: 12 mm, λ -værdi: 0,050 W/m·K, μ -faktor = 165
- U-værdi for normalkonstruktion af væggen: 0,37 W/m²K



Figur 89: As-is-konstruktion

7.2. Facadeforslag

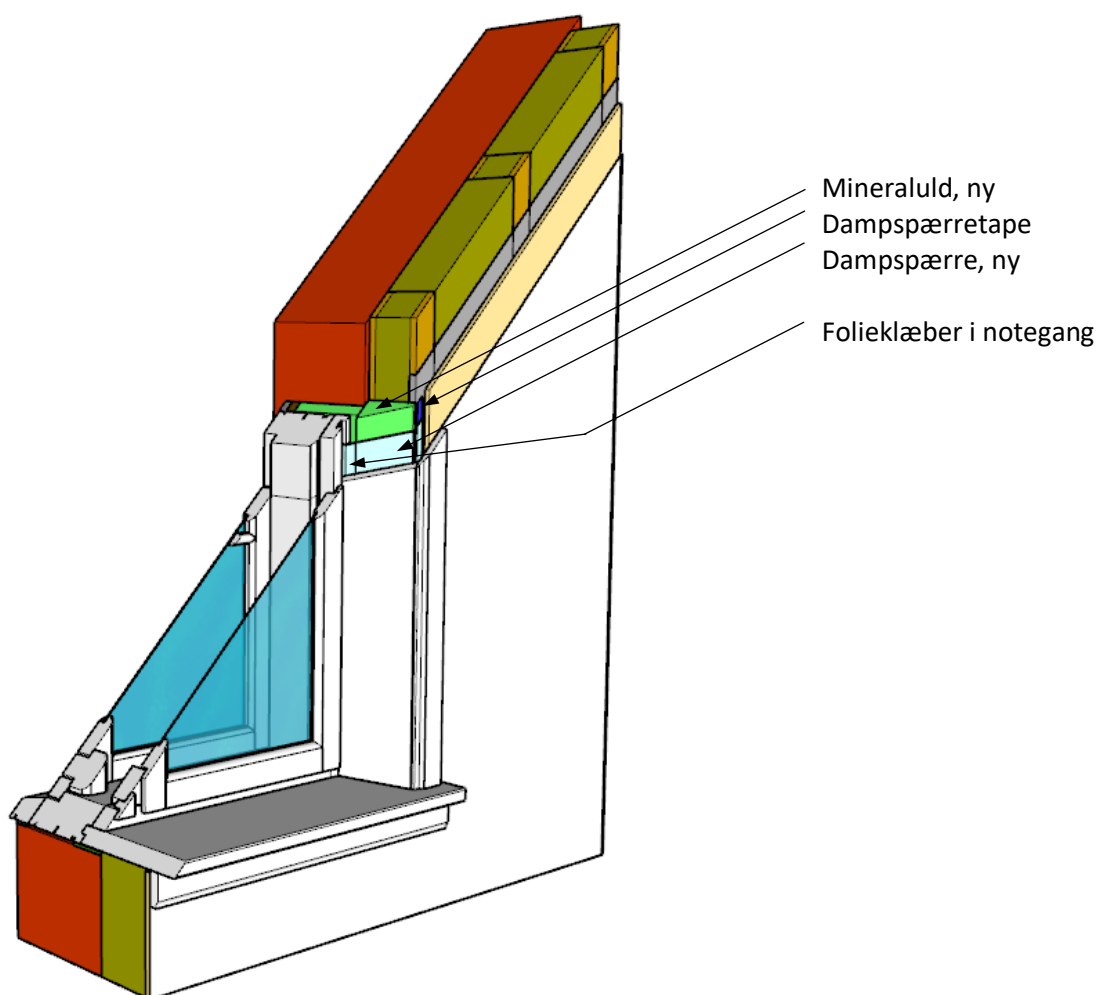
Facadeforslag afdækker tiltag for at etablere et tæthedsplan. Der er fire renoveringsforslag, der omhandler tætning af samlinger mellem bygningsdele og tætning af vægkonstruktionen.

7.2.1. Facadeforslag 1: Tætning mellem vindueskarm og vægkonstruktion

Løsningen handler om tætning mellem eksisterende vinduer og eksisterende alu-kraft.

Demontering: Eksisterende lysninger afmonteres, og den gamle isolering fjernes langs lysningen. Afsluttes med grundig støvsugning for at fjerne organiske materialer.

Konstruktionsopbygning: Bagstopning etableres mellem eksisterende karm og murværk. Kileskåret isolering tilpasses omkring termolægte / murværk mod placering af ny lysning. Termolægte og notegang i vindueskarm primes. Etablering af dampspærren i lysning tapes mellem overgangen ved dampspærre og eksisterende alu-kraft. Dampspærren fuges med folieklæber i notegang. Ny lysning, vinduesplade samt gerigt monteres. Afsluttes med maling. Se Figur 90.



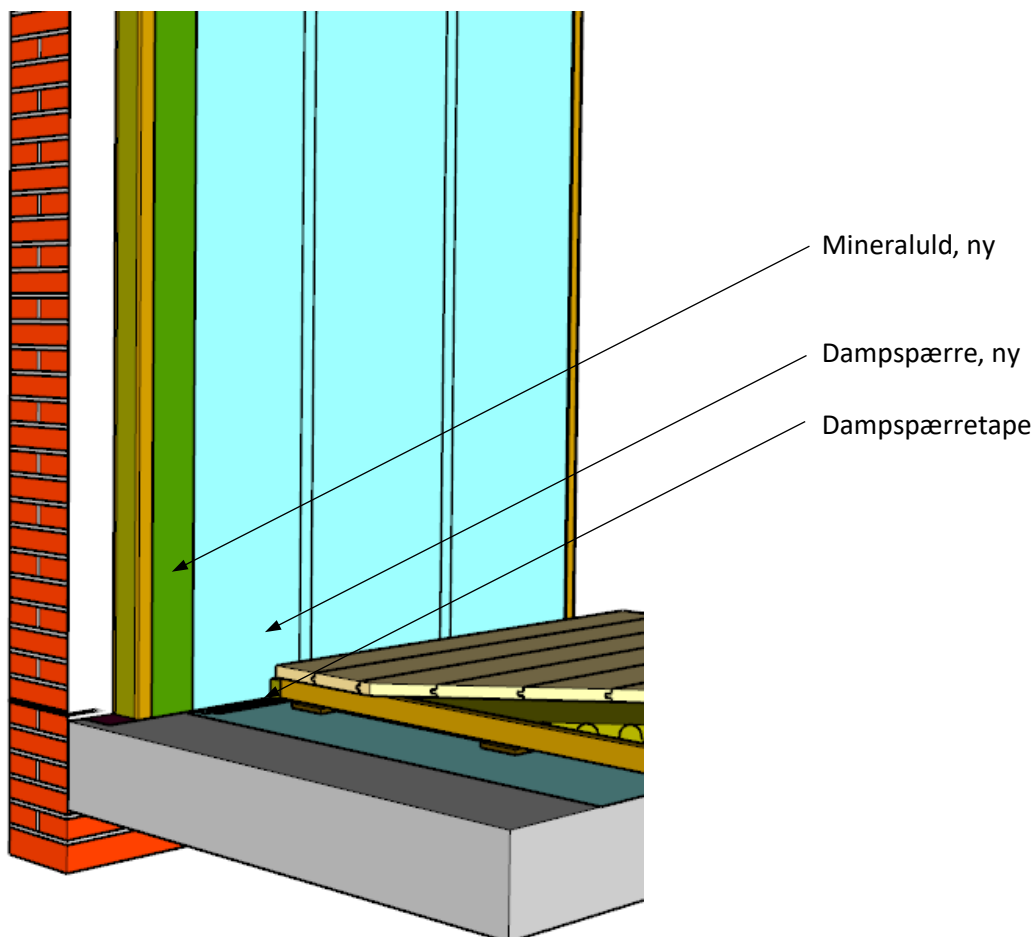
Figur 90: Skitseforslag for tætning mellem vindueskarm og vægkonstruktion.

7.2.3. Facadeforslag 3: Tætning langs fodpanelerne ved soklen

Løsningen handler om at opbygge et nyt tæthedspan, som monteres mod tilstødende bygningsdele ved gulve.

Demontering: Eksisterende spånplade, fodpaneler og alu-kraft afmonteres. Gamle isoleringsmaterialer fjernes mellem termolægterne. Efter afmonteringen gennemses den eksisterende pudslag på ydervæggen for revner, sprækker og løs puds. Evt. skader udbedres med kalkmørtel. Langs gulvet skæres gulvbrædder 60 mm fra termolægterne. Afsluttes med grundig støvsugning for at fjerne organiske materialer.

Konstruktionsopbygning: Ny isolering tilpasses mellem eksisterende termolægter. Ny dampspærre monteres på eksisterende termolægter. Alle samlinger udføres på fast underlag og tapes. Ny dampspærre monteres på den eksisterende fugtspærre (PE-folie). Ny isolering udlægges langs gulkanten. Se Figur 92.



Figur 92: Skitseforslag for tætning langs fodpanelerne ved soklen

7.2.4. Facadeforslag 4, 4a og 4b: Tætning og efterisolering af væggen

Forskellige muligheder for tætning af væggen blev skitseret i afsnit med og uden efterisolering og derefter vurderet for risiko for skimmelsvampevækst. Facadeforslag 4, 4a og 4b vil udføres sammen med tætningen af samlinger (forslag 1, 2 og 3) så vidt muligt.

7.2.4.1. Facadeforslag 4: Ny dampspærre og fibergips

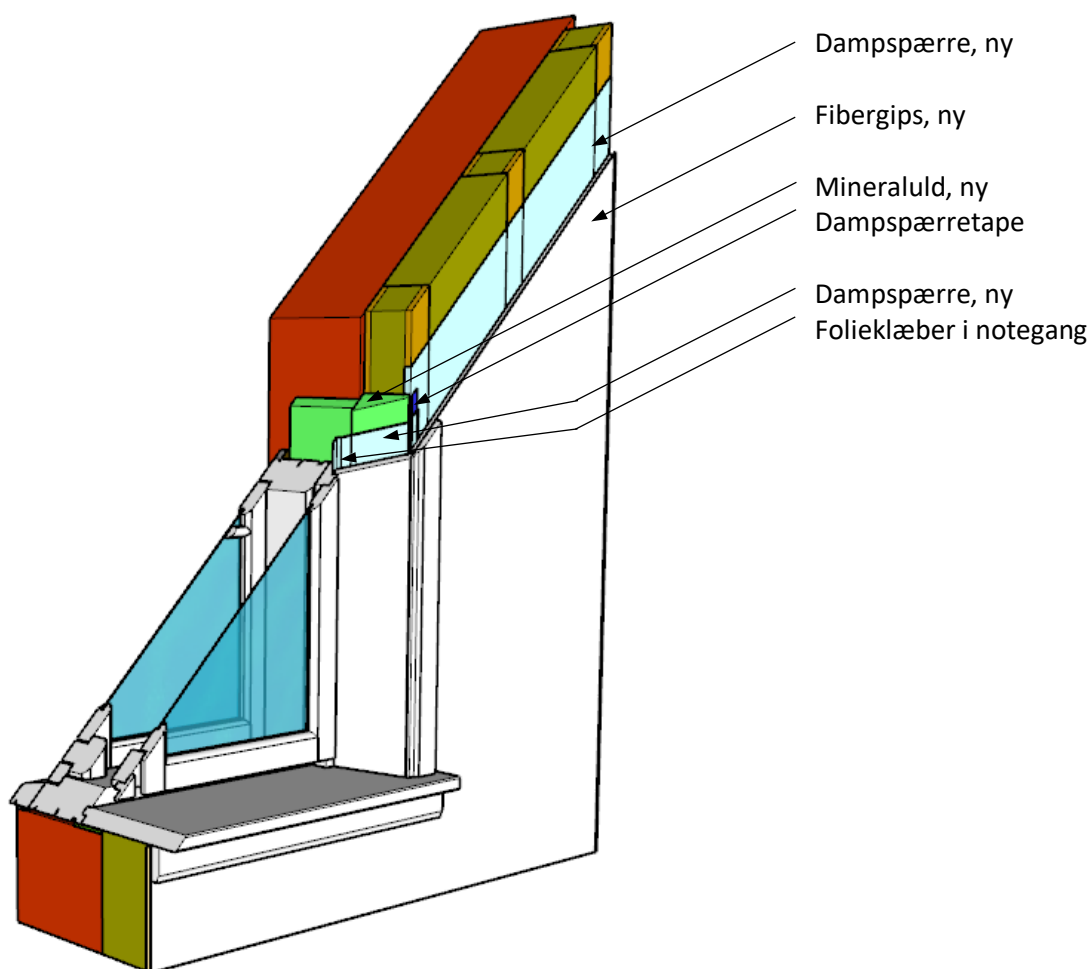
Løsningen handler om at skifte den gamle dampspærre ud med ny og at erstatte spånpladen med fibergips.

Demontering: Eksisterende spånplade, fodpaneler og alu-kraft afmonteres.

Konstruktionsopbygning: Ny dampspærre monteres på eksisterende termolægter. Alle samlinger udføres på fast underlag og tapes. Alle installationer skal afsluttes som Fuga Air dåser, som er vindtætte. Se Figur 93.

Materialespecifikationer for fugtsimuleringen af renoveringsforslag i WUFI, se afsnit 7.2.5:

- Mineraluld: 95 mm, λ -værdi: 0,050 W/m·K, μ -faktor = 1,3
- PE-folie: sd værdi 50
- Fibergips: 15 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 16
- U-værdi for normalkonstruktion af væggen: 0,26 W/m²K



Figur 93: Skitseforslag for ny dampspærre og fibergips.

7.2.4.2. Facadeforslag 4a: Ny dampspærre og skift af isolering

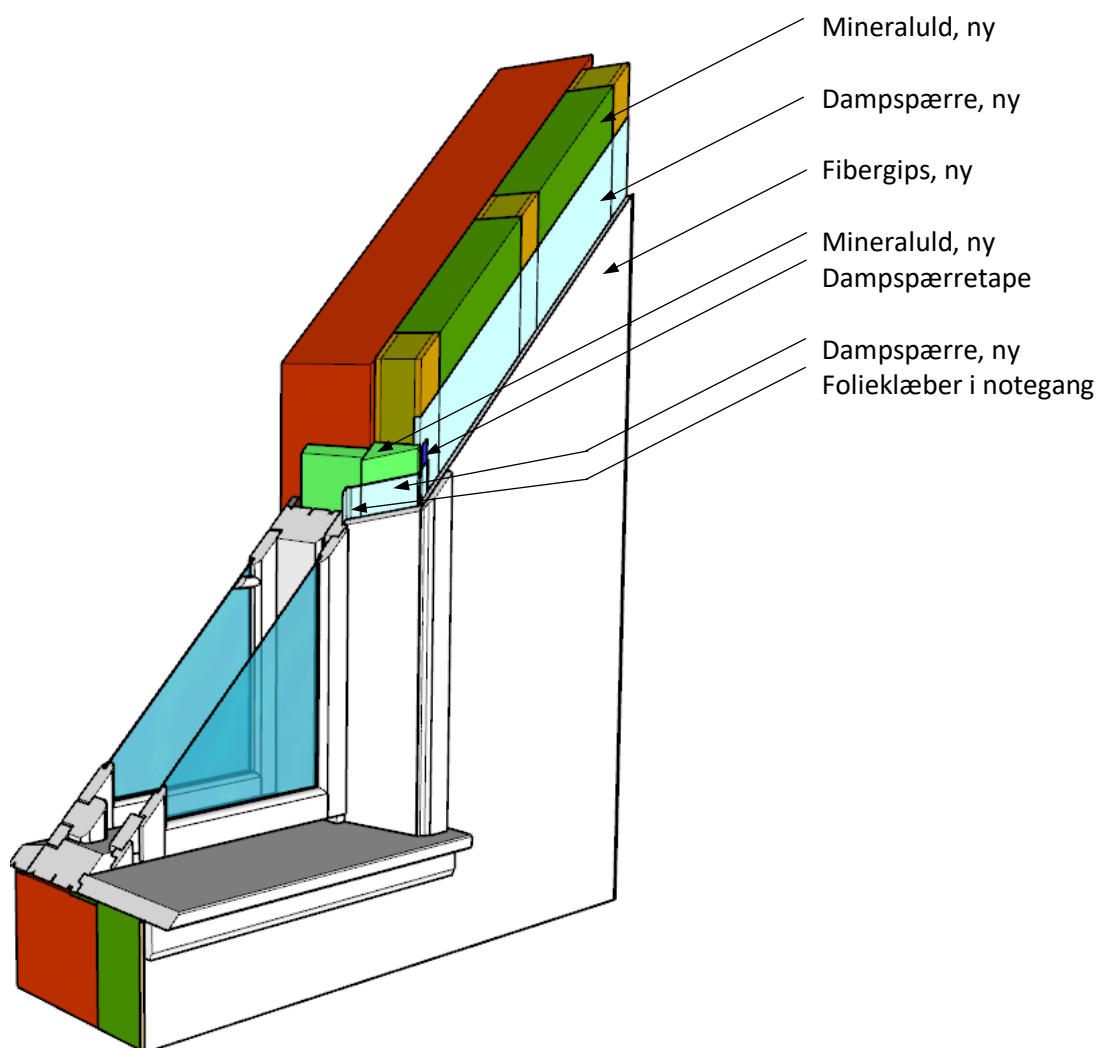
Løsningen handler om at skifte den gamle dampspærre og isolering mellem termolægterne ud med ny og at erstatte spånpladen med fibergips.

Demontering: Eksisterende spånplade, fodpaneler og alu-kraft afmonteres. Gamle isoleringsmaterialer fjernes mellem termolægterne. Efter afmonteringen gennemses det eksisterende pudslag på ydervæggen for revner, sprækker og løs puds. Evt. skader udbedres med kalkmørtel. Afsluttes med grundig støvsugning for at fjerne organiske materialer.

Konstruktionsopbygning: Ny isolering tilpasses mellem eksisterende termolægter. Ny dampspærre monteres på eksisterende termolægter. Alle samlinger udføres på fast underlag og tapes. Alle installationer skal afsluttes som Fuga Air dåser, som er vindtætte. Se Figur 94.

Materialespecifikationer for fugtsimuleringen af renoveringsforslag i WUFI, se oversigten i afsnit 7.2.5.

- Mineraluld: 95 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 1,3
- PE-folie: sd-værdi 50 m
- Fibergips: 15 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 16
- U-værdi for normalkonstruktion af væggen: 0,19 W/m²K



Figur 94: Skitseforslag for ny dampspærre og skift af isolering.

7.2.4.3. Facadeforslag 4b: Ny dampspærre, skift af isolering og efterisolering

Løsningen handler om at skifte den gamle dampspærre og isolering mellem termolægterne ud med ny, tilføje 45mm ekstraisolering og at erstatte spånpladen med fibergips.

Demontering: Eksisterende spånplade, fodpaneler og alu-kraft afmonteres. Gamle isoleringsmaterialer fjernes mellem termolægterne. Efter afmonteringen gennemses det eksisterende pudslag på ydervæggen for revner, sprækker og løs puds. Evt. skader udbedres med kalkmørtel. Afsluttes med grundig støvsugning for at fjerne organiske materialer.

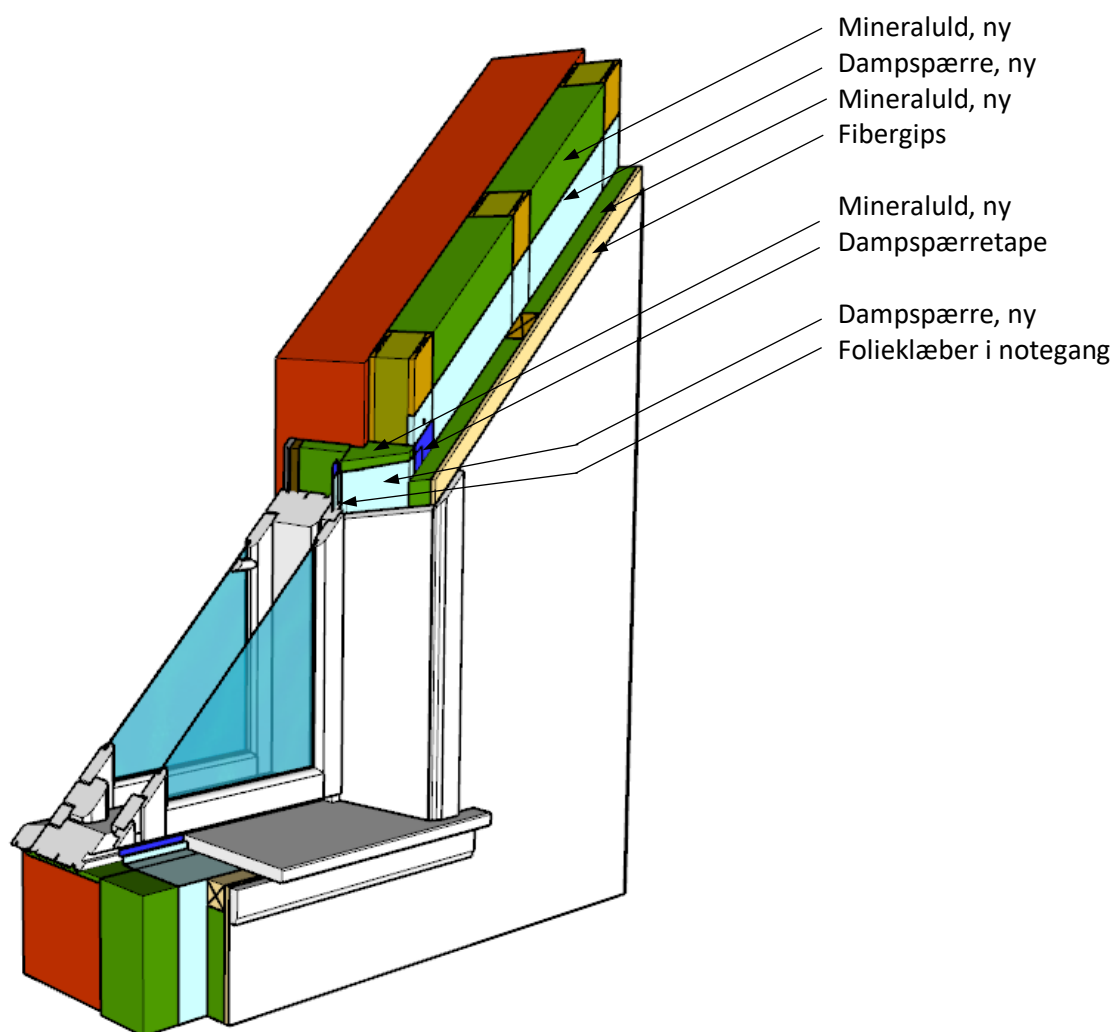
Konstruktionsopbygning: Ny isolering tilpasses mellem eksisterende termolægter. Ny dampspærre monteres på de gamle termolægter. Alle samlinger udføres på fast underlag og tapes.

Installationslag udføres med 45x45 reglar. 45 mm mineraluld tilpasses mellem reglarne. Se Figur 95.

Tætning mod loft, se Figur 91. Tætning mod gulv, se Figur 92.

Materialespecifikationer for fugtsimuleringen af renoveringsforslag i WUFI, se afsnit 7.2.5:

- Mineraluld: 95 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 1,3
- PE-folie: sd-værdi 50 m
- Mineraluld: 45 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 1,3
- Fibergips: 15 mm, λ -værdi: 0,032 W/m·K, μ -faktor = 16



Figur 95: Skitseforslag for ny dampspærre og skift af isolering og efterisolering

7.2.5. Risiko for skimmelsvampevækst for facadeforslag 4, 4a og 4b

Dynamiske simuleringer over en treårig periode blev lavet for renoveringsforslag 4, 4a og 4b. Simuleringerne blev lavet for både en tæt dampspærre og en utæt dampspærre (med utæthedegrad/luftskift af 0,2/h igennem dampspærren) for at trykteste renoveringsforslagene ved fremtidige skader til dampspærren. For resultater, se Tabel 22.

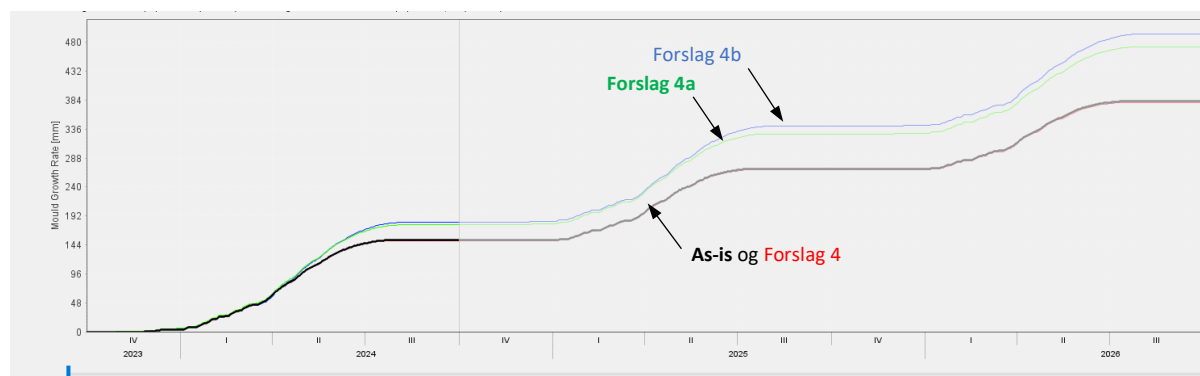
Generelt kan man konstatere at ingen af forslagene indebærer risiko for skimmelsvampevækst, medmindre dampspærren bliver utæt. Hvis dampspærren bliver utæt, påviser simuleringerne, at løsninger med efterisolering har en risiko for skimmelsvampevækst. For de fulde resultater kan man referere til Bilag 11: WUFI-rapporter.

Tabel 22: Oversigt over risiko for skimmelsvampevækst for as-is-konstruktionen og de tre forskellige løsningsforslag for tætning af dampspærren, med tæt og utæt dampspærre.

Løsning	100% tæt dampspærre	0,2/h utætheder i dampspærren
As-is	Nej	Ja
Forslag 4: Ny dampspærre og fibergips	Nej	Ja
Forslag 4a: Ny dampspærre og skift af isolering	Nej	Ja
Forslag 4b: Ny dampspærre, skift af isolering og efterisolering	Nej	Ja

Simuleringer i WUFI Bio viser heller ikke risiko for skimmelsvampevækst for løsningerne, så længe dampspærren holdes tæt, se Tabel 22.

Hvis dampspærren får selv små utætheder, bliver risikoen for skimmelsvampevækst værre end det er i as-is-konstruktionen, se Figur 96. Grafen, som plotter mm af skimmelsvampevækst på y-aksen og en treårig periode på x-aksen, viser en stigende akkumulering af skimmelsvampevækst for as-is-konstruktion og alle renoveringsforslag, hvis der er utætheder. Akkumuleringen bliver værre med højere isoleringsgrad.

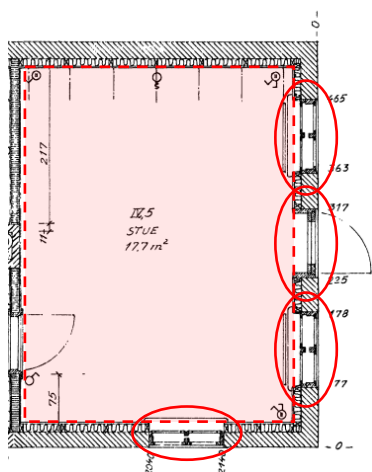


Figur 96: Sammenligning af forskellige forslag til renovering af facade med utætheder ift. risiko for skimmelsvampevækst. Grafen plotter mm af skimmelsvampevækst på y-aksen og en treårig periode på x-aksen. Den viser en skalerende akkumulering af skimmelsvampevækst, der bliver værre med højere isoleringsgrad. Farverne: Sort er As-is, se afsnit 6.4.2.3. Rød er Forslag 4, se afsnit 7.2.4.1. Grøn er Forslag 4a, se afsnit 7.2.4.2. Blå er Forslag 4b, se afsnit 7.2.4.3.

Derfor anbefales forslag 4b, som giver ekstra isolering, men, endnu vigtigere, beskytter dampspærren mod evt. fremtidige punkteringer.

7.3. Vinduesforslag

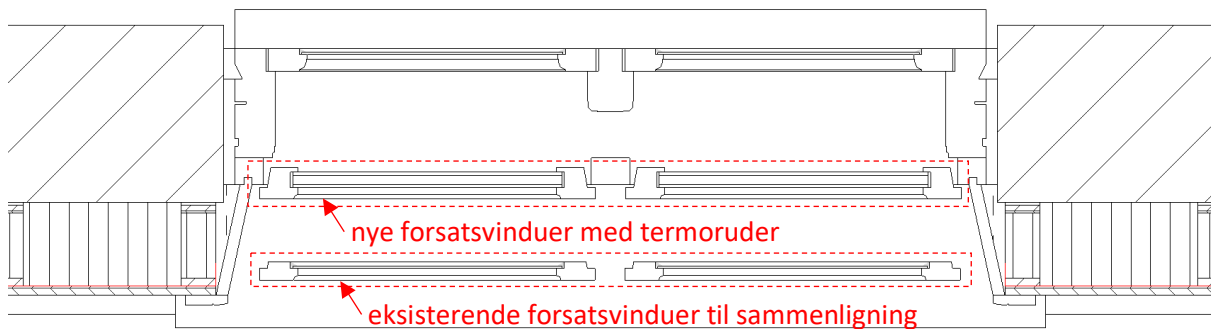
For at tætne vindueskonstruktionen og øge temperaturer på vinduesoverflader er der lavet fire renoveringsforslag for vinduer, der omhandler forbedringer af forsatsvinduer (forslag 1 og 2) og udskiftning af kassevinduer med en koblet løsning (forslag 3 og 4). Middelstrålingstemperatur, strålingsasymmetri og operative temperatur blev beregnet for hver løsning, for hele stuen, baseret på at skifte alle vinduer i stuen til den pågældende løsning og opgradere terrassedøren, men uden tillæg til vægkonstruktion, se Figur 97 og Bilag 18: Strålingstemperaturer og asymmetri for detaljer om beregningen.



Figur 97: Stuen med de tre vinduer og terrassedøren, der blev skiftet ud for at beregne resulterende middelstrålingstemperatur, strålingsasymmetri og operative temperatur for hvert vinduesforslag.

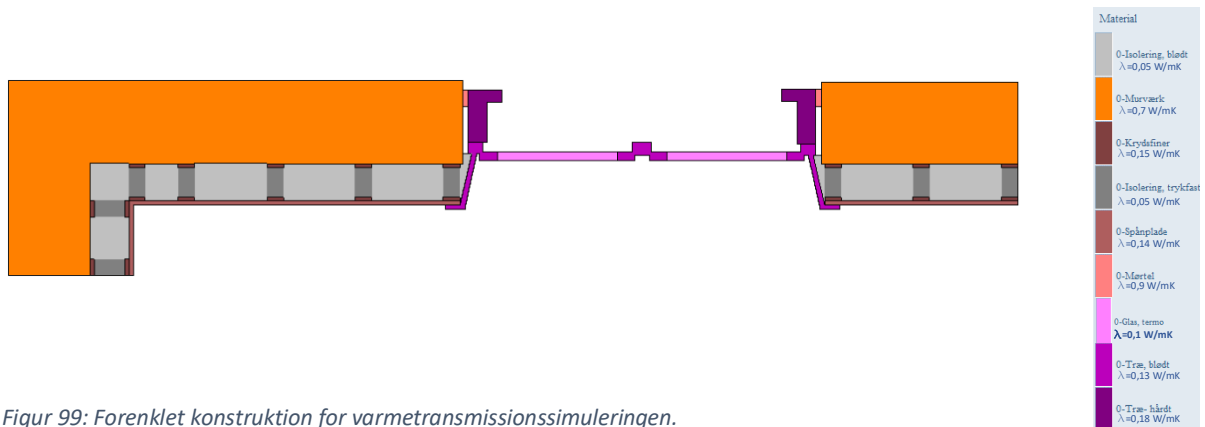
7.3.1. Vinduesforslag 1: Forsatsvindue med termorude

En måde at forbedre det termiske indeklime vil være at erstatte de nuværende forsatsvinduer, som har enkeltlagsglas, med forsatsvinduer med termoruder, se Figur 98.



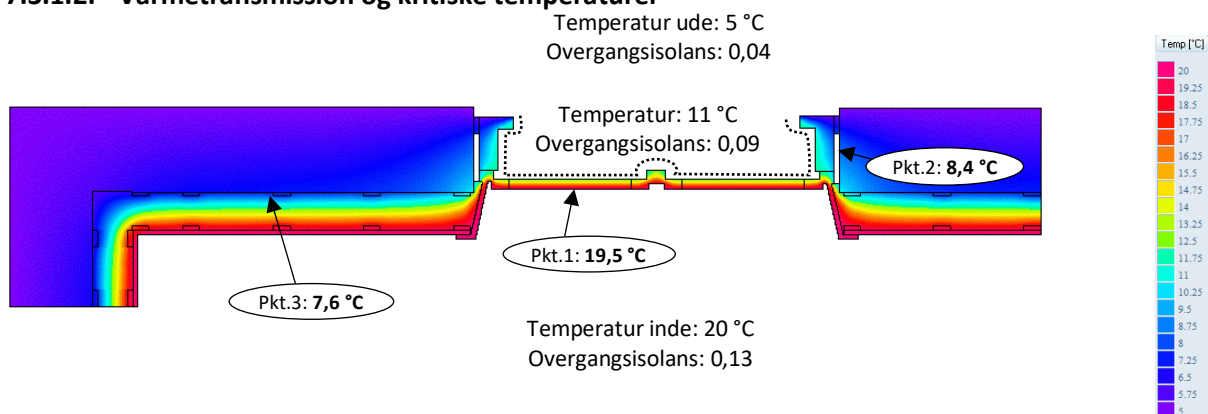
Figur 98: Skitseforslag for nye forsatsvinduer. De eksisterende forsatsvinduer med enkeltlagsglas kunne erstattes med forsatsvinduer med termoruder.

7.3.1.1. Opbygningen af simuleringsmodel



Figur 99: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringen.
Se Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag.

7.3.1.2. Varmetransmission og kritiske temperaturer



Figur 100: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen.

Middelstrålingstemperatur, (t_r): 15,4 °C

Strålingstemperatrasymmetri, (Δt_{pr}): 2,7 °C, som giver 0% utilfredse.

Operativ temperatur, (t_o), med lufttemperatur 20 °C: 17,7 °C

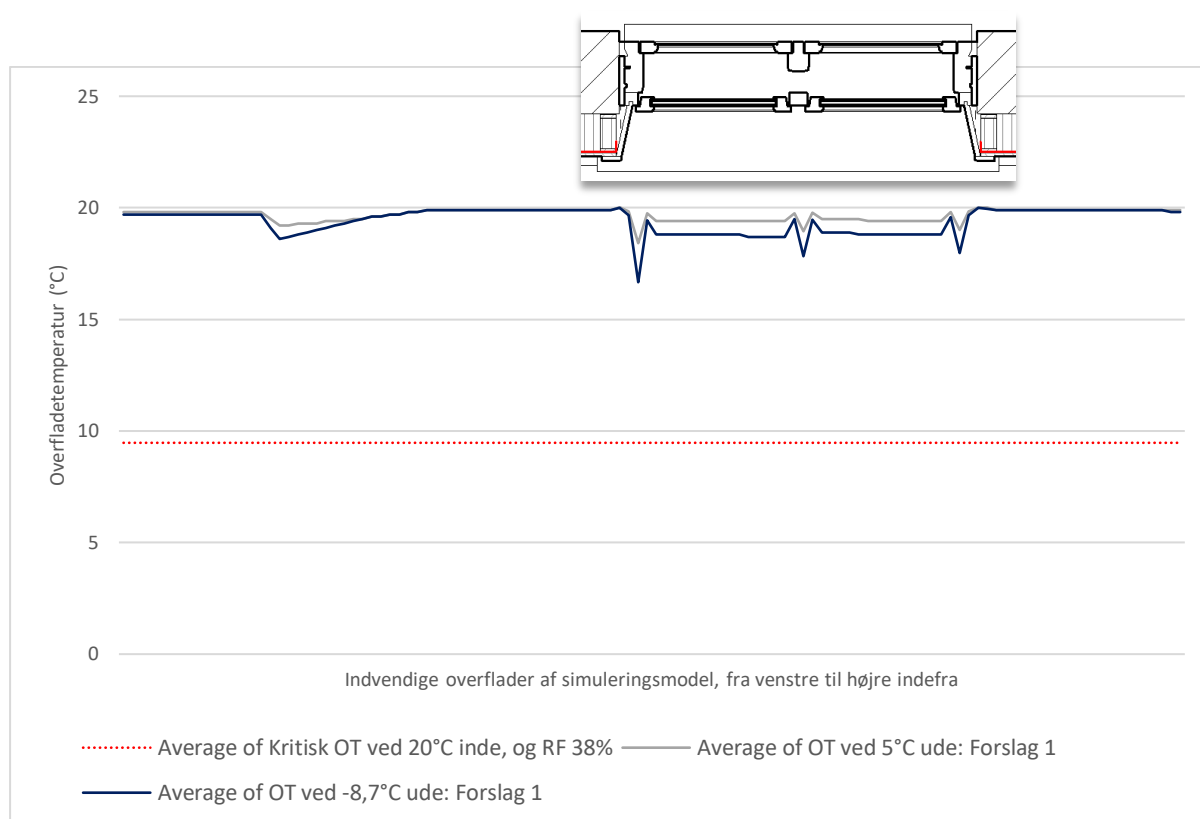
7.3.1.3. Risiko for skimmelsvampevækst

Der påvises ikke risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader med simuleringen i HEAT2 for forslag 1, hvilket kan ses i Figur 101. Alle data brugt til vurderingen kan ses i: Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.

Data for risikovurderingen er:

- samme udetemperatur som dagen for blower door test/ termografering: **5 °C**
- laveste døgnmiddel udendørstemperatur (februar): **-8,7 °C**
- kritisk overfladetemperatur: **9,5 °C**
(beregnet fra februars gennemsnitlige relativ fugtighed 38% og indetemperatur 20 °C)

For at orientere sig om hvor temperaturerne forekommer på den indvendige overflade, er en skitse af konstruktionen klippet ind lodret over det mest kritiske område.



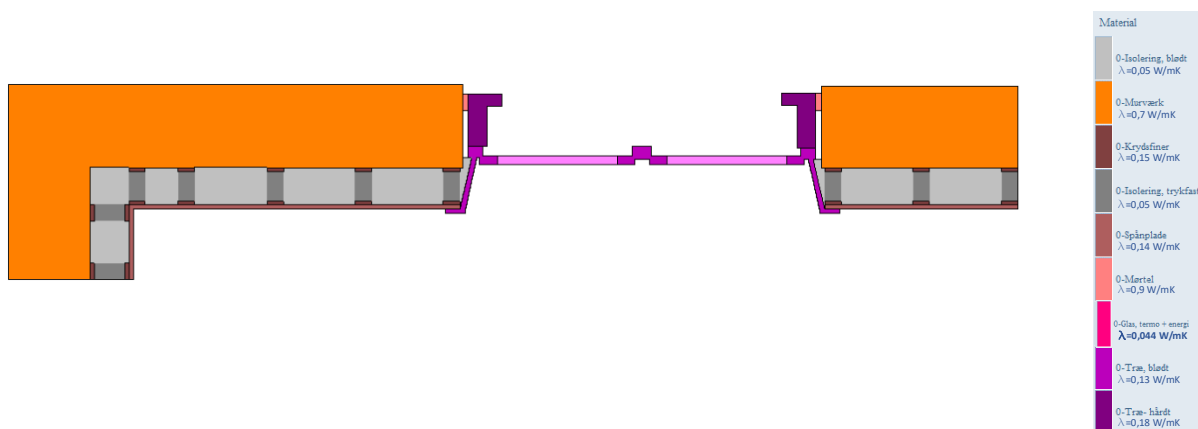
Figur 101: Forslag 1: Enkeltlagsforsatsrude erstattet med termorude, simuleret ved 5 °C og -8,7 °C. Overfladetemperaturer (OT) simuleret både ved 5 °C og -8,7 °C udendørs blev plottet relativ til en kritisk overfladetemperatur for at vurdere, om der er risiko for skimmelsvampevækst. Kurverne viser ingen risiko. Skitse af konstruktionen er indsat for orientering.

Hvis utæthederne ikke forbedres, kunne der være nogle områder hvor temperaturerne kommer under den kritiske.

7.3.2. Vinduesforslag 2: Forsatsvindue med termorude med energibelægning

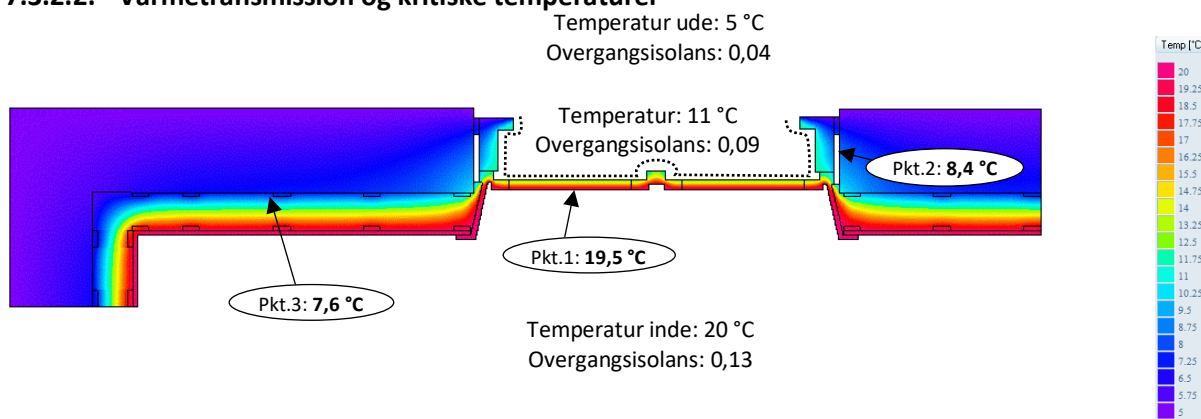
Denne løsning ligner vinduesforslag 1, på nær at ruden inkluderer et lag energiglas, se Figur 98. Lavemissionsbelægningen giver en lavere varmetransmissionskoefficient (U-værdi) for den samlede rude. Den samme rudeopbygning, 4 mm glas – 12 mm argon - 4 mm glas uden lavemissionsbelægning, har en U-værdi på 2,7 W/m²·K og med lavemissionsbelægning en U-værdi på 1,6 W/m²·K, se Tabel 21.

7.3.2.1. Opbygningen



Figur 102: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringen. Se Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag.

7.3.2.2. Varmetransmission og kritiske temperaturer



Figur 103: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen.

Middelstrålingstemperatur, (t_r): 15,4 °C

Strålingstemperatrasymmetri, (Δt_{pr}): 2,7 °C, som giver 0% utilfredse.

Operativ temperatur, (t_o), med lufttemperatur 20 °C: 17,7 °C

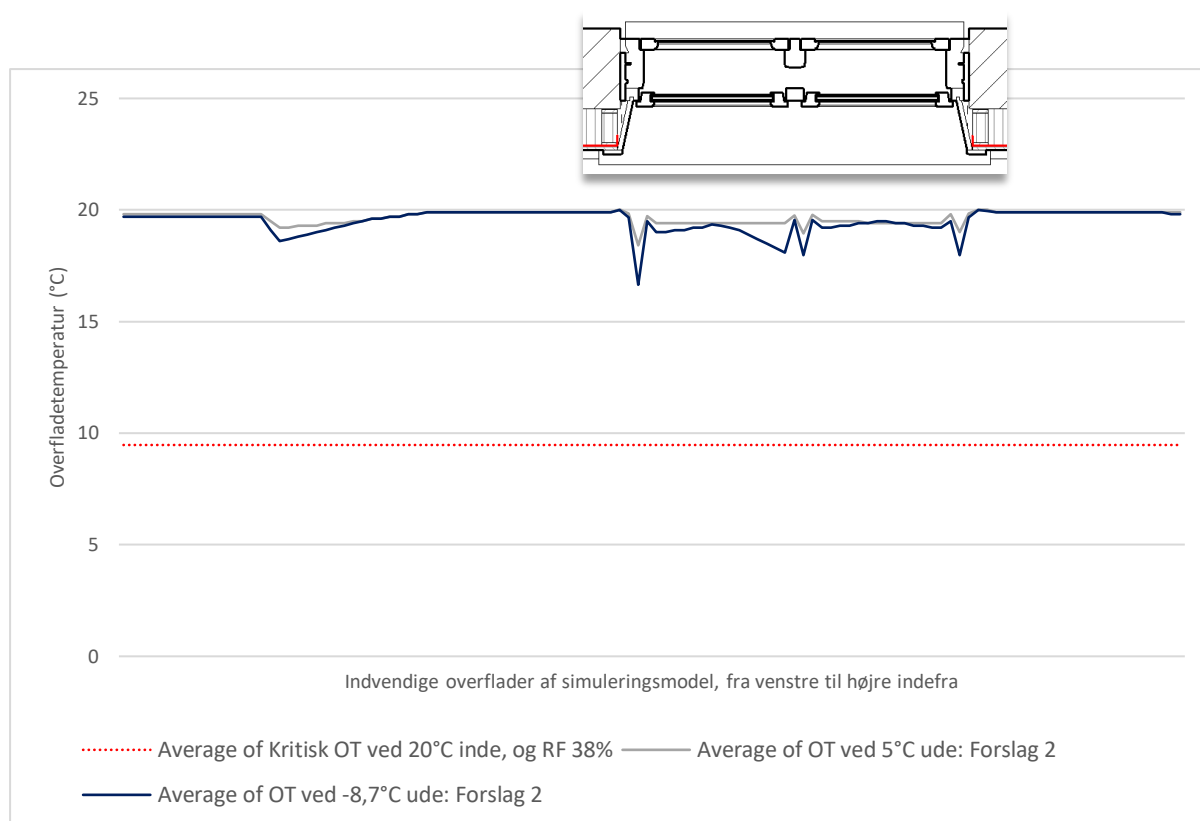
7.3.2.3. Risiko for skimmelsvampevækst

Der påvises heller ikke risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader med simuleringen i HEAT2 for forslag 2, som kan ses i Figur 104. Alle data brugt til vurderingen kan ses i: Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.

Data for risikovurderingen er:

- samme udetemperatur som dagen for blower door test/ termografering: **5 °C**
- laveste døgnmiddel udendørstemperatur (februar): **-8,7 °C**
- kritisk overfladetemperatur: **9,5 °C**
(beregnet fra februars gennemsnitlige relativ fugtighed 38% og indetemperatur 20 °C)

For at orientere sig om hvor temperaturerne forekommer på den indvendige overflade, er en skitse af konstruktionen klippet ind lodret over det mest kritiske område.

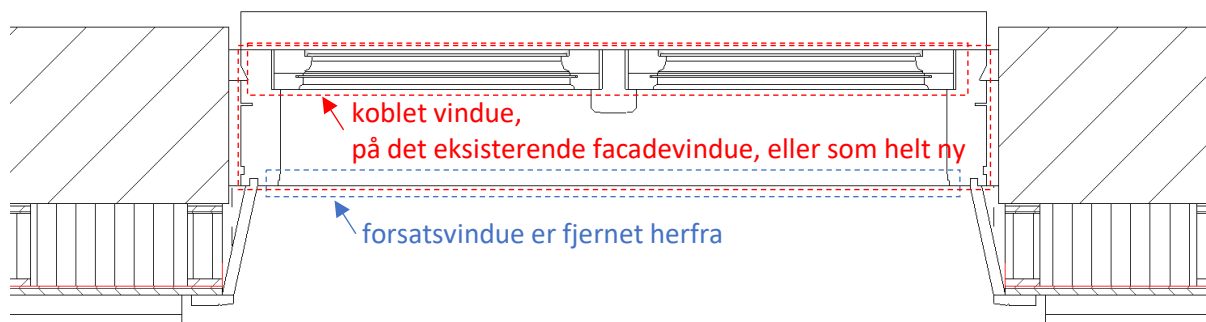


Figur 104: **Forslag 2: Enkeltlagsforsatsrude erstattet med termorude med energilag.** Overfladetemperaturer (OT) simuleret både ved 5 °C og -8,7 °C udendørs blev plottet relativ til en kritisk overfladetemperatur for at vurdere, om der er risiko for skimmelsvampevækst. Kurverne viser ingen risiko. Skitse af konstruktionen er indsat for orientering.

Hvis utæthederne ikke forbedres, kunne der være nogle områder hvor temperaturerne kommer under den kritiske.

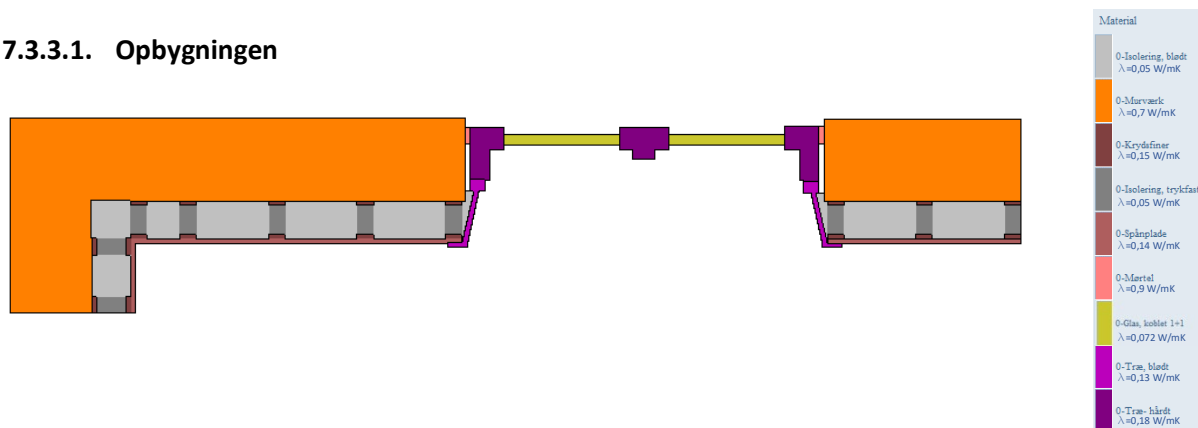
7.3.3. Vinduesforslag 3: Koblet 1+1

En anden måde at forbedre det termiske indeklima vil være at fjerne forsatsvinduer og enten tilføje et ekstra vindue til de eksisterende facadevinduer eller lave nye koblede vinduer, som erstatter de eksisterende facadevinduer. Facadevinduet og det koblede lag vil begge to have enkeltlagsglas med den løsning, se Figur 105.



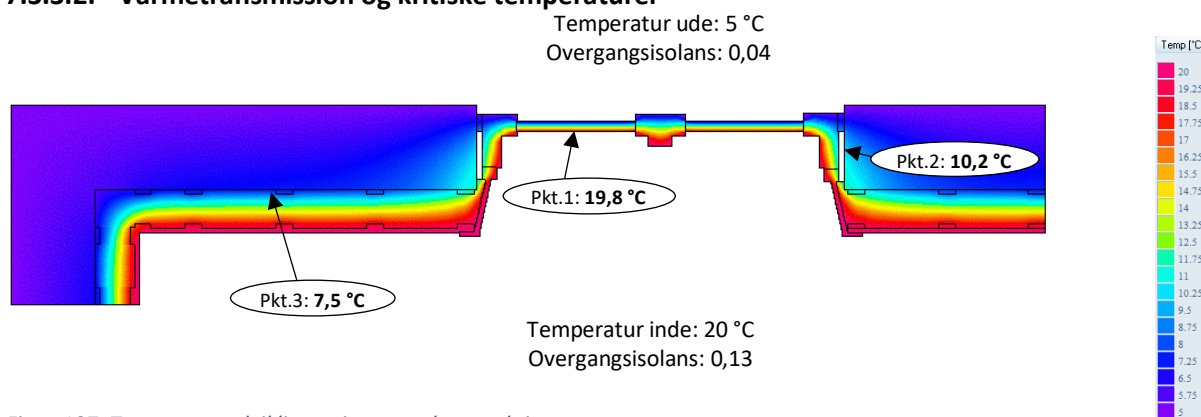
Figur 105: Skitseforslag for koblet løsning. De eksisterende facadevinduer kan enten modificeres til en koblet løsning, eller erstattes med helt nye koblede vinduer. Forsatsvinduer er fjernet.

7.3.3.1. Opbygningen



Figur 106: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringen. Se Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag

7.3.3.2. Varmetransmission og kritiske temperaturer



Figur 107: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen.

Middelstrålingstemperatur, (t_r): 15,5 °C

Strålingstemperatrasymmetri, (Δt_{pr}): 2,7 °C, som giver 0% utilfredse.

Operativ temperatur, (t_o), med lufttemperatur 20 °C: 17,7 °C

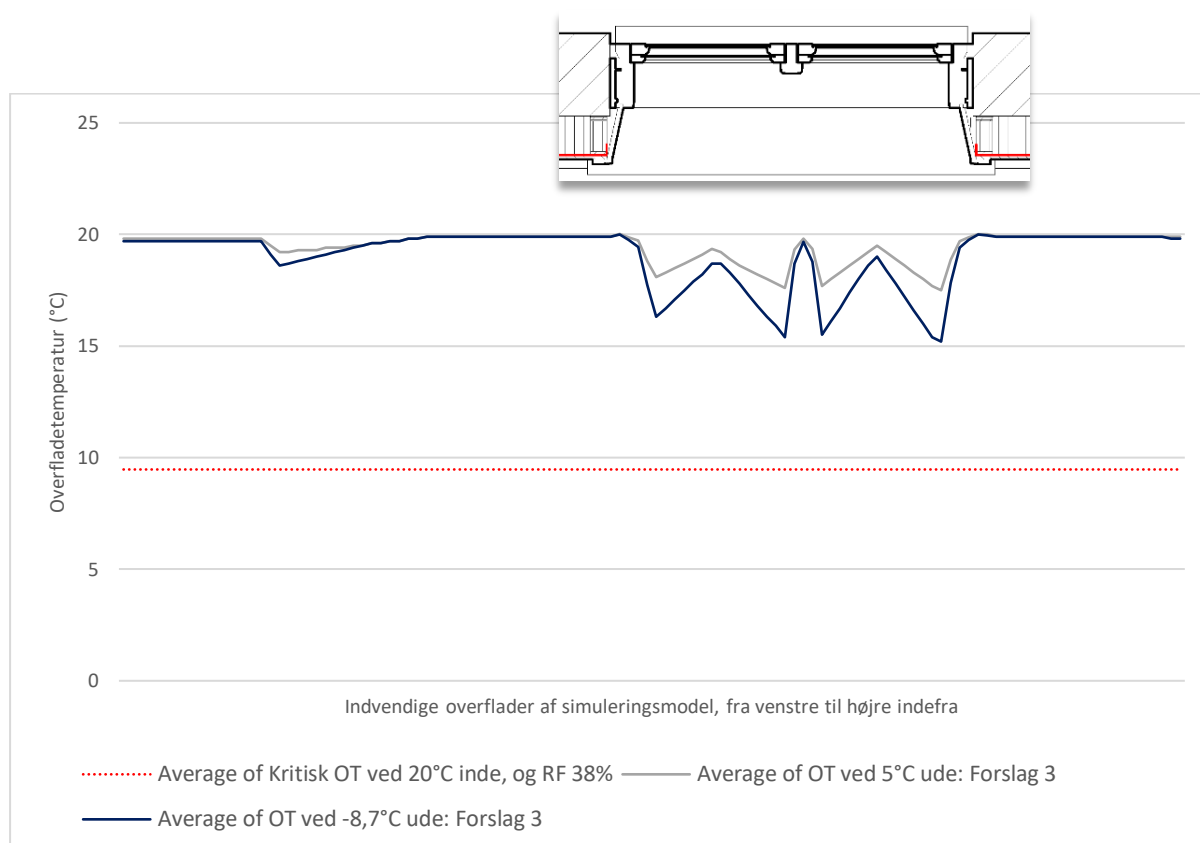
7.3.3.3. Risiko for skimmelsvampevækst

Der påvises heller ikke risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader med simuleringen i HEAT2 for forslag 3, som kan ses i Figur 108. Dyk i temperaturer forekommer ved lysningerne og kanterne af de gående rammer. Alle data brugt til vurderingen kan ses i: Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.

Data for risikovurderingen er:

- samme udetemperatur som dagen for blower door test/ termografering: **5 °C**
- laveste døgnmiddel udendørstemperatur (februar): **-8,7 °C**
- kritisk overfladetemperatur: **9,5 °C**
(beregnet fra februars gennemsnitlige relativ fugtighed 38% og indetemperatur 20 °C)

For at orientere sig om hvor temperaturerne forekommer på den indvendige overflade, er en skitse af konstruktionen klippet ind lodret over det mest kritiske område.

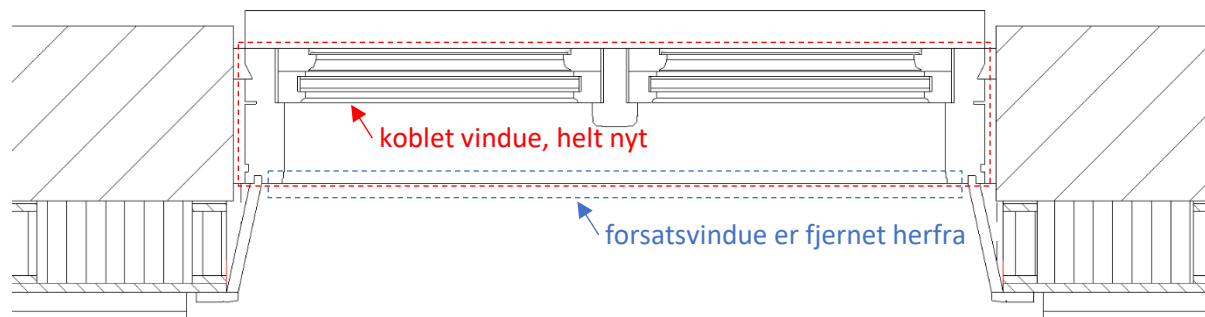


Figur 108: **Forslag 3: Koblet vindue med to enkeltlagsglas.** Overfladetemperaturer (OT) simuleret både ved 5 °C og -8,7 °C udendørs blev plottet relativ til en kritisk overfladetemperatur for at vurdere, om der er risiko for skimmelsvampevækst. Kurverne viser ingen risiko. Skitse af konstruktionen er indsat for orientering.

Hvis utæthederne ikke forbedres, kunne der være nogle områder, hvor temperaturerne kommer under den kritiske.

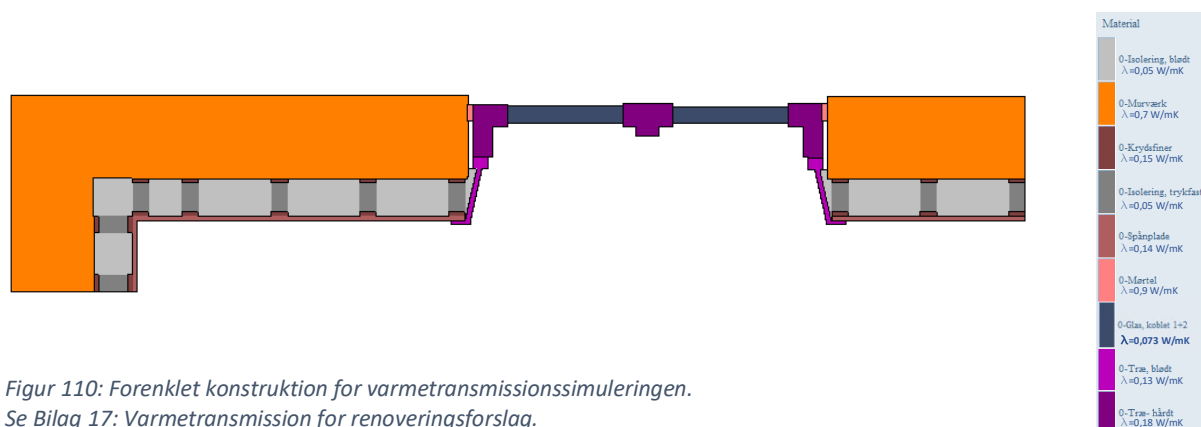
7.3.4. Vinduesforslag 4: Koblet 1+2

Denne løsning ligner vinduesforslag 3, på nær at den koblede rude er en termorude med lavenergibelægning i stedet for enkeltlagsglas, se Figur 109. Den løsning kan ikke integrere de eksisterende facadevinduer, da de ikke kan bære vægten af termoruden, så hele vinduet skal laves som nyt.



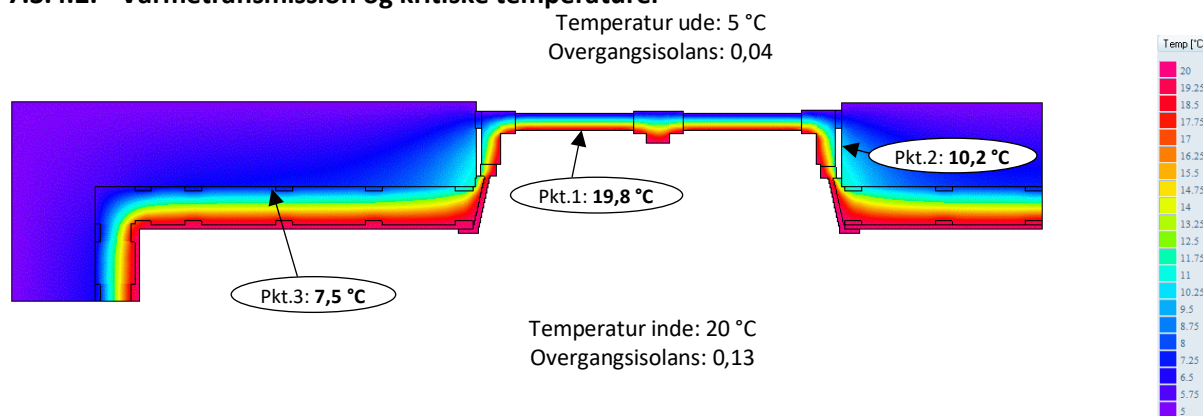
Figur 109: Skitseforslag for koblet løsning. De eksisterende facadevinduer erstattes med helt nye koblede vinduer. Forsatsvinduer er fjernet.

7.3.4.1. Opbygningen



Figur 110: Forenklet konstruktion for varmetransmissionssimuleringen. Se Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag.

7.3.4.2. Varmetransmission og kritiske temperaturer



Figur 111: Temperaturudviklingen igennem konstruktionen.

Middelstrålingstemperatur, (t_r): 15,5 °C

Strålingstemperatrasymmetri, (Δt_{pr}): 2,7 °C, som giver 0% utilfredse.

Operativ temperatur, (t_o), med lufttemperatur 20 °C: 17,7 °C

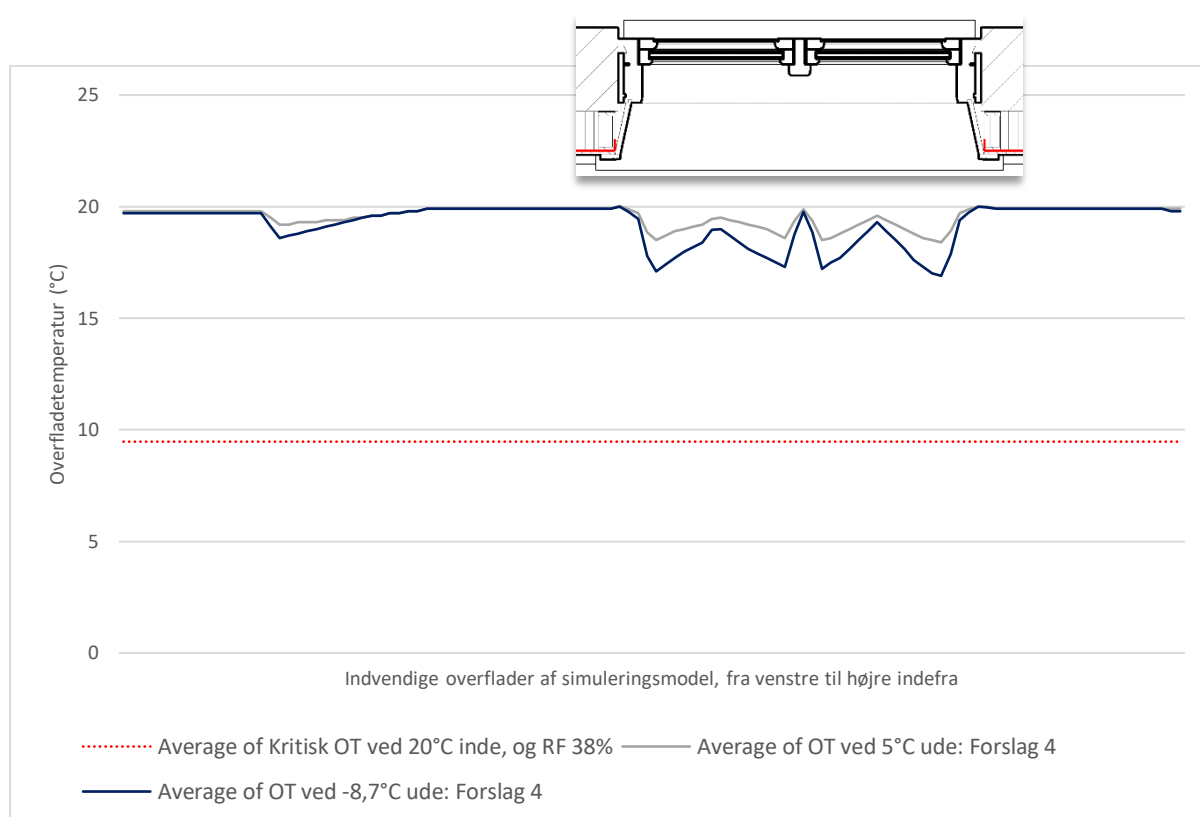
7.3.4.3. Risiko for skimmelsvampevækst

Der påvises heller ikke risiko for skimmelsvampevækst på indvendige overflader med simuleringen i HEAT2 for forslag 4, som kan ses i Figur 112. Dyk i temperaturer forekommer ved lysningerne og kanterne af de gående rammer. Alle data brugt til vurderingen kan ses i: Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.

Data for risikovurderingen er:

- samme udetemperatur som dagen for blower door test/ termografering: **5 °C**
- laveste døgnmiddel udendørstemperatur (februar): **-8,7 °C**
- kritisk overfladetemperatur: **9,5 °C**
(beregnet fra februars gennemsnitlige relativ fugtighed 38% og indetemperatur 20 °C)

For at orientere sig om hvor temperaturerne forekommer på den indvendige overflade, er en skitse af konstruktionen klippet ind lodret over det mest kritiske område.



Figur 112: **Forslag 4: Koblet vindue med et enkeltlagsglas (ude) og en termorude (inde).** Overfladetemperaturer (OT) simuleret både ved 5 °C og -8,7 °C udendørs blev plottet relativ til en kritisk overfladetemperatur for at vurdere, om der er risiko for skimmelsvampevækst. Kurverne viser ingen risiko. Skitse af konstruktionen er indsat for orientering.

8. Diskussion

Termisk indeklima har mange aspekter som bidrager til en overordnet termisk komfort. Følelsen af træk er en gene i næsten alle sine afskygninger, men den er en kompleks størrelse at forbedre fordi den handler om varmeledning fra kroppen via både stråling og konvektion, og disse har flere årsager.

Væsentlige parametre som blev undersøgt i tilstandsvurderingen, er: middelstrålingstemperatur, strålingsasymmetri, operativ temperatur, luftskift, og luftstrømningshastigheder. Der kunne fastlægges nogle bestemte områder for forbedring af det termiske indeklima ud fra dem. Disse har primært afsæt i den lave middelstrålingstemperatur og det stor luftskift. Løsningsforslag forsøger at forbedre på disse.

Tætning håndterer uønsket infiltration og luftskift, og forbedringer til vinduer kommer ind på de lave overfladetemperaturer som bidrager til den lave middelstrålingstemperatur og strålingsasymmetrien. Ekstra tiltag som flere radiatorer og gulvvarme nævnes også mht. temperaturforbedringer. Tegninger af forslagene kan ses i afsnit 7, og data for alle parametre for alle forslag er samlet i Tabel 23.

8.1. Vurderingsparametre for renoveringsforslag

Kritiske parametre for vurdering af forskellige løsningsforslag ses i Tabel 23. Der er to kategorier for forslag: tætning og forbedringer til vinduer. Derefter er der kombineret tiltag, med yderligere varmekilder som ekstra option. Parametrene blev udvalgt som hjælp til vurdering af renoveringsforslag. De opdeles i fire overordnede kategorier der reflekterer de forskellige aspekter af en renoveringssag for en bevaringsværdig bygning.

- **Termisk komfort**
 - Middelstrålingstemperatur
 - Operativtemperatur
 - Strålingsasymmetri
 - Luftskift / strømningshastighed / turbulensintensitet
- **Energioptimering**
 - Transmissionstab igennem konstruktioner
 - Ventilationstab fra utætheder
- **Fugtrelateret risiko**
 - Risiko for skimmelsvampevækst
- **Arkitektonisk**
 - Reduktion af kvadratmeter
 - Bevaring af de eksisterende facadevinduer
 - Brug af vindueskarm og ukompliceret at åbne vinduet

Man kan se en opsamling af data for de enkelte parametre for samtlige renoveringsforslag i Tabel 23, og hovedemner diskuteres i de næste afsnit.

8.1.1. Termisk komfort

I forhold til de eksisterende konditioner, har vi konstateret at der er forbedringsmuligheder mht. temperaturgener og infiltration.

Den operative temperatur i stuen viste sig at være kun 17,2 °C selv om lufttemperaturen var 20 °C, pga. en middelstrålingstemperatur på 14,4 °C, se afsnit 6.6. Der er flere muligheder for at øge

temperaturen, uden at øge lufttemperaturen via at skrue op for varmen. Man kan øge middelstrålingstemperatur ved at forbedre vinduer så de får en højere overfladetemperatur. As-is-ruder har en overfladetemperatur på 15 °C. Ved at skifte forsatsruden ud med en termorude (se vinduesforslag 1 og 2, i hhv. afsnit 7.3.1 og 7.3.2) kan man komme op på 19,5 °C på overfladerne. Ved at fjerne forsatsruden og skifte til en koblet løsning for vinduet øger man overfladetemperaturen yderligere med 0,3 °C, til 19,8 °C, (se vinduesforslag 3 og 4, i hhv. afsnit 7.3.3 og 7.3.4).

Alle fire løsninger vil afhjælpe lokal nedkøling af indeluften og den resulterende forhøjede lufthastighed og turbulensintensitet fra kuldene-faldet, men de øger kun den operative temperatur med 0,5 °C, fra 17,2 °C til 17,7 °C. Hvis man tilføjer en radiator under vinduet, stiger den operative temperatur 1,8 grader, altså næsten fire gange så meget som at skifte alle tre vinduer og terrassedør i stuen. Så kun ved at tilføje en radiator, kommer den operative temperatur i stuen op på 18 °C. En radiator vil også mindske strålingsasymmetri som kan opleves som træk med 80%, mens skift af vinduer mindsker strålingsasymmetrien med kun 10%. En radiator vil også modvirke kuldene-faldet fra kolde vinduesoverflader.

Utsigtet infiltration er 9,9 l/sec · m² gulvareal målt ved 50 Pa trykforskel, hvilket er 20% højere end for bygninger af lignende alder og type og næsten 10 gange højere end maksimumsværdien for nybyggeri fra BR18, se afsnit 6.3.1. Infiltration skaber lokale lufthastigheder og turbulensintensiteter som kan skabe oplevelsen af træk, og med de målte værdier for luftstrømningshastighed i stuen, skal turbulensintensiteten holdes under 10% for at have 80% tilfredse, se resultatafsnit 6.3.3 og Figur 62 og metodeafsnit 5.1.2 og Figur 34. Hvis udeluften er kold, skaber temperaturforskellen i luften endnu højere turbulensintensitet fra både kuldene-fald og skorstenseffekt. Den åbne forbindelse fra stuen til første sal forstørrer skorstenseffekten, så små vertikale temperaturforskelle i rumluften kan have en større effekt for lufthastigheden og turbulensintensiteten end hvis ikke der var en åbning i loftet.

8.1.2. Energoptimering

Der er nogle enkelte tiltag der kunne give en stor gevinst for varmetransmissionstab igennem konstruktioner og infiltrationstab. Forslag 1-3 + 4b, som indebærer en ny dampspærre, efterisolering, og tætning af samlinger mellem tilstødende bygningsdeles tæthedsplan vil opnå en besparelse i varmetransmission på 23% og en besparelse på infiltrationstab på 28%. Udskiftning af vinduer vil opnå en besparelse i varmetransmission på mellem 23% og 33% og en besparelse på infiltrationstab på 72%. En løsning der tætner både facaden, samlinger mellem tilstødende bygningsdeles tæthedsplan og vinduer kan give en besparelse i varmetransmission på mellem 53% og 63% og en besparelse på infiltrationstab på 100%. Se Tabel 23 og Bilag 19: Varm- og infiltrationstabsberegninger for detaljer om alle energiberegninger.

8.1.3. Fugtrelateret risiko

Der er ikke registreret tegn på skimmelsvampevækst ved tilstandsvurderingen, hverken på overfladerne eller i den eksisterende konstruktion. Varmetransmissionssimuleringer som blev brugt til at vurdere risikoen for skimmelsvampevækst ved detaljerne omkring vindueskonstruktion, viste en lille risiko for skimmelsvampevækst i detaljen mellem forsatsramme og lysningen, se Figur 77. Den risiko er aktuel hvis ikke der bliver tætnet, da termograferingen tyder på at overfladetemperaturerne vil være en smule lavere end dem der blev brugt i simuleringen pga. infiltration, se Figur 78. Risiko for skimmelsvampevækst blev påvist af både de målte data og

fugttransmissionssimuleringer, se Tabel 15 og afsnit 6.4.1 og afsnit 6.4.2. Der kunne være forskellige forklaringer på hvorfor undersøgelserne viser risiko for skimmelsvampevækst, men der blev ikke fundet tegn på det under tilstandsvurderingen.

Den første mulige forklaring er at perioden med fordelagtige konditioner for skimmelsvampevækst ikke har været til stede. Det kunne vi ikke vurdere for vindueskonstruktionerne, da der kun er lavet statiske simuleringer af dem. For vægkonstruktionen til gengæld, er temperatur og relativ fugtighed målt over tid og simuleret dynamisk, så man kan plote værdierne på isoplet-modellen. De målte data viser at der kun er 13 sammenlagte dage hvor der er en risiko for skimmelsvampevækst, se Tabel 10, og WUFI-simuleringen viser ikke risiko for skimmelsvampevækst.

En anden forklaring på at der ikke var tegn på skimmelsvampevækst i konstruktionen er at varmetransmission indefra alligevel er nok til at tørre konstruktionen ud. Det kan man tyde fra analysen af As-is-konstruktion simuleret med WUFI Bio hvor man kan se at selvom vandindholdet af skimmelsporen kommer over det kritiske niveau, kommer det under igen når pudslaget udtørres, se Figur 75.

En tredje mulighed for hvorfor der ikke er fundet tegn på skimmelsvampevækst i konstruktionen er at der er infiltration udefra der når ind i konstruktionen. Der er fundet utilsigtede utætheder i stuen, se afsnit 6.3 og Tabel 7. Undersøgelserne viste at omkring halvdelen af de utilsigtede utætheder kom fra vinduer, og den anden halvdel fra øvrige bygningsdele, se Tabel 8. Det er sandsynligt at infiltrationen fra undertryk ikke kun skaber konvektion i stuen, men også internt i konstruktionerne. Udeluften i langt de fleste måneder er tørrere end indeluften, så infiltration internt i konstruktionen vil bidrage til en udtørring og dermed mindske risikoen for skimmelsvampevækst.

Det er derfor vigtigt, hvis man gerne vil mindske risiko for skimmelsvampevækst i konstruktionen, at sikre at dampspærren og alle samlinger til tilstødende bygningsdeles tæthedsplan er tætte. Ved evt. utætheder er der højere risiko for skimmelsvampevækst med højere isoleringsevner, hvilket kan ses i sammenligningen af as-is med facadeforslag 4, 4a og 4b. I forslag 4a og 4b, som efterisoleres med hhv. 95 mm og 130 mm, er der højere risiko for skimmelsvampevækst ved utætheder i dampspærren, se Figur 96 afsnit 7.2.5 og Bilag 12: Risiko for skimmelsvampevækst for tætningsforslag. Derfor er det yderst vigtigt at beskytte dampspærren fra fremtidige utætheder, så der anbefales løsning 4b, hvor dampspærren er placeret bag installationslaget.

8.1.4. Arkitektonisk

De arkitektoniske parametre er vigtige at have med i vurderingen men kan være modstridende og følelsesbetonet i forhold til de rene datadrevne parametre.

Den første parameter er reduktionen af kvadratmeter. Der er kun to forbedringer der tager fysisk gulvareal: efterisolering med 45 mm ekstra isolering, forslag 4b, se afsnit 7.2.4.3 og Figur 95 og tilføjelse af en ekstra radiator. Installationslaget tager lidt over 1 m² og radiatoren tager 0,1 m². Sammenlagt bliver det 7% mindre plads i stuen. Trykprøvninger har vist at der er kolde zoner ved ydervæggene pga. utætheder, og temperaturmålinger og termograferinger har vist kolde overflader. Sammen gør de termiske forhold oplevelsen af arealet langs ydervægge utilfredsstillende. Derfor vurderes det at ekstra isolering og en ekstra radiator øger brugbar plads i stuen, selv om det faktiske areal mindskes lidt.

Den næste parameter er bevaring af de eksisterende facadevinduer. Vinduer i facaden er gårdens oprindelige vinduer, og det vil være et tab af den del af gårdens historie at smide dem ud. De eksisterende rammer har stadig en lang levetid pga. kvaliteten af træet. Vedligeholdelsesmæssigt er

det dog en investering af tid og penge fra beboernes side at beholde de gamle vinduer, men husets bevaringsværdige status, og de klare retningslinjer i lokalplanen respekteres, så der anbefales bevaring af de gamle facadevinduer. Løsningerne der gør det muligt, er vinduesløsning 1, 2 og 3, se Figur 114. Hvis beboerne gerne vil kunne bruge mere af vindueskarmen og gøre det nemmere at åbne vinduer, er det dog kun forslag 3, med det gamle facadevindue med en koblet løsning, der skal vælges.

Tabel 23: Kritiske vurderingsparametre for as-is-konstruktionen og de forskellige renoveringsforslag

Forslag / Parameter	Middelstrålingstemperatur (°C)	Operativtemperatur (°C), ved en lufttemperatur 20,0 °C	Strålingstemperaturasymmetri / Procent utilfreds	Luftkift (x/h ved 50Pa) ¹³ / luftstrømning (løs vurdering)	Estimeret varmetransmissionstab igennem klimaskærm (W) ¹⁴	Estimeret varmetransmissionstab fra utilsigtede utætheder (W) ¹⁶	Risiko for skimmelsvampvækst (tæt / med 0,2/h utæthed) ⁷	Reduktion af netto kvadratmeter	Bevaring af eksisterende facadevinduer	Brug af vindueskarm og ukompliceret at åbne vindue
Tætning af facaden										
Facade, As-is: Utæt Alu-kraft og ingen tætning af samlingerne	14,4	17,2	3,0 / 0%	14,6 / utætheder	633	1182	Nej / Ja	Nej	Ja	Nej
Facadeforslag 1, 2 & 3: Samlingen mellem vindueskonstruktion og væg, ¹ Tagfod og væg / bjælkeender ² og fodpanelerne ved soklen ³	-	-	-	-	-	-	-	Nej	Muligt	Muligt
Facadeforslag 4: Ny dampspærre og fibergips ⁴	-	-	-	-	-	-	Nej / Ja	Nej	-	-
Facadeforslag 4a: Ny dampspærre og skift af isolering ⁵	14,6 / +0,2	17,3 / +0,1	14,6 / +0,2	-	-	-	Nej / Ja	Nej	-	-
Facadeforslag 4b: Ny dampspærre, skift af isolering og efterisolering ⁶	14,6 / +0,2	17,3 / +0,1	14,6 / +0,2	-	-	-	Nej / Ja	Ja / - 1,1 m ² (- 6%)	-	-
Kombineret tiltag										
Facadeforslag 1-3 + 4: Tæthedsplan etableret	-	-	-	4,1 / tætnet	633 / (-0%)	852 / (-28%)	Nej / Ja	Nej	Muligt	Muligt
Facadeforslag 1-3 + 4a: Tæthedsplan etableret og skift af isolering	14,6 / +0,2	17,3 / +0,1	3,0 / 0%	4,1 / tætnet	544 / (-14%)	852 / (-28%)	Nej / Ja	Nej	Muligt	Muligt
Facadeforslag 1-3 + 4b: Tæthedsplan etableret og skift af isolering og efterisolering	14,6 / +0,2	17,3 / +0,1	3,0 / 0%	4,1 / tætnet	467 / (-23%)	852 / (-28%)	Nej / Ja	Ja / - 1,1 m ² (- 6%)	Muligt	Muligt

Forslag / Parameter	Middelstrålingstemperatur (°C)	Operativtemperatur (°C), ved en lufttemperatur 20,0 °C	Strålingstemperatursymmetri / Procent utilfreds	Luftskift (x/h ved 50Pa) ¹³ / luftstrømning (løvs vurdering)	Estimeret varmetransmissionstab igennem klimaskærm (W) ¹⁴	Estimeret varmetransmissionstab fra utilsigtede utætheder (W) ¹⁶	Risiko for skimmelsvampevækst (tæt / med 0,2/h utæthed) ⁷	Reduktion af netto kvadratmeter	Bevaring af eksisterende facadevinduer	Brug af vindueskarm og ukompliceret at åbne vindue
Forbedringer til vinduer										
Vinduer, As-is: Forsats- 1+1 ⁸	14,4	17,2	3,0 / 0%	14,6 / utæt- heder og kulde- nedfald	633	1182	Nej / Ja	Nej	Ja	Nej
Vinduesforslag 1: Forsats- 1+2 ⁹	15,4 / +1,0	17,7 / +0,5	2,7 / 0%	10,5 / tætnet og mindre kulde- nedfald	489 / (-23%)	330 / (-72%)	Nej /-	Nej	Ja	Nej
Vinduesforslag 2: Forsats- 1+2(energi) ¹⁰	15,4 / +1,0	17,7 / +0,5	2,7 / 0%	10,5 / tætnet og mindre kulde- nedfald	440 / (-31%)	330 / (-72%)	Nej /-	Nej	Ja	Nej
Vinduesforslag 3: Koblet – 1+1,¹¹ evt. på det gamle vindue	15,5 / +1,1	17,7 / +0,5	2,7 / 0%	10,5 / tætnet og mindre kulde- nedfald	449 / (-29%)	330 / (-72%)	Nej /-	Nej	Muligt	Ja
Vinduesforslag 4: Koblede – 1+2,¹² nyt vindue	15,5 / +1,1	17,7 / +0,5	2,7 / 0%	10,5 / tætnet og mindre kulde- nedfald	426 / (-33%)	330 / (-72%)	Nej /-	Nej	Nej	ja
Kombineret tiltag										
As-is plus en radiator under vinduet mod gården	18,0 / +3,6	19,0 / +1,8	0,6 / 0%	14,6 / tætnet og meget mindre kulde- nedfald	633 / (-0%)	1182 / (-0%)	Nej / Ja	Ja / - 0,1 m ² (- 1%)	Ja	Nej
Vinduesforslag 1 plus en radiator under vinduet mod gården	19,1 / +4,7	19,5 / +2,3	0,9 / 0%	10,5 / tætnet og meget mindre kulde- nedfald	489 / (-23%)	330 / (-72%)	-	Ja / - 0,1 m ² (- 1%)	Ja	Nej
As-is minus 2 radiators, plus gulvvarme, 25 °C	14,4 / +0	17,2 / +0	2,33 / 0%	14,6 / tætnet og mindre kulde- nedfald	633 / (-0%)	1182 / (-0%)	Nej / Ja	Nej / +0,2 m ² (+2%)	Ja	Nej
Vinduesforslag 1 minus radiatorer, plus gulvvarme, 25 °C	15,5 / +1,1	17,7 / +0,5	2,1 / 0%	14,6 / tætnet og mindre kulde- nedfald	489 / (-23%)	330 / (-72%)	-	Nej / +0,2 m ² (+2%)	Ja	Nej

Forslag / Parameter	Middelstrålingstemperatur (°C)	Operativtemperatur (°C), ved en lufttemperatur 20,0 °C	Strålingstemperatursymmetri / Procent utilfreds	Luftskift (x/h ved 50Pa) ¹³ / luftstrømning (løs vurdering)	Estimeret varmetransmissionstab igennem klimaskærm (W) ¹⁴	Estimeret varmetransmissionstab fra utilsigtede utætheder (W) ¹⁶	Risiko for skimmelsvampevækst (tæt / med 0,2/h utæthed) ⁷	Reduktion af netto kvadratmeter	Bevaring af eksisterende facadevinduer	Brug af vindueskarm og ukompliceret at åbne vindue
Facadeforslag 1-3+4b Vinduesforslag 1 ¹⁵ plus en radiator under vinduet mod gården	19,3 / +4,9	19,6 / +2,4	0,9 / 0%	0,5 / tætnet og meget mindre kulde- nedfald	297 / (-53%)	0 / (-100%)	-	Ja / - 1,2 m ² (- 7%)	Ja	Nej
Facadeforslag 1-3+4b Vinduesforslag 4 ¹⁵ plus en radiator under vinduet mod gården	19,3 / +4,9	19,7 / +2,5	0,9 / 0%	0,5 / tætnet og meget mindre kulde- nedfald	234 / (-63%)	0 / (-100%)	-	Ja / - 1,2 m ² (- 7%)	Nej	Ja

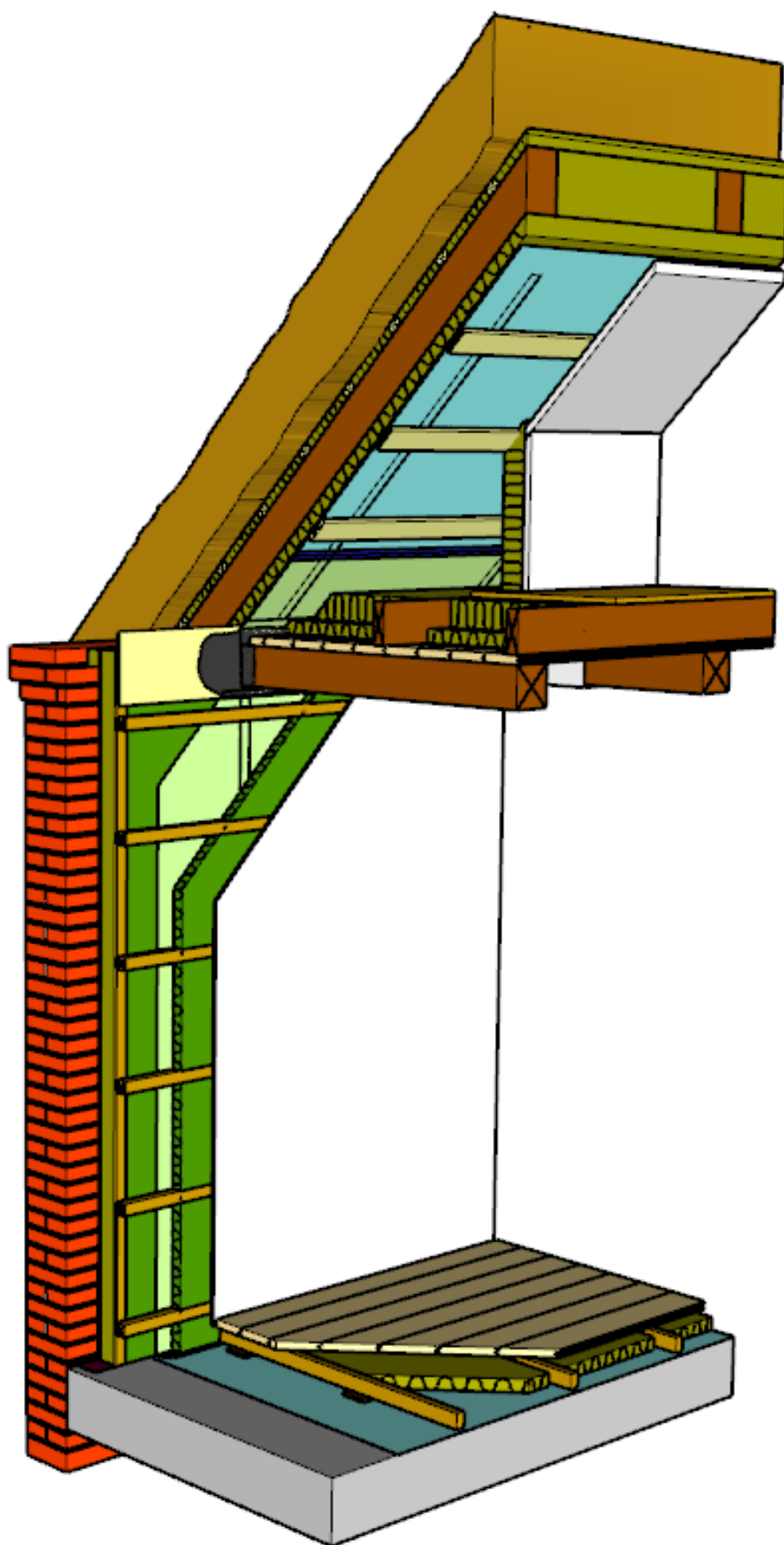
1. Facadeforslag 1: Se Figur 90: Skitseforslag for tætning mellem vindueskarm og vægkonstruktion.
2. Facadeforslag 2: Se Figur 91: Skitseforslag for tætning mellem tagfod og væg / bjælkeender
3. Facadeforslag 3: Se Figur 92: Skitseforslag for tætning langs fodpanelerne ved soklen
4. Facadeforslag 4: Se Figur 93: Skitseforslag for ny dampspærre og fibergips
5. Facadeforslag 4a: Se Figur 94: Skitseforslag for ny dampspærre og skift af isolering
6. Facadeforslag 4b: Se Figur 95: Skitseforslag for ny dampspærre og skift af isolering og efterisolering
7. For vurderingen af risiko for facadeforslag 4, 4a og 4b se: Bilag 12: Risiko for skimmelsvampevækst for tætningsforslag
8. Vinduer, As-is: Se Figur 83 - Figur 85, Figur 77 og Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader.
9. Vinduesforslag 1: Se Figur 98 - Figur 101 og Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag
10. Vinduesforslag 2: Se Figur 102 - Figur 104 og Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag
11. Vinduesforslag 3: Se Figur 105 - Figur 108 og Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag
12. Vinduesforslag 4: Figur 109 - Figur 112 og Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag
13. For data om luftskift, se Bilag 6: Blower door test 01, Bilag 7: Blower door test 02, Bilag 8: Blower door test 03 og afsnit 6.3 Infiltration
14. Ikke inklusiv linjetab eller ventilationstab, se metode afsnit 5.2.2 og Bilag 19: Varm- og infiltrationstabsberegninger
15. inkluderer udskift af terrassedør også for at få et samlede varmetab
16. Beregnede efter formler fra metode afsnit 5.2.3. Se også Bilag 19: Varm- og infiltrationstabsberegninger

8.2. Anbefalede løsning

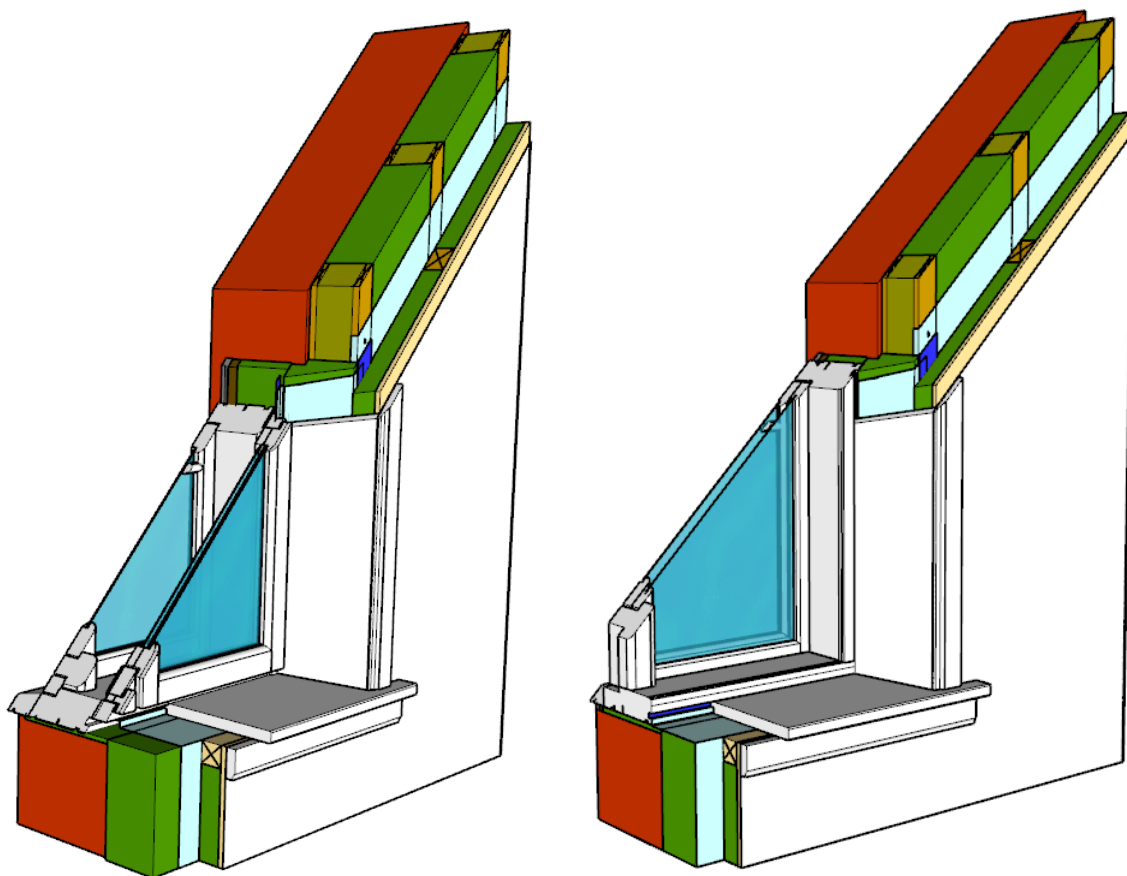
Efter de overvejelser er vi kommet frem til en anbefaling, med to optioner for vinduer:

- **Etablere tæthedsplan**, som vist i Figur 113
Facadeforslag 1, 2 og 3 + 4b: Ny dampspærre med tætte samlinger til tilstødende bygningsdeles tæthedsplan og efterisolering af væggen med 95 mm + 45 mm, og ny dampspærre i installationslaget.
- **Forbedre vinduer**, som vist i Figur 114
Vinduesforslag 1 eller 2: Beholde det gamle facadevindue og forbedre forsatsvinduet med termorude med/uden energibelægning.

Vinduesforslag 3: Forbedre det gamle facadevindue ved at eftermontere en koblet ramme med enkeltlagsglas



Figur 113: Nyt tætningsplan og installationslag på væggen, tætningsforslag 1-3+4b



Figur 114: Vinduesforslag 1 og 2 (t.v.): forsatsvindue med termorude med eller uden energibelægning. Vinduesforslag 3 (t.h.): Koble vindue med enkeltlagsglas.

9. Konklusion

Energooptimering af og forbedring af termisk komfort i bevaringsværdige bygninger er byggeteknisk komplekst, da det udvendige udseende ikke kan ændres og de resterende muligheder er plaget af fugtrisiko. På baggrund af registreringer og simuleringer, viste det sig at de væsentlige parametre for renoveringsforslag var infiltration og overfladetemperaturer.

Teoretiske simuleringer blev brugt til at vurdere risikoen tilknyttet forskellige forslag. Simuleringsprogrammer sætter begrænsninger for hvad man kan simulere, og inddata er altafgørende for resultaterne. Dermed kan simuleringer give resultater med en usikkerhed i forhold til registrerede / målte værdier over samme tidsperiode. Det er derfor renoveringsforslag har en vis usikkerhed mht. fugtrisiko, da de bygger på simuleringer.

De endelig renoveringsforslag præsenteret her i rapporten har haft gavn af en basis i den fysiske tilstandsvurdering, med data målt indvendig, udvendig og i konstruktionsopbygning over næsten et års tid, en grundig forståelse af bygningens opbygning og samlinger via destruktive analyser af as-is-konstruktioner og en gennemgang af bygbarheden via komplet 3D-modellering og beskrivelser af udførelsen ud fra praktiske erfaringer. På baggrund af undersøgelsen beskrevet i rapporten vil vores anbefaling både være fugtmæssigt forsvarlig og bygbar hvis det bliver udført som anbefalet.

10. Litteraturliste

Beskæftigelsesministeriet. (2018). *At-vejledning A.1.21 om indeklima*. København: Beskæftigelsesministeriet.

BR18, *Bygningsreglementets vejledning om efterisolering*. (februar 2023). Hentet fra Bygningsreglement.dk: <https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/BRV/Ofte-rentable-konstruktioner/Indledning#932e398e-5dcb-4e5d-8974-de5acba2c957>

BR18, *Kapitel 11: Energiforbrug*. (februar 2023). Hentet fra Bygningsreglement.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav/274_279#ad21aa16-1c24-4ff8-83fd-5a197d72d201

BR18, *Kapitel 4: Bygningsreglementets vejledning om energiforbrug*. (februar 2023). Hentet fra Bygningsreglement.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/BRV/Energiforbrug/Kap-4_0#b5f94d68-e136-4b28-a8a5-95d6b877d41b

Brandt, E. (2016). *BYG-ERFA (99) 16 08 31 Klimaskærem Renovering Tæthed Varmetab Indeklima*. København: Fonden BYG-ERFA.

Brandt, E., & m.fl. (2019). *SBi anvisning 224: Fugt i Bygninger* (2. udgave, 3. oplag udg.). København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Hansen, T. K., Nielsen, A., & Morelli, M. (2022). *SBi anvisning 277: Fugt-Teori, beregning og undersøgelse*. København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Brüel & Kjær. (1996). *Thermal Comfort*. Nærum: INNOVA AirTech Instruments.

Byggeskadefonden. (2022). *Guide til Kvalitet ved Bygningens Renovering: Form, Funktion og Teknik*. København: Byggeskadefonden.

Center for Bygningsbevaring. (2023). Hentet fra Bygningsbevaring Raadvaad: <https://www.bygningsbevaring.dk/>

Dansk Standard. (1993). *DS 474: Norm for specifikation af termisk indeklima*. København: Fonden Dansk Standard.

Dansk Byggeskik. (u.d.). *danskbyggeskik.dk*. Hentet fra Dansk Byggeskik: <https://danskbyggeskik.dk/>

Dansk Standard. (2001). *DS/CEN/CR 1752: Ventilation for buildings - Design criteria for the indoor environment*. København: Fonden Dansk Standard.

Dansk Standard. (2006). *DS/EN ISO 7730:2006: Ergonomi inden for termisk miljø – Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier*. København: Fonden Dansk Standard.

Dansk Standard. (2007). *DS/EN 15251: Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*. København: Fonden Dansk Standard.

- Dansk Standard. (2012). *DS/EN ISO 13788: Byggekomponenters og -elementers hygrotermiske ydeevne – Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overfladefugtighed og kondensdannelse i hulrum – Beregningsmetoder*. København: Fonden Dansk Standard.
- Dansk Standard. (2015). *DS/EN ISO 9972:2015: Bygningers termiske ydeevne - Bestemmelse af bygningers luftgennemtrængelighed - Prøvningsmetode med overtryk skabt af ventilator*. København: Fonden Dansk Standard.
- Dansk Standard. (2019). *DS/EN 16798-1:2019: Bygningers energieffektivitet – Ventilation i bygninger – Del 1: Indeklimamæssige inputparametre til beregning og evaluering af bygningers energieffektivitet i forbindelse med indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*. København: Fonden Dansk Standard.
- Dansk Standard. (2020). *DS 418: 2011+Till. 1:2020: Beregning af bygningers varmtab*. København: Fonden Dansk Standard.
- Dansk Standard. (2023). *DS 3033: Frivillig klassificering af indeklimaets kvalitet i boliger, skoler, dagsinstitutioner og kontorer*. København: Fonden Dansk Standard.
- DTU Byg. (2009). *Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 1: "Grundlæggende energimæssige egenskaber"*. Lyngby: Danmarks Tekniske Universitet.
- Due, L. (2021). *BYG-ERFA (99) 21 02 06 Utætheder i klimaskærmen– måling, lokalisering og vurdering*. København: Fonden BYG-ERFA.
- Hansen, H., Kjerulf-Jensen, P., & Stampe, O. B. (2013). *Varme- og Klimateknik, Grundbog, 4. udgave, 1. oplag*. Odder: Danvak ApS.
- Hansen, T., Vanhoutteghem, L., Nøhr, B. B., & Due, L. (2021). *Trykprøvning af bygninger - Baggrund*. København: Teknologisk Institut.
- Jakob Jensen, f. J. (07. 06 2023). Utæthedsgrad for fuldmurede huse fra 1800 tallet. (K. Nielsen, Interviewer)
- Jensen, N. E. (1981). *Et stykke af Lyngby : registrant over Bondebyens bygninger*. Lyngby: Miljøministeriet, Fredningsstyrelsen, Lyngby-Taarbæk kommune.
- Kolarik, J. (2017). *Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger*. København: Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.
- Københavns Kommune. (maj 2023). *Retningslinjer for bevaringsværdige bygninger*. Hentet fra [www.kk.dk](https://www.kk.dk/borger/bolig-og-byggeri/byggetilladelse/byggetilladelse-trin-for-trin/retningslinjer-for-bevaringsvaerdige-bygninger): <https://www.kk.dk/borger/bolig-og-byggeri/byggetilladelse/byggetilladelse-trin-for-trin/retningslinjer-for-bevaringsvaerdige-bygninger>
- L72: *Lov om sanering*. (9. juni 1969). Hentet fra Folketinget: <https://www.folketingstidende.dk/samling/19681/lovforslag/L72/index.htm>
- LBK nr 1157: *Bekendtgørelse af lov om planlægning*. (01. 07 2020). Hentet fra Planloven: <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2020/1157>
- LBK nr 219: *Bekendtgørelse af lov om bygningsfredning og bevaring af bygninger og bymiljøer*. (06. 03 2018). Hentet fra Bygningsfredningsloven: <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2018/219>

- Lokalplan 258: For Bondebyen.* (08. 01 2018). Hentet fra Lyngby-Taarbæk Kommune:
https://dokument.plandata.dk/20_3123203_1515068691203.pdf
- MEMBRAN-ERFA.* (Fonden BYG-ERFA. maj 2023). Hentet fra Bygningers tæthed: <https://membran-erfa.dk/>
- Poulin, H. L., Nielsen, J. B., Due, L., Nøhr, B. B., & Nielsen, L. (2015). *Vejledning i bygningstermografi, 2. udgave.* København: Teknologisk Institut, Bolius, Isolink, Dank Infrarød.
- Rasmussen, T. V., & Nicolajsen, A. (2007). *SBi anvisning 214: Klimaskærmens lufttæthed.* København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- RIBuild.* (2023). Hentet fra Indvendig isolering i historiske bygninger: <https://www.ribuild.eu/home-da>
- Schjønning, C., Hansen, M. H., & Brandt, E. (2015). *BYG-ERFA (39) 15 12 28 Dampspærrematerialer og fugttransport – væg- og loftkonstruktioner.* København K: Fonden BYG-ERFA.
- Sedlbauer, K. &. (2001). *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen (Predictuion of mould manifestation on and in building parts).* Stuttgart, Germany: University of Stuttgart.
- Slots- og Kulturstyrelsen. (2023). *Datering af vinduer 1700-1950.* Hentet fra Information om Bygningsbevaring:
[https://slks.dk/fileadmin/user_upload/SLKS/Omraader/Kulturarv/Bygningsfredning/Gode_rad_om_vedligeholdelse/5.4_Datering_af_vinduer_1700-1950.pdf](https://slks.dk/fileadmin/user_upload/SLKS/Omraader/Kulturarv/Bygningsfredning/Gode_rad_ad_om_vedligeholdelse/5.4_Datering_af_vinduer_1700-1950.pdf)
- Slots- og Kulturstyrelsen. (2023). *Fredede og bevaringsværdig bygninger.* Hentet fra Kultur Ministeriet: Slots- og Kulturstyrelsen:
<https://www.kulturarv.dk/fbb/offentligbygningsoeg.pub?public=true&advanced=false>
- Teknologisk Institut. (april 2023). *Murerhåndbogen 2021.* Hentet fra Mur & Tag: https://www.mur-tag.dk/fileadmin/user_upload/Editor/filer/Teknik_diverse/Murerhaandbog_2021.pdf
- Thrane, U., Olsen, K. C., Brandt, E., Ebbehøj, N. E., & Gunnarsen, L. (2020). *SBi anvisning 274: Skimmelsvampe i bygninger - undersøgelse og vurdering.* København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

11. Bilag

Bilag 1: Datasheet for blower door test udstyr

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-01

Bilag 2: Datasheet for anemometer

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-02

Bilag 3: Datasheet for dataloggere

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-03

Bilag 4: Datasheet for digitaltermometer

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-04

Bilag 5: Datasheet for termisk kamera

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-05

Bilag 6: Blower door test 01

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-06

Bilag 7: Blower door test 02

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-07

Bilag 8: Blower door test 03

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-08

Bilag 9: Data fra dataloggere

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-09

Bilag 10: Varmeledningsevner

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-10

Bilag 11: WUFI-rapporter

Filnavne:

- Bilag-11.1_01_WUFI rapport- As-is-vægkonstruktion, Tæt
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.1_01
- Bilag-11.1_02_WUFI rapport- As-is-vægkonstruktion, Utæthed_0,2pertime
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.1_02
- Bilag-11.1_03_WUFI rapport- As-is-vægkonstruktion, Utæthed_0,1pertime

- Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.1_03
- Bilag-11.2_01_WUFI rapport- Forslag-4, Tæt
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.2_01
- Bilag-11.2_02_WUFI rapport- Forslag-4, Utæthed_0,2pertime
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.2_02
- Bilag-11.3_01_WUFI rapport- Forslag-4A, Tæt
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.3_01
- Bilag-11.3_02_WUFI rapport- Forslag-4A, Utæthed_0,2pertime
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.3_02
- Bilag-11.4_01_WUFI rapport- Forslag-4B, Tæt
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.4_01
- Bilag-11.4_02_WUFI rapport- Forslag-4B, Utæthed_0,2pertime
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-11.4_02

Bilag 12: Risiko for skimmelsvampevækst for tætningsforslag

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-12

Bilag 13: Vejrdata for vurdering af kritiske temperaturer

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-13

Bilag 14: Data for vurdering af skimmelsvamp risiko på indvendige overflader

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-14

Bilag 15: HEAT2 rapport – As-is

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-15

Bilag 16: HEAT2 rapport – As-is, åben

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-16

Bilag 17: Varmetransmission for renoveringsforslag

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-17

- Bilag-17a_HEAT2 rapport- Forslag1-forsatsvindue-Termorude-åben
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-17a
- Bilag-17b_HEAT2 rapport- Forslag2-forsatsvindue-Termorude+energi-åben
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-17b
- Bilag-17c_HEAT2 rapport- Forslag3-Koblet- 1+1
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-17c
- Bilag-17d_HEAT2 rapport- Forslag4-Koblet- 1+2
 - Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-17d

Bilag 18: Strålingstemperaturer og asymmetri

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-18

Bilag 19: Varm- og infiltrationstabsberegninger

Filnavn: Nielsen-Sommer_20230609_MBYG4_BILAG-19