

# Klimafacaden

## Afsluttende rapport for 350-011

Et projekt inden for forskning, udvikling og demonstration med støtte fra ELFORSK



Et samarbejde mellem:

**ERIK arkitekter**

**DTU**

**Hudevad Radiator Design A/S**

**Ventilationsvinduet**

**Hi-Con**

Morten Ørsager

Toke Rammer Nielsen

Thomas Dinesen

Poul Horn

Tommy Bæk Hansen

Arkitekturrådgiver

Forskning

Producent

Producent

Producent

mo@erik.dk

trn@byg.dtu.dk

tmd@hudevad.com

ph@horngroup.dk

tbh@hi-con.dk

## Indhold

Abstract.....	3
Resume .....	3
Introduktion .....	4
Idéen bag Klimafacaden.....	4
Forundersøgelser og indledende analyser.....	6
Projektets formål .....	7
Projektets 5 udviklingstrin .....	7
Formål for udviklingstrin 1 .....	7
Teoretisk grundlag for ventileret hulrum .....	8
Model i IDA ICE .....	10
Resultater.....	15
Diskussion af resultater.....	26
Konklusion.....	26
Perspektivering .....	27
Litteratur .....	28
Appendix A – NMF kode for ventileret hulrum.....	29

## Abstract

The Climate Facade is a project combining post-insulation of critical building elements with an efficient integrated heat source. Through controlled preheating of the ventilation air, the two-parted facade element aims to improve the comfort of indoor climate in historic floor buildings in Danish and other European cities. The facade is adaptable to the architectural qualities of existing buildings, and thus become a suitable alternative when traditional mechanical ventilation is a challenge.

The project is divided into five phases. This report includes work from the first phase: development of a digital modelling tool for simulation of different solutions. The model is created in the IDA ICE-simulation program and demonstrates the main idea of the Climate Facade; preheating and solution of incoming air in a facade element for renovations and new buildings. The model developed in phase 1 presents a key tool in the following phases of the project.

## Resume

Klimafacaden er et projekt, der kombinerer efterisolering af kritiske bygningsdele med en effektiv integreret varmekilde. Ved en kontrolleret forvarmning af ventilationsluften vil det todelte facadeelement kunne forbedre indeklimakomforten i historiske etagebygninger i danske og andre europæiske byer. Facaden kan tilpasses eksisterende bygningers arkitektoniske kvaliteter, hvilket gør løsningen til et velegnet alternativ, når traditionel mekanisk ventilation er en udfordring.

Projektet er opdelt i fem udviklingsfaser. Denne rapport indeholder arbejde i første udviklingsfase som omfatter udviklingen af et digitalt modelværktøj til simulering af forskellige løsninger. Modellen er udviklet i IDA ICE-simuleringsprogram, der kan eftervise Klimafacadens hovedidé; forvarmning og løsning af indblæsningsluft i et facadeelement til renovering og nybyggeri. Det udviklede modelværktøj i fase 1 udgør et centralt redskab i projektets videre forløb.

## Introduktion

Mange danske og europæiske bykerner har en speciel identitet i kraft af arkitektur, interiør og kulturhistorie. Renovering af sådanne bygninger kræver nænsom håndtering, hensyntagen og kompromiser med den eksisterende arkitektur, indeklimaforhold, materialekvalitet, energiforbrug, miljøhensyn og pladskrav.

Ventilation og frisk luft er en forudsætning, når bygninger renoveres og tættes. Nye ventilationsløsninger har til formål at forbedre komfort og indeklima, men kræver både plads og omfattende kanalføringer, giver støjgener og tilsidesætter ofte brugerens mulighed for tilpasning til individuelle behov. Komponenterne dimensioneres ud fra en gennemsnitlig og forventelig betragtning af klima, vejr og brugeradfærd, uden hensyntagen til et årligt varierende klima med svingende temperatur, relativ luftfugtighed og omskiftelige dagslysforhold eller individuelle behov. Manglende hensyn, der både kan resultere i tekniske, tidsmæssige, økonomiske og komfortmæssige udfordringer.

Der er derfor et stort behov for et alternativ til traditionelle renoveringsløsninger, der både kombinerer efterisolering af kritiske bygningsdele med en effektiv integreret varmekilde, der kan bidrage til den kontrollerede forvarmede ventilationsluft.

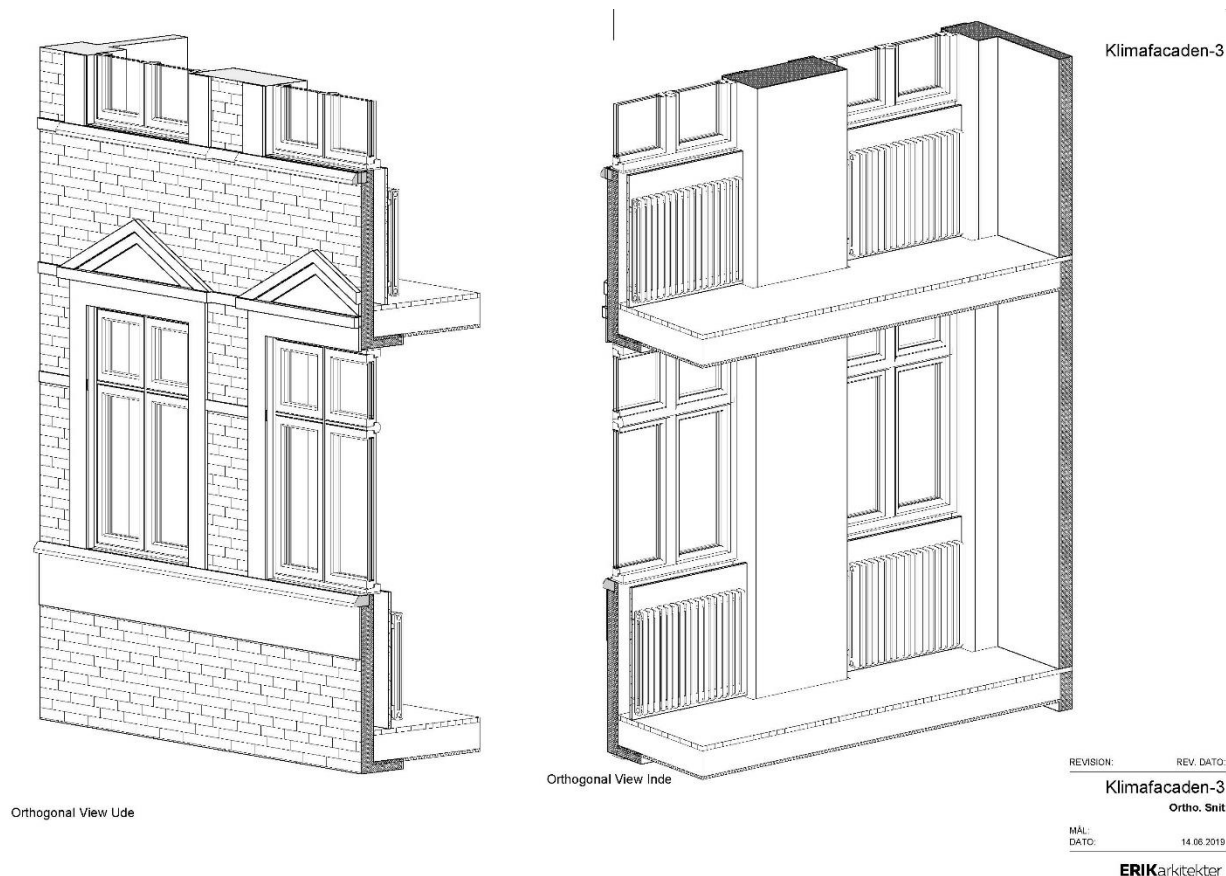
## Idéen bag Klimafacaden

Det centrale nye element i Klimafacaden er en brystning, hvor der trækkes frisk luft ind. Den indkomne luft kan i kolde perioder forvarmes og i varme perioder forkøles, så den ikke opleves som hverken kulde- eller trækgener.

For at opnå dette skal indblæsningsluften tilføres varme eller kulde. Varmen kan enten komme fra en varmekilde, der sikrer den ønskede temperatur, fra passiv solvarme eller via transmission fra det opvarmede rum bag facaden. Kulde kan komme fra perioder med lavere temperaturer (lagring og natkøling) eller kølelementer og -flader.

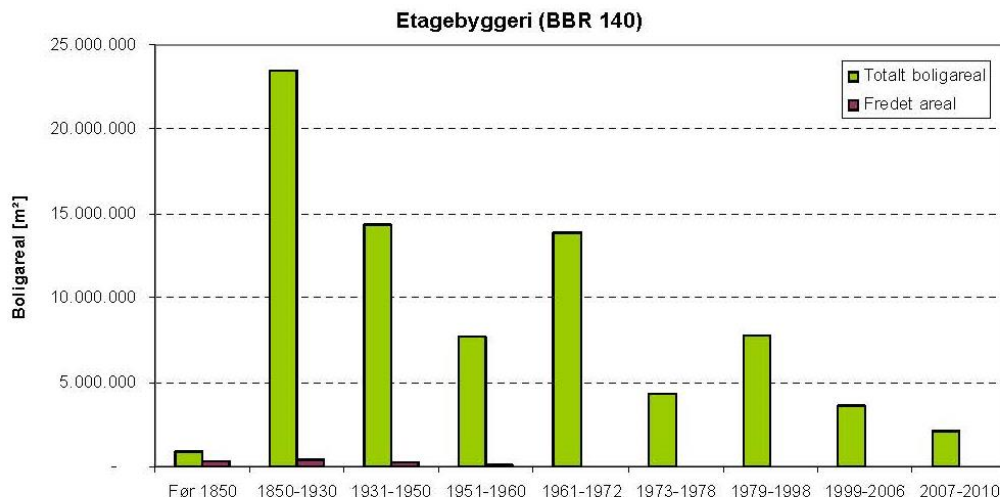
Forvarmningen af den udefrakommende friske luft sker delvist i et mellemrum i brystningselementet, hvor varmekilde og isolering er dimensioneret til at forvarme luften uden at skabe et varmetab gennem facaden. Luftstrømmen i mellemrummet påvirkes af transmissionsvarme fra bolig og varmekilde samt passiv solvarme fra akkumulering i bygningens yderste facade. Det er derfor essentielt, at der skabes en styring af forvarmningen, der er responsiv i forhold til klimaet og kan tage højde for den passivt tilførte varme.

Kuldenedfald og træk fra vinduer forekommer ofte mere naturligt end fra mekaniske ventilationsanlæg. Teknologien i klimafacaden er forankret i forståelsen om, at frisk luft skal komme fra åbninger i klimaskærmen året rundt. Ved at sikre overensstemmelse mellem temperaturen af den friske udefrakommende luft og temperaturen indenfor, mindskes potentielle trækgener.



Figur 1. Skitseudsnit af brystning i historisk bygning.

Projektet retter sig mod eksisterende bygninger, der har de største udfordringer i forhold til konventionelle ventilationsløsninger og måder at sikre frisk luft samt høj komfort. Undersøgelser fra "Videnscenter for energibesparelse i bygninger" (se næste side) viser, at der for perioden 1850-1930 er bygget 42.617 bygninger svarende til ca. 23 mio. Kvm. Sammenlignet med forrige eller efterfølgende årtier udgør dette langt den største andel af byggerier og understøtter behovet for en facadeløsning til netop disse bygninger. Yderligere viser tallene, at bygninger med et tilhørende fredet areal udelukkende stammer fra de ældste perioder, hvilket understøtter behovet for optimering og bevaring af netop denne bygningstype.



Figur 2. Samlede registrerede boligareal fra Bygnings- og boligregisteret (BBR) opgjort efter opførelsesperioder samt fredede arealer [7]

## Forundersøgelser og indledende analyser

I 2016/17 udviklede ERIK arkitekter et demonstrationsprojekt i Højstrupparken under Realdanias kampagne (Projektleder Lars Autrup): Renovering af 40'ere og 50'ernes murede boligbyggeri. Som delelement i dette projekt bevilgede Realdania midler til laboratorieforsøg og pilottest af en tidlig version af Klimafacaden. Her blev U-værdier og det samlede elements potentiale i forhold til forvarmning, styring og køling af indblæsningsluft målt i forhold til forskellige støbte brystningselementer, varmekomponenter og et ventilationsvindue.

Klimafacaden bygger bl.a. på en arbejdst teori om materialers egenskab til at optage, lagre, transmittere og afgive kulde og varme. I testopstillingen blev målt en forskydning i temperatur, der teoretisk betyder, at hvis brystelementet en kold sommernat bliver nedkølet, vil den indkomne luft i formiddagstimerne den følgende dag, have en lavere temperatur end udeluften. Faseforskydningen er en forudsætning for at udligne spidsbelastninger og vil kunne bidrage til store energibesparelser og forbedret komfort.

Laboratorietestene viste, at en klimatilpasset facade som Klimafacaden har et potentiale til optimering af indeklimaet, men at flere faktorer med stor indflydelse på effektiviteten af den samlede løsning manglede indtænkt i det tidlige forsøg forsøget.

Sideløbende med projektets fase 1 er en række kandidatspecialer blevet gennemført af studerende ved DTU. Et kandidatspeciale har vurderet Klimafacadens potentiale ved anvendelse af computationel fluid dynamics (CFD) studier af forskellige opbygninger [5]. Med CFD er luft- og varmemstrømme i facaden analyseret under idealiserede og stationære forhold i mere detalje end det er muligt med IDA ICE. Et andet kandidatspeciale har undersøgt forskellige måder for implementering af modellen i IDA ICE og sammenlignet resultaterne med de detaljerede CFD-modeller [6]. Erfaringer fra begge specialeprojekter har bidraget til udviklingen af den endelige implementering i IDA ICE.

## Projektets formål

Klimafacadens formål er at forbedre indeklima og komfort i historiske bygninger og etagebyggerier. Idéen er at sammentænke passiv ventilation, varme og efterisolering i ét facadeelement. Ét element der kan yde optimalt gennem årstidernes forskellige klimaforhold. Ét system der bygger på passiv teknologi. Én løsning uden pladskrævende ventilationskanaler, støj- og trækgener. Ét design der er tilpasset eksisterende, ældre historiske bygninger.

Dette opnås gennem fem udviklingstrin, hvor denne rapport omfatter udviklingstrin 1, som er støttet af ELFORSK.

## Projektets 5 udviklingstrin

Projektet er opdelt i følgende udviklingstrin for at imødekomme forskellige finansieringskilder og fokus:

Trin 1 – Modelværktøj (Dette projekt støtte af ELSFORSK)

Trin 2 – Designudvikling og projektering

Trin 3 – Laboratorieforsøg

Trin 4 – 1:1 Demonstrationsprojekt i 5 lejligheder / 25 elementer

Trin 5 – Monitorering i 5 lejligheder / 25 elementer

Denne rapport omhandler udelukkende udviklingstrin 1

## Formål for udviklingstrin 1

Projektet bygger videre på erfaringerne fra forundersøgelsen og forskning inden for området. I udviklingstrin 1 er formålet at udvikle et modelværktøj i IDA ICE simuleringsprogram, der kan eftervise Klimafacadens hovedidé; forvarmning og løsning af indblæsningsluft i et facadeelement til renovering og nybyggeri.

Ud fra en serie af parametre, som tilrettes forskellige scenarier, skal modelværktøjet eftervise effekten af forskellige materialers egenskaber, isoleringsevne, varmetransmission og tab, samt luftstrømmens påvirkning gennem Klimafacaden.

Det udviklede modelværktøj er et centralt redskab i projektets videre forløb og de næste udviklingstrin, hvor både tekniske og designmæssige detaljer skal fastlægges.

## Teoretisk grundlag for ventileret hulrum

Luftstrømmen gennem det ventilerede hulrum betragtes som en strømning mellem to parallelle plader med forskellig temperatur.

Den konvektive varmestrømstæthed fra en vægoverflade til luftstrømmen beskrives af

$$q_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_h} \cdot \left( \frac{T_u - T_i}{\ln \left( \frac{T_o - T_i}{T_o - T_u} \right)} \right)$$

hvor  $T_u$  er temperaturen af luften ved udløbet fra hulrummet,  $T_i$  er temperaturen af luften ved indløbet til hulrummet,  $T_o$  er temperaturen på vægoverfladen,  $Nu$  er Nusselts tal for strømningen,  $\lambda$  er luftens varmeledningsevne, og  $D_h$  er hulrummets hydrauliske diameter.

Da der er tale om små temperaturændringer kan udtrykket tilnærmes ved at erstatte den logaritmiske temperaturdifferens med den aritmetiske temperaturdifferens. Udtrykket herunder anvendes i programmet til beregning af den konvektive varmestrømstæthed fra en vægoverflade til luftstrømmen

$$q_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_h} \cdot \left( T_o - \frac{T_i + T_u}{2} \right)$$

For laminare strømninger (Reynolds tal under 2800) anvendes  $Nu = 4$  for strømning mellem parallelle flader med forskellig overfladetemperatur [3]. For turbulent strømning (Reynolds tal over 2800) anvendes [4]

$$Nu = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

hvor  $f$  er friktionsfaktoren og  $Re$  er Reynolds tallet bestemt af

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu}$$
$$f = (0,790 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2}$$

hvor  $V$  er lufthastigheden i hulrummet, og  $\nu$  er luftens kinematiske viskositet.

Luftens energibalace beregnes af

$$M \cdot \frac{dh}{dt} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot q_{k,i} + \sum_{j=1}^m \dot{m}_j \cdot h_j$$

hvor  $h$  er enthalpien af luften i hulrummet ved middeltemperaturen,  $M$  er massen af luften i hulrummet,  $t$  er tiden,  $A_i$  er areal af flade  $i$  mod hulrummet,  $q_{k,i}$  er den konvektive



varmestrømstæthed for flade  $i$ ,  $\dot{m}_j$  er massestrømmen af luftstrøm  $j$  til hulrummet, og  $h_j$  er entalpien af luftstrøm  $j$ .

Ud over den konvektive varmeoverføring til luftstrømmen udveksles også varme ved stråling mellem overfladerne i hulrummet. Varmestråling mellem overfladerne beregnes af

$$q_s = \epsilon_{res} \cdot \sigma_s \cdot (T_{\theta,1}^4 - T_{\theta,2}^4)$$

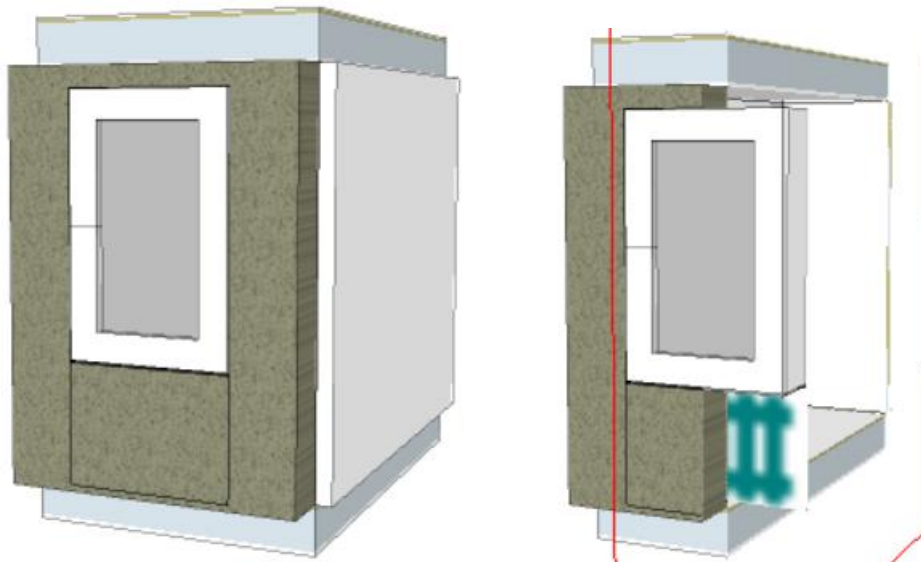
hvor  $\epsilon_{res}$  er den resulterende emissivitet på baggrund af overfladernes emissiviteter,  $\sigma_s$  er Stefan-Boltzmanns konstant, og  $T$  er den absolutte temperatur for overfladerne mod hulrummet. Som tilnærmelse kan den resulterende emissivitet for de to overflader mod hulrummet beregnes som produktet af overfladernes emissivitet.

## Model i IDA ICE

IDA ICE er et værktøj til dynamisk simulering af energi og indeklima i bygninger [1]. Programmet er open source og åbent for programmering af egne modeller gennem sproget Neutral Model Format (NMF) [2]. En model for det ventilerede hulrum er opbygget i filen Vent\_Gap\_WW.nmf, og koden findes i appendiks A. Den resterende del af modelleringen benytter standardkomponenter fra IDA ICE. Ved modellering af det ventilerede facadeelement skal især nævnes, at modellen bdfwall.nmf bliver anvendt for alle vægkonstruktioner og modellen CeWatHet.nmf for radiatoren.

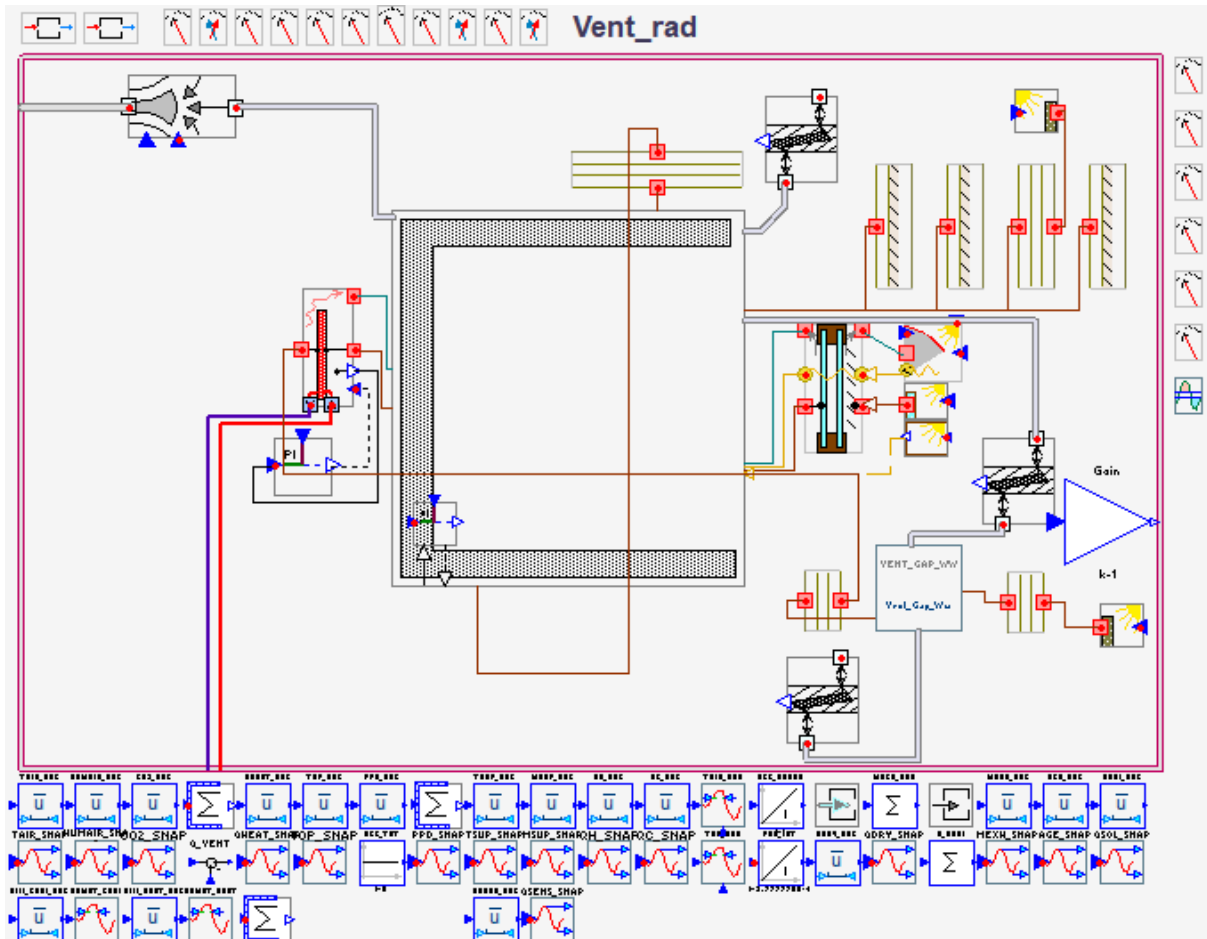
Varmestrømmen i væggene beregnes på baggrund af finite difference-metoden gennem en lagdelt konstruktion. Hulrummet er således placeret mellem to af disse vægelementer for at repræsentere en ydervæg med et ventileret hulrum. Radiatormodellen repræsenterer en vandbåren radiator, hvis ydelse reguleres efter indetemperaturen via et variabelt flow gennem radiatoren, der er baseret på PI-regulering.

Modellen er opbygget som et udsnit af et opholdsrum med brystningsparti med bredde på 1 m. Figur 3 viser modellen for udsnittet i IDA ICE. På basis af de valgte case-bygninger antages, at luftindtaget i hvert udsnit svarer til behovet for 10m<sup>2</sup> etageareal. For at opfylde Bygningsreglementets minimumskrav til frisklufttilførsel leverer hvert udsnit således 3 l/s. Der er ligeledes udført beregninger med 7 l/s pr. Udsnit svarende til udsugningskravene i en lejlighed med køkken og bad på 35 l/s fordelt på en 50 m<sup>2</sup> lejlighed.



Figur 3. 3D-model af IDA ICE-model for rumudsnit med ventileret brystning. Til højre vises et snit i modellen, hvor radiatorens placering bag brystningen er synlig.

Figur 4 viser den grafiske repræsentation af modellen i IDA ICE for ét rum. IDA ICE benytter i det avancerede interface et visuelt programmeringssprog, hvor de matematiske modeller for forskellige komponenter (repræsenteret med bokse med input og output) forbindes via datastrømme (streger der forbinder boksene). Det viste eksempel er et rum med ventileret brystning, hvor radiatoren er placeret mod brystningen. Ovenfor skærbilledet er de væsentligste modelkomponenter beskrevet.



Figur 4. Rummodel i det grafiske brugerinterface i IDA ICE. Figuren viser en situation, hvor radiatoren er placeret mod et ventileret facadeelement som brystning.

I det ældre murede etagebyggeri antages den oprindelige brystning opbygget med en ½-stens muret ydervæg, som ikke erstattes i forbindelse med opbygning af en ventileret brystning.

I etagebyggeri, hvor brystningerne kan udskiftes med nye elementer, antages elementerne opbygget med højstyrkebeton og PIR-isolering.



Figur 5. Facaden af Dagmargården, eksempel på etageboliger med betonbrystning

Egenskaberne for de anvendte materialer i brystningselementer er angivet i tabel 1.

Tabel 1. Egenskaber for materialer i brystningselementer. ID benyttes ved beskrivelse af forskellige opbygninger af brystningen.

Materiale	ID	Varmeledningsevne (W/m <sup>2</sup> K)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Specifik varmekapacitet (J/kgK)
Muret væg (Tegl)	T	0,58	1500	840
Højstyrkebeton	B	3,0	2700	850
PIR isolering	I	0,023	40	800

For at beskrive opbygningen af brystningen benyttes nedenstående kodning, som beskriver opbygningen udefra med materialetyper og lagtykkelse.

<p>ID – Dimension – ID – Dimension ...</p> <p>Eksempel:</p> <p><b>T110V20I70B30</b></p> <p>110 mm muret væg, 20 mm ventileret hulrum, 70 mm PIR isolering, 30 mm højstyrkebeton</p>
---

I opbygningen af de ventilerede brystningspartier er isoleringstykkelsen bestemt, så facadeelementet overholder U-værdikravet på 0,3 W/m<sup>2</sup>K. For at kunne vurdere effekten af at ventilere brystningen sammenlignes resultaterne for den ventilerede brystning med en referencemodel. I referencemodellen foregår luftindtaget gennem en normal friskluftventil, og det ventilerede hulrum erstattes med PIR-isolering. Det betyder, at brystningens tykkelse er uændret mellem referencemodellen og den ventileret model.

Tabel 2 viser en oversigt over typiske opbygninger anvendt i rapporten.

*Tabel 2. Opbygninger af ventilerede brystningspartier som overholder U-værdi 0,3 W/m<sup>2</sup>K. Opbygningen er beskrevet udefra.*












	Ventileret brystning	Reference
T110V20I70B30	110 mm muret væg 20 mm ventileret hulrum 70 mm PIR isolering 30 mm højstyrkebeton	110 mm muret væg 90 mm PIR isolering 30 mm højstyrkebeton
T110I70V20B30	110 mm muret væg 70 mm PIR isolering 20 mm ventileret hulrum 30 mm højstyrkebeton	110 mm muret væg 90 mm PIR isolering 30 mm højstyrkebeton
B30V20I72B50	30 mm højstyrkebeton 20 mm ventileret hulrum 72 mm PIR isolering 50 mm højstyrkebeton	30 mm højstyrkebeton 92 mm PIR isolering 50 mm højstyrkebeton
B30I72V20B50	30 mm højstyrkebeton 72 mm PIR isolering 20 mm ventileret hulrum 50 mm højstyrkebeton	30 mm højstyrkebeton 92 mm PIR isolering 50 mm højstyrkebeton

Radiatorens placering har indflydelse på opvarmningen af luften i den ventilerede brystning. Radiatorens placering varierer med placering enten mod brystningen i facaden eller mod indervæggen bagerst i rummet. Det antages, at radiatoren har samme dimensioner som brystningen og er dimensioneret for en fremløbstemperatur på 70 °C og en returtemperatur på 40 °C.

IDA ICE kan give detaljerede resultater for alle beregnede størrelser. I resultatdelen fokuseres på energibalancen i fyringssæsonen og temperaturen af den tilførte udelift. Tabel 3 viser et eksempel på resultatet fra IDA ICE for hver måneds energibalance. Resultaterne for "Local heating units" viser den tilførte energi fra radiatoren og benyttes i resultatbehandlingen til at vurdere ændringer i energibehov til opvarmning. Resultaterne for "Envelope&Thermal Bridges" angiver varmetabet gennem klimaskærmen (uden vinduer) og "Infiltration&Openings" angiver varmetabet pga. ventilationen. Disse to bidrag til energibalancen bliver især påvirket af, om brystningen er udført med eller uden et ventileret hulrum. Det interne varmetilskud fra personer og udstyr er sat til 5 W/m<sup>2</sup> og bliver i modellen repræsenteret som udstyr.

I den videre resultatbehandling vil opvarmningsbehovet blive beregnet ud fra ydelsen af "Local heating units" i perioden september til og med maj.

Tabel 3. Eksempel på energibalance fra IDA ICE. Alle tal er angivet i kWh.

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
											
1	-42.9	0.0	-11.9	0.0	-52.1	0.0	20.1	0.0	86.8	0.0	0.0
2	-36.8	-0.1	-3.3	0.0	-47.7	0.0	18.1	0.0	69.8	0.0	0.0
3	-39.4	-0.1	7.1	0.0	-56.0	0.0	20.1	0.0	68.3	0.0	0.0
4	-21.8	-0.2	17.2	0.0	-35.1	0.0	19.4	0.0	20.5	0.0	0.0
5	-16.1	-0.7	17.9	0.0	-27.2	0.0	20.1	0.0	9.3	-3.3	0.0
6	-12.5	-1.2	16.1	0.0	-21.2	0.0	19.4	0.0	3.1	-3.7	0.0
7	-8.9	0.0	19.1	0.0	-18.0	0.0	20.1	0.0	-0.0	-12.3	0.0
8	-7.9	0.4	24.2	0.0	-18.1	0.0	20.1	0.0	-0.0	-18.8	0.0
9	-12.2	1.0	21.5	0.0	-23.3	0.0	19.4	0.0	0.0	-6.4	0.0
10	-19.2	0.5	12.9	0.0	-29.8	0.0	20.1	0.0	15.6	-0.1	0.0
11	-34.4	0.0	-7.6	0.0	-43.4	0.0	19.4	0.0	65.9	0.0	0.0
12	-43.1	0.1	-13.6	0.0	-52.1	0.0	20.1	0.0	88.5	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>-295.2</b>	<b>-0.3</b>	<b>99.7</b>	<b>0.0</b>	<b>-423.9</b>	<b>0.0</b>	<b>236.5</b>	<b>0.0</b>	<b>427.8</b>	<b>-44.6</b>	<b>0.0</b>

## Resultater

Tabel 4, tabel 5, tabel 6 og tabel 7 opsummerer resultaterne for fyringssæsonen (september til maj). Energibalancen i tabellerne viser opvarmningsbehovet, varmetabet gennem ydervæggen, ventilationstabet og de resterende bidrag (solindfald, varmetab gennem vinduer, interne varmetilskud). Tabellerne viser også den gennemsnitlige temperatur af den tilførte udeluft i fyringssæsonen. De forskellige opbygninger er benævnt med koder, hvor T angiver tegldybden i mm, B angiver betonspaltens bredde i mm, I angiver bredden af isolering i mm, og V angiver ventilationsspaltens bredde i mm.

Tabel 4 og tabel 5 indeholder resultater for referencemodellen og modellen med ventileret brystning i det tilfælde, hvor radiatoren ikke er placeret ud for brystningen.

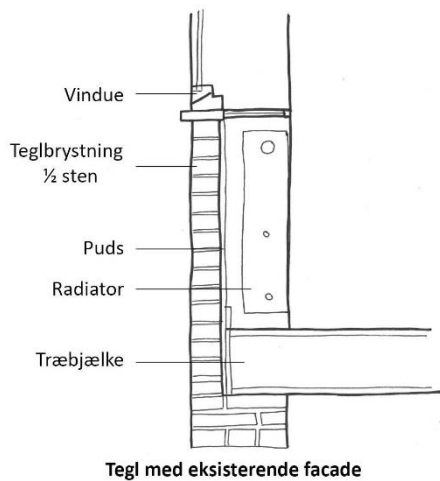
Tabel 6 og tabel 7 indeholder resultater for referencemodellen og modellen med ventileret brystning i det tilfælde, hvor radiatoren er placeret ud for brystningen.

Tabellerne viser resultater for forskellige opbygninger af brystningen, forskellige orienteringer og forskellig luftstrøm. I opbygningen med betonelementer forventes hele brystningen udskiftet ved en renovering, og brystningen er derfor opbygget ud fra en forudsætning om, at konstruktionen skal overholde en U-værdi på maks. 0,3 W/m<sup>2</sup>K. I tilfældet med den murede ydervæg forventes den eksisterende væg i brystningen at blive bevaret ved en renovering. For dette tilfælde vises derfor resultater til en løsning uden isolering i brystningen, og for løsninger som overholder en U-værdi på maks. 0,3 W/m<sup>2</sup>K. De fleste resultater vises for en luftstrøm på 3 l/s, hvilket repræsenterer en situation hvor lejligheden ventileres med luftskifte 0,3 l/s/m<sup>2</sup>. Nogle få eksempler vises for en luftstrøm på 7 l/s, der repræsenterer resultater for en lejlighed på 50m<sup>2</sup> med udsugning svarende til 35 l/s. Desuden vises resultaterne for enkelte eksempler uden solindfald på brystningen. Disse kan repræsentere bygninger beliggende i skygge og viser derfor indflydelsen af solindfaldet på brystningen.

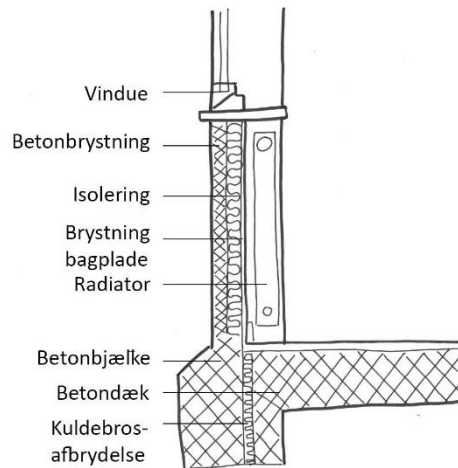
Resultaterne viser generelt, at når brystningen ventileres, påvirkes især varmetabet gennem brystningen og ventilationstabet. Varmetabet gennem brystningen stiger, da kold udeluft føres ind i konstruktionen, men samtidig reduceres ventilationstabet, da den tilførte udeluft bliver forvarmet. Desuden ses en påvirkning af opvarmningsbehovet, der for nogle løsninger stiger, mens andre løsninger medfører et fald i opvarmningsbehov. De resterende bidrag (solindfald, varmetab gennem vinduer, interne varmetilskud) påvirkes af orienteringen, men stort set ikke af om brystningen er ventileret eller ikke ventileret.

Generelt ses, at den gennemsnitlige temperatur af den tilførte udeluft stiger, når brystningen ventileres. Når konstruktionen er isoleret, er temperaturen af den tilførte udeluft meget afhængig af placeringen af det ventilerede hulrum. I situationer, hvor det ventilerede hulrum er placeret mellem udeklimaet og isoleringslaget, påvirkes temperaturen af den tilførte udeluft stort set ikke for den undersøgte isoleringstykkel. Placeres det ventilerede hulrum mellem isoleringslaget og indeklimaet, øges temperaturen af den tilførte udeluft. For den undersøgte isoleringstykkel ses, at temperaturstigningen for gennemsnitstemperaturen over fyringssæsonen generelt ligger omkring 6°C ved en luftstrøm på 3 l/s. Øges luftstrømmen, falder temperaturen af den tilførte udeluft.

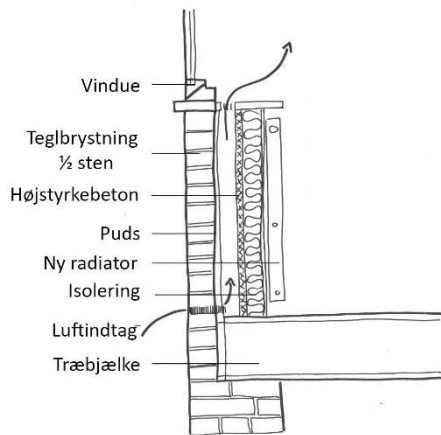
Ved at placere det ventilerede hulrum mellem isoleringslaget og indeklimaet kan temperaturen af den tilførte udeluft øges, hvilket kan medføre reducerede problemer med træk.



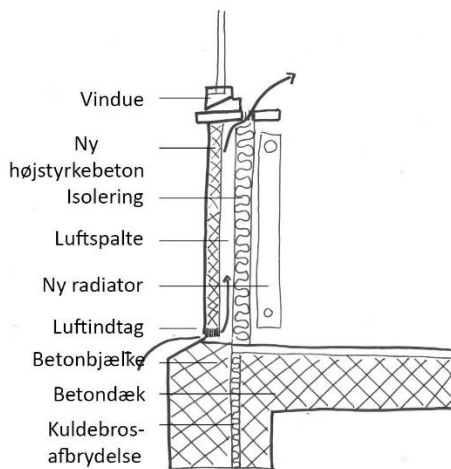
**Tegl med eksisterende facade**



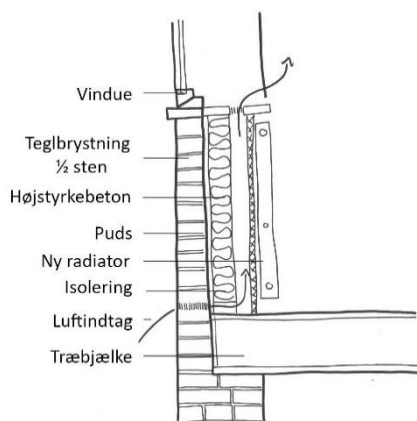
**Beton med eksisterende facade**



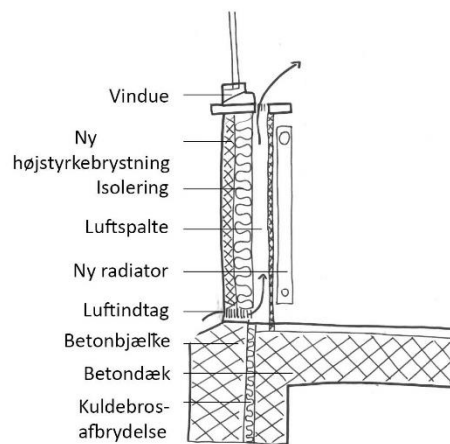
**Tegl med luftspalte på kulsesiden**



**Beton med luftspalte på kulsesiden**



**Tegl med luftspalte på varmesiden**



**Beton med luftspalte på varmesiden**

Figur 6. Skitser af hhv. tegl- og betonbrystninger med forskellige løsningsmodeller. Øverst ses brystninger hvor den eksisterende facade er bevaret, midtfor ses en løsning med luftspalte på kulsesiden og nederst en løsningsmodel med luftspalten placeret på varmesiden.



Tabel 4. Referencefacade uden ventileret hulrum og uden radiator ved brystningen. Energibalancen og gennemsnitlig temperatur for tilført udeluft for opvarmingsperioden september-maj.

Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Opvarmning (kWh)	Varmetab ydervæg (kWh)	Ventilationstab (kWh)	Resterende bidrag (kWh)	Temp. (°C)
T110V20B30	Nord	3	607,6	-337,5	-350,7	81,4	5,3
T110V20B30	Syd	3	462,2	-300,4	-366,2	204	5,3
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	470,6	-312,2	-365,1	206,4	5,3
T110V20B30	Syd	7	911,1	-293,7	-834,8	217,4	5,3
T110V20I70B30	Nord	3	569,3	-298,4	-351	80,9	5,3
T110V20I70B30	Syd	3	430,9	-266,1	-367	202,1	5,3
T110I70V20B30	Nord	3	569,2	-298,4	-351	80,9	5,3
T110I70V20B30	Syd	3	430,7	-266	-367,1	202,1	5,3
T110I70V20B30	Syd	7	878,1	-259,7	-835,2	217,1	5,3
B30V20I72B50	Nord	3	568,6	-298,7	-350,8	81,3	5,3
B30V20I72B50	Syd	3	424,7	-265,9	-366,7	207,7	5,3
B30V20I72B50	Øst	3	508,7	-281,9	-357,8	131,8	5,3
B30V20I72B50	Vest	3	508,2	-282	-357,3	132,5	5,3
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	427,2	-269,4	-366,3	208,2	5,3
B30I72V20B50	Nord	3	568,6	-298,7	-350,8	81,3	5,3
B30I72V20B50	Syd	3	424,5	-265,9	-366,7	207,8	5,3
B30I72V20B50	Øst	3	508,6	-281,8	-357,8	131,9	5,3
B30I72V20B50	Vest	3	508,4	-282,2	-357,3	132,5	5,3
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	427,2	-269,3	-366,3	208,2	5,3
B30V20B30I72B50	Syd	3	424,7	-265,9	-366,7	207,7	5,3

Tabel 5. Ventilert facade uden radiator ved brystningen. Energibalancen og gennemsnitlig temperatur for tilført udeluft for opvarmingsperioden september-maj.

Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Opvarmning (kWh)	Varmetab ydervæg (kWh)	Ventilationstab (kWh)	Resterende bidrag (kWh)	Temp. (°C)
T110V20B30	Nord	3	632,3	-475,3	-239,1	82,6	10,0
T110V20B30	Syd	3	475,4	-442,9	-235,9	202,9	10,8
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	498	-458,2	-251	210,7	10,0
T110V20B30	Syd	7	914,3	-449,4	-682,5	217,6	8,1
T110V20I70B30	Nord	3	565,1	-302,3	-343,3	81	5,6
T110V20I70B30	Syd	3	416,4	-273,3	-340,5	197,2	6,5
T110I70V20B30	Nord	3	559,8	-436,6	-205,1	82,4	11,4
T110I70V20B30	Syd	3	421,5	-414,1	-210,5	202,9	11,9
T110I70V20B30	Syd	7	866,3	-427,9	-656,8	218,5	8,5
B30V20I72B50	Nord	3	570	-302,1	-348,7	81,4	5,4
B30V20I72B50	Syd	3	410,1	-272,6	-337,4	199,9	6,6
B30V20I72B50	Øst	3	501,7	-287,3	-343,2	129,4	6,0
B30V20I72B50	Vest	3	501,3	-287,2	-342,8	129,8	6,0
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	435,4	-272,1	-373,8	210,5	4,9
B30I72V20B50	Nord	3	559,3	-434,1	-207	82,7	11,3
B30I72V20B50	Syd	3	415,2	-410,9	-212,8	208,6	11,8
B30I72V20B50	Øst	3	499,1	-421,6	-209,8	133,2	11,5
B30I72V20B50	Vest	3	499,2	-421,9	-209,6	133,6	11,5
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	418,4	-413,1	-214,9	209,7	11,7
B30V20B30I72B50	Syd	3	408,6	-272,4	-337,1	200,9	6,6

Tabel 6. Referencefacade uden ventileret hulrum og med radiator ved brystningen. Energibalancen og gennemsnitlig temperatur for tilført udeluft for opvarmingsperioden september-maj.

Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Opvarmning (kWh)	Varmetab ydervæg (kWh)	Ventilationstab (kWh)	Resterende Bidrag (kWh)	Temp. (°C)
T110V20B30	Nord	3	620,4	-349,7	-350,8	80,8	5,3
T110V20B30	Syd	3	472,4	-309,2	-366,3	203	5,3
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	480,6	-321	-365,3	205,9	5,3
T110V20B30	Syd	7	928,3	-309,9	-835,2	216,7	5,3
T110V20I70B30	Nord	3	573,7	-302,8	-351,1	80,9	5,3
T110V20I70B30	Syd	3	434,6	-269,5	-367,2	202	5,3
T110I70V20B30	Nord	3	573,7	-302,8	-351,1	80,9	5,3
T110I70V20B30	Syd	3	434,5	-269,5	-367,2	201,9	5,3
T110I70V20B30	Syd	7	884,1	-265,4	-835,7	216,7	5,3
B30V20I72B50	Nord	3	573,2	-303	-350,8	81,3	5,3
B30V20I72B50	Syd	3	428,7	-269,3	-366,7	207,5	5,3
B30V20I72B50	Øst	3	513	-285,9	-357,9	131,6	5,3
B30V20I72B50	Vest	3	512,2	-286	-357,3	132,1	5,3
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	431,2	-272,8	-366,5	208	5,3
B30I72V20B50	Nord	3	573,2	-303	-350,8	81,3	5,3
B30I72V20B50	Syd	3	428,4	-269,2	-366,7	207,5	5,3
B30I72V20B50	Øst	3	512,8	-285,8	-357,9	131,6	5,3
B30I72V20B50	Vest	3	512,5	-286,1	-357,3	132	5,3
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	431,1	-272,8	-366,5	208,1	5,3
B30V20B30I72B50	Syd	3	428,6	-269,3	-366,7	207,4	5,3

Tabel 7. Ventilert facade med radiator ved brystningen. Energibalancen og gennemsnitlig temperatur for tilført udeluft for opvarmingsperioden september-maj.

Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Opvarmning (kWh)	Varmetab ydervæg (kWh)	Ventilationstab (kWh)	Resterende bidrag (kWh)	Temp. (°C)
T110V20B30	Nord	3	639,1	-482,4	-236,9	80,7	10,1
T110V20B30	Syd	3	479,1	-438,8	-240,8	200,4	10,6
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	501,1	-451,9	-257,5	208,1	9,8
T110V20B30	Syd	7	924,1	-466	-673,9	215,7	8,2
T110V20I70B30	Nord	3	567,9	-307,6	-340,5	80,9	5,7
T110V20I70B30	Syd	3	418,9	-277,2	-338,8	197	6,6
T110I70V20B30	Nord	3	564,6	-447,6	-197,4	80,9	11,8
T110I70V20B30	Syd	3	425,7	-414,5	-213,1	201,8	11,8
T110I70V20B30	Syd	7	871,6	-446,1	-642,5	217	8,8
B30V20I72B50	Nord	3	573,5	-307,4	-346,7	81,3	5,5
B30V20I72B50	Syd	3	412,9	-276,4	-336,1	199,9	6,7
B30V20I72B50	Øst	3	505,3	-292,2	-341,9	129,3	6,0
B30V20I72B50	Vest	3	504,6	-292	-341,1	129,3	6,0
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	438,7	-276,1	-372,7	209,9	5,0
B30I72V20B50	Nord	3	563,9	-445,3	-199,4	81,4	11,7
B30I72V20B50	Syd	3	419,5	-411,6	-215,2	207,2	11,7
B30I72V20B50	Øst	3	503,5	-428,4	-206,3	131,6	11,7
B30I72V20B50	Vest	3	503,7	-428,9	-205,9	132	11,7
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	422,7	-413,4	-217,3	208	11,6
B30V20B30I72B50	Syd	3	411,7	-276,2	-335,9	200,4	6,7

Energibesparelsen ved at udforme brystningen med ventileret hulrum vises i tabel 8 og tabel 9. Generelt er ændringerne i opvarmningsbehovet mellem referencen og den ventilerede brystning meget små. Afhængigt af udformningen kan der dog være en mindre besparelse. For den murede ydervæg uden isolering er der en lille øgning i opvarmningsbehovet ved at ventilere brystningen. For løsninger med isolering ligger besparelsen mellem 1-2 % eller omkring 1 kWh/m<sup>2</sup>, svarende til 7-14 timers tændt tv, 1-2 vaske i vaskemaskine eller 2-4 døgn med tændt køleskab. Med de usikkerheder, der ligger i beregningen af opvarmningsbehovet, må det konkluderes, at opvarmningsbehovet ikke påvirkes nævneværdigt af, om facaden udføres med eller uden ventileret hulrum. Der ses heller ingen væsentlig forskel mellem energiforbruget til opvarmning afhængig af radiatorens placering.

Den ventilerede brystning kan dog medføre fordele ved, at den tilførte udeluft forvarmes. Figur 8.8 viser temperaturen af den tilførte udeluft som funktion af udeluftens temperatur for situationer, hvor det ventilerede hulrum hhv. er placeret mellem udeklimaet og isoleringslaget eller mellem isoleringslaget og indeklimaet. I situationen, hvor det ventilerede hulrum er placeret mellem isoleringslaget og indeklimaet, ses den største temperaturstigning af den tilførte udeluft ved lave udetemperaturer samt en lille spredning ved en given udetemperatur, hvilket betyder en lille indflydelse fra solindfaldet. Når det ventilerede hulrum er placeret mellem udeklimaet og isoleringslaget, er temperaturen af den tilførte udeluft generelt tæt på udetemperaturen.

Dog er der situationer, hvor den tilførte temperatur varierer meget for en given udetemperatur. Ved en udetemperatur på eksempelvis -10 °C opnås en temperaturstigning på omkring 12 °C, hvilket skyldes indflydelse fra solindfaldet på brystningen. Figur 9.a og 9.b viser temperaturen af den tilførte udeluft for løsningen B30V20I72B50 for januar og april måned samt udetemperaturen og solindfaldet gennem vinduerne til rummet. I tilfælde uden sol på brystningen ses, at temperaturen af den tilførte udeluft er stort set uændret i forhold til udeluften. Ved et væsentligt solindfald på brystningen ses derimod en øgning i temperaturen af den tilførte udeluft i perioden med sol på brystningen. Når solindfaldet er størst, medvirker solens stråling til en stigning på 5-10 °C. Mellem solindfaldets maksimum og temperaturens maksimum ses en lille men ubetydelig tidsmæssig forskydning, hvilket skyldes den termiske masse i brystningens beton.

Betydningen af den termiske kapacitet illustreres i

figur 1, hvor en isoleringsløsning med yderligere et betonlag på 30 mm mellem det ventilerede hulrum og isoleringen sammenlignes med en løsning, hvor der kun er 30 mm beton mellem udeluften og det ventilerede hulrum. Resultatet viser fire dage i april med varierende indflydelse fra solindfaldet. Her ses det, at det ekstra betonlag udjævner betydningen af solindfaldet, hvormed den øjeblikkelige temperaturstigning reduceres, men temperaturstigningen over længere tid derimod opretholdes. På dage uden sol medfører det ekstra betonlag en ekstra forskydning i tiden i forhold til udetemperaturen. Det betyder, at betonen om morgenen holder på nattens kulde, og at temperaturen af den tilførte luft derfor er lavere end udetemperaturen. Når udetemperaturen begynder at falde, holder betonen derimod på varmen, hvorved temperaturen af den tilførte luft holdes højere end udetemperaturen.



De tidsmæssige forskydninger og temperaturforskelle er meget små og har hverken nævneværdig betydning for energibalancen set over fyringssæsonen i tabel 5 og tabel 7 eller den termiske komfort. Påvirkningen fra den termiske masse er således meget begrænset, og det forventes derfor ikke, at den termiske masse kan bidrage til en reduktion af opvarmnings- eller kølebehov.

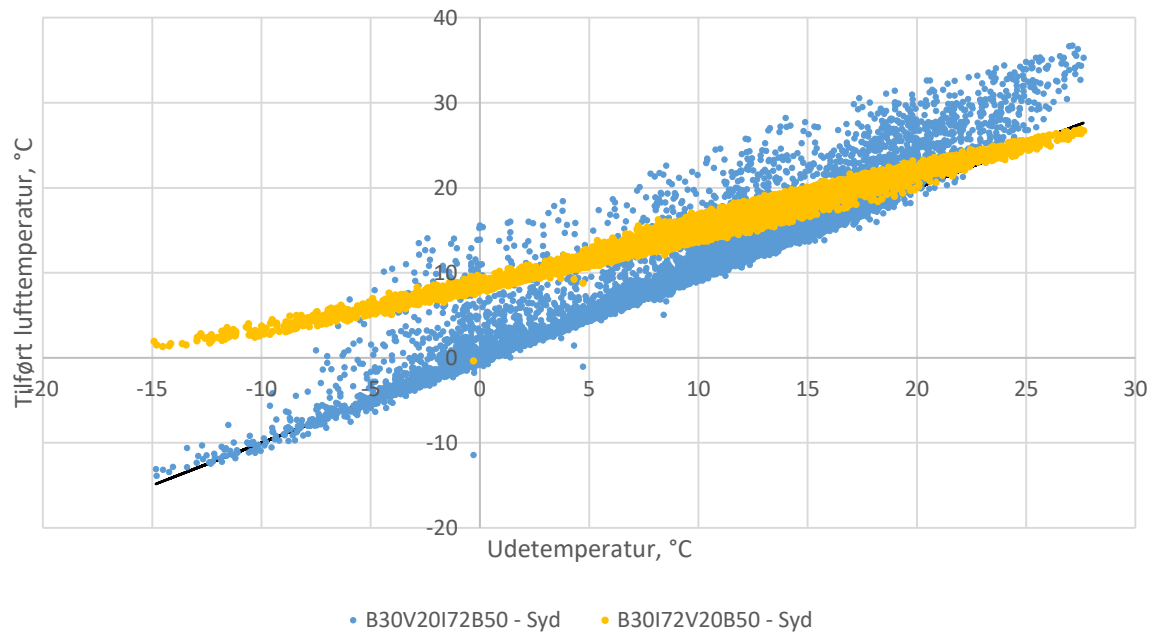
Tabel 8. Energibesparelse for ventileret brystning uden radiator mod brystningen. Energibesparelse udtrykt som forskel i opvarmningsbehov mellem referencemodel og model med ventileret brystning. I beregninger pr. areal antages at hvert udsnit dækket 10 m<sup>2</sup> bolig.

Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Besparelse i opvarmningsbehov			
			kWh	kWh pr. m <sup>2</sup>	kWh pr. l/s	Procent
T110V20B30	Nord	3	-24,7	-2,5	-8,2	-4,1
T110V20B30	Syd	3	-13,2	-1,3	-4,4	-2,9
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	-27,4	-2,7	-9,1	-5,8
T110V20B30	Syd	7	-3,2	-0,3	-0,5	-0,4
T110V20I70B30	Nord	3	4,2	0,4	1,4	0,7
T110V20I70B30	Syd	3	14,5	1,5	4,8	3,4
T110I70V20B30	Nord	3	9,4	0,9	3,1	1,7
T110I70V20B30	Syd	3	9,2	0,9	3,1	2,1
T110I70V20B30	Syd	7	11,8	1,2	1,7	1,3
...						
B30V20I72B50	Nord	3	-1,4	-0,1	-0,5	-0,2
B30V20I72B50	Syd	3	14,6	1,5	4,9	3,4
B30V20I72B50	Øst	3	7,0	0,7	2,3	1,4
B30V20I72B50	Vest	3	6,9	0,7	2,3	1,4
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	-8,2	-0,8	-2,7	-1,9
B30I72V20B50	Nord	3	9,3	0,9	3,1	1,6
B30I72V20B50	Syd	3	9,3	0,9	3,1	2,2
B30I72V20B50	Øst	3	9,5	1,0	3,2	1,9
B30I72V20B50	Vest	3	9,2	0,9	3,1	1,8
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	8,8	0,9	2,9	2,1
B30V20B30I72B50	Syd	3	16,1	1,6	5,4	3,8

Tabel 9. Energibesparelse for ventileret brystning med radiator mod brystningen. Energibesparelse udtrykt som forskel i opvarmningsbehov mellem referencemodel og model med ventileret brystning. I beregninger pr. areal antages at hvert udsnit dækket 10 m<sup>2</sup> bolig.

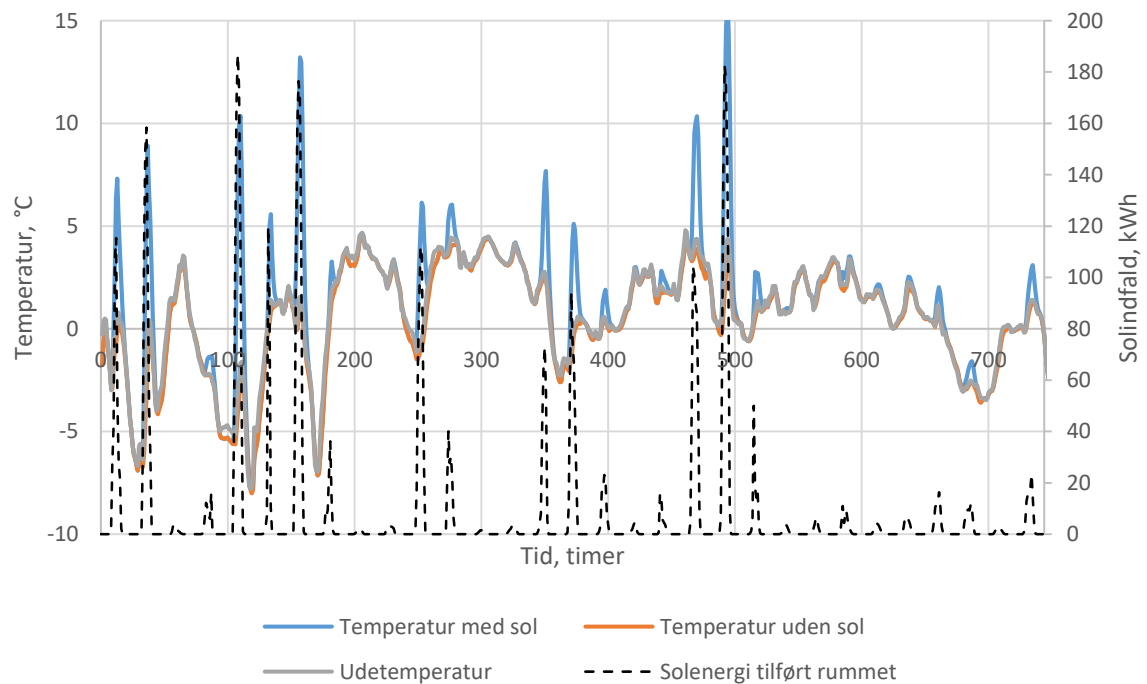
Opbygning	Orientering	Luftstrøm (l/s)	Besparelse i opvarmningsbehov			
			kWh	kWh pr. m <sup>2</sup>	kWh pr. l/s	Relativ besparelse (%)
T110V20B30	Nord	3	-18,7	-1,9	-6,2	-3,0
T110V20B30	Syd	3	-6,7	-0,7	-2,2	-1,4
T110V20B30	Syd uden sol på brystning	3	-20,5	-2,1	-6,8	-4,3
T110V20B30	Syd	7	4,2	0,4	0,6	0,5
T110V20I70B30	Nord	3	5,8	0,6	1,9	1,0
T110V20I70B30	Syd	3	15,7	1,6	5,2	3,6
T110I70V20B30	Nord	3	9,1	0,9	3,0	1,6
T110I70V20B30	Syd	3	8,8	0,9	2,9	2,0
T110I70V20B30	Syd	7	12,5	1,3	1,8	1,4
...						
B30V20I72B50	Nord	3	-0,3	0,0	-0,1	-0,1
B30V20I72B50	Syd	3	15,8	1,6	5,3	3,7
B30V20I72B50	Øst	3	7,7	0,8	2,6	1,5
B30V20I72B50	Vest	3	7,6	0,8	2,5	1,5
B30V20I72B50	Syd uden sol på brystning	3	-7,5	-0,8	-2,5	-1,7
B30I72V20B50	Nord	3	9,3	0,9	3,1	1,6
B30I72V20B50	Syd	3	8,9	0,9	3,0	2,1
B30I72V20B50	Øst	3	9,3	0,9	3,1	1,8
B30I72V20B50	Vest	3	8,8	0,9	2,9	1,7
B30I72V20B50	Syd uden sol på brystning	3	8,4	0,8	2,8	1,9
B30V20B30I72B50	Syd	3	16,9	1,7	5,6	3,9

## Temperatur af tilført udeluft som funktion af udetemperaturen uden radiator ved brystningen



Figur 8. Temperaturen af tilført udeluft som funktion af udeluftens temperatur for forskellig placering af det ventilerede hulrum.

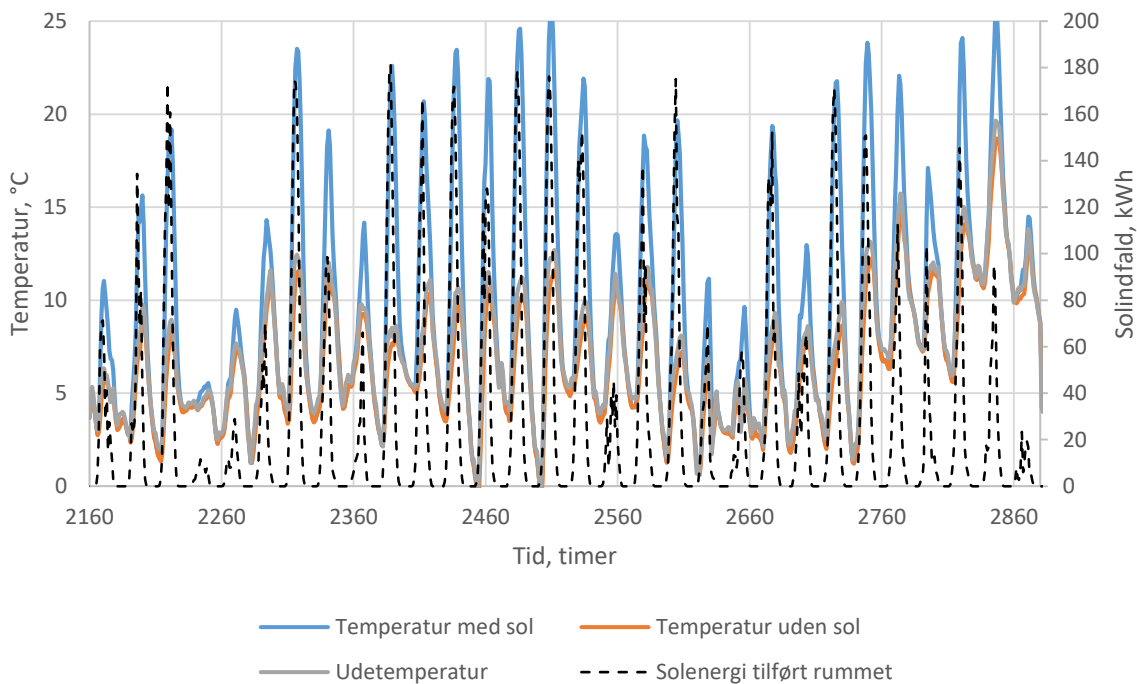
## Temperatur af tilført udeluft i januar



Figur 9.a. Figuren viser temperaturen af den tilførte udeluft for januar med og uden sol på brystningen. Desuden vises udetemperaturen og solindfaldet gennem vinduerne til rummet. Resultaterne er vist for opbygningen B30V20I72B50 orienteret

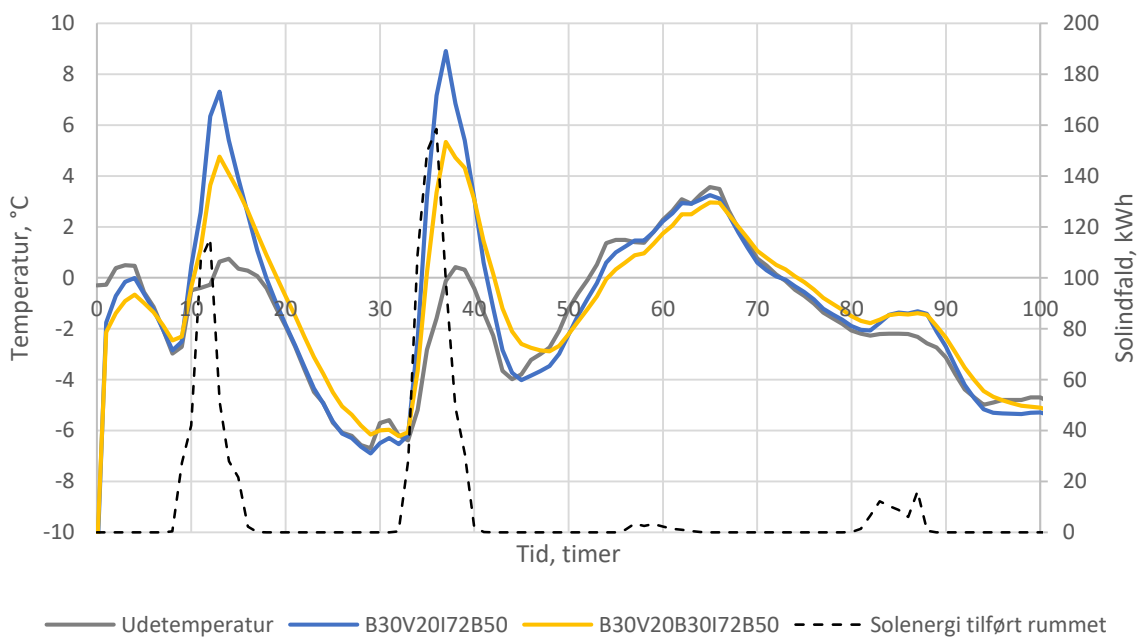


### Temperatur af tilført udeluft i april



Figur 9.b. Figuren viser temperaturen af den tilførte udeluft for april måned med og uden sol på brystningen. Desuden vises udetemperaturen og solindfaldet gennem vinduerne til rummet. Resultaterne er vist for opbygningen B30V20I72B50 orienteret mod syd med luftstrøm på 3 l/s.

### Temperatur af tilført udeluft med ekstra betonlag mod det ventilerede hulrum



Figur 1. Figuren viser betydningen af at tilføre et lag beton på 30 mm mellem det ventilerede hulrum og isoleringen i forhold til løsningen, hvor der kun er 30 mm beton mellem udeluften og det ventilerede hulrum.

## Diskussion af resultater

Beregningsmodellen er implementeret i IDA ICE gennem programmering af en ny model for et ventileret hulrum. Flere af parametrene i modellen er behæftet med en del usikkerhed, og et mere præcist estimat vil kræve en hel forsøgsrække for flere af dem.

I modellen antages en ideel luftstrøm, som forløber jævnt over hele fladen. I praksis vil luftstrømmen i hulrummet blive påvirket af selve hulrummets udformning og forbindelsen gennem klimaskærmen til hulrummet. Dette vil påvirke modstanden mod luftstrømmen og varmeoverførslen ved konvektion. Modellen anvender konvektive varmeovergangstal fra litteraturen. Bedre estimater af de reelle konvektive varmeovergangstal kan findes med forsøg og efterfølgende revideres i modellen. Modstanden mod luftstrømmen er repræsenteret ved en standard komponent fra IDA ICE, hvor det er muligt at tilpasse parametrene på baggrund af målinger. Ligeledes er varmeudvekslingen mellem væg og radiator baseret på standardkomponenter i IDA ICE, hvor det er muligt at tilpasse parametre for stråling og konvektion baseret på mere detaljerede målinger.

Det vurderes, at modellen giver et rimeligt grundlag til vurdering af forskellige løsninger i forhold til hinanden. De absolutte tal for energibesparelser og temperaturer vil dog være behæftet med væsentlig usikkerhed, indtil modellens parametre kan tilpasses mere realistiske værdier fra forsøg. Resultaterne for de undersøgte løsninger viser desuden, at modellen reagerer som forventet på dynamiske effekter som ændringer i termisk kapacitet. Netop dette er en væsentlig grund til at implementere modellen i et dynamisk simuleringværktøj frem for en mere simpel vurdering på baggrund af stationære betragtninger.

Modellen er udviklet til at indgå i en dynamisk årssimulering af energibehov og termisk komfort og er i sig selv ikke detaljeret nok til at vurdere lokale overfladetemperaturer. Det vil derfor være nødvendigt at supplere med mere detaljerede analyser for eksempelvis at kunne vurdere lokalt lave overfladetemperaturer med kondensrisiko som følge.

Resultaterne for de undersøgte opbygninger med ventileret brystning er baseret på, at hele frisklufttilførslen kommer gennem det ventilerede hulrum. I praksis vil lufttilførslen også kunne ske gennem utilsigtede utætheder i klimaskærmen og gennem åbne/utætte vinduer eller døre. Luftstrømmens fordeling mellem forskellige åbninger til det fri vil afhænge af forhold som f.eks. vindpåvirkning og strømningsmodstande. Bestemmelsen af strømningsmodstanden gennem den ventilerede brystning vil dog kræve en række forsøg. Modelværktøjet understøtter en mere detaljeret beregning af luftstrømme og kan således anvendes til netop dette formål i videre studier.

## Konklusion

I projektet er en model for et ventileret facadeelement implementeret i det generelle bygningssimuleringværktøj IDA ICE. Den nye model er generisk for et ventileret hulrum, og brugen i IDA ICE er således ikke begrænset til kun at omfatte opbygninger af brystninger, som er undersøgt i dette projekt. Koden er open source og kan yderligere tilpasses og valideres gennem praktiske forsøg.

Resultaterne viser, at udformningen af brystningen med et ventileret hulrum har en meget begrænset påvirkning af opvarmningsbehovet, og afhængigt af udførelsen kun medfører en lille reduktion.

Dog er det med den rette udformning muligt at opnå en væsentlig opvarmning af den tilførte udeluft. Denne effekt er størst, når hulrummet placeres mellem isoleringslaget i brystningen og indeklimaet. Stigningen i temperaturen af den tilførte udeluft kan modvirke følelsen af træk.

Modelværktøjet kan således bidrage med følgende konkrete resultater:

- Studier, forudsætninger og konklusion af forvarmning- og kølepotentialet
- Opstilling og afprøvning af X antal løsningsscenarier
- Beskrivelse af modelværktøjets rammebetingelser, muligheder og begrænsninger
- Færdigt plug-in til IDA ICE som projektgruppen kan anvende i de efterfølgende faser

## Perspektivering

Klimafacaden er særligt velegnet til historiske bygninger, eller byggerier hvor indvendig isolering ellers ikke ville være muligt. Facaden kan etableres nænsomt og kræver kun mindre reversible indgreb i bygningen, ændrer hverken bygningens interiør eller rummenes proportioner og er ligesom ældre huse baseret på en passiv teknologi, hvilket øger systemets kompatibilitet til denne type bygninger i både Danmark og resten af Europa.

Ud over historiske bygninger har Klimafacaden et stort potentiale ved renovering i den almene boligsektor, hvor mistrivsel med mekanisk ventilation er et anerkendt problem. Alene i Danmark findes ca. 1 mio. etageboliger, hvoraf ca. 400.000 er almene boligbyggerier. Her forventes Klimafacaden at kunne bidrage til beboernes komfort og forståelse for teknikken bag frisk luft i boligen. Den færdige klimafacade forventes endvidere som anvendelig løsning ved renovering af kontorbygninger og evt. i nybyggeri.

Der ligger et stort potentiale i et produkt, der kan installeres i eksisterende bygninger uden behov for omfattende rørføringer, tekniske installationer og bygningsmæssige ændringer. Et facadeelement baseret på passive teknologier kan minimere drift og vedligeholdelsesomkostninger, og et ventilationsprincip, der ikke forudsætter kanalføringer og store ombygninger, har lavere miljøpåvirkning og giver mulighed for at bevare eksisterende arkitektur. Klimafacaden kan i energieffektivitet ikke konkurrere med ventilation med varmegenvinding, men kan ud fra andre parametre være et bedre alternativ. Idet facadesystemet forvarmer ventilationsluften med varme fra varmesystemer og ikke fra el, anvendes varmen i varmesystemet mere effektivt, og tilbageløbstemperaturen til forsyningsselskabet bliver lavere.

I dag arbejdes der sjældent med kølende ventilation i Danmark, men på verdensplan er køling i boliger almindeligt og medfører et enormt energiforbrug. Potentialet i et klimatilpasset temperaturregulerende system kan således have global samfundsøkonomisk interesse, da både energiforsyning effektiviseres og økonomiske varmeomkostninger falder.

Klimafacaden udgør således et potentielt internationalt, energimæssigt og bæredygtigt bidrag til at indfri EU's 2030-mål om en samlet reduktion i CO<sub>2</sub>-udledning på 40 %.

## Litteratur

- [1] EQUA Simulation AB, *IDA ICE*, <https://www.equa.se/en/ida-ice>
- [2] P. Sahlin, *NMF Handbook*, KTH, Stockholm, 1996.
- [3] T.F. Irvine og J.P. Hartnett, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, Academic Press, New York, 1978.
- [4] A.F. Mills, *Heat Transfer*, Irwin, 1992.
- [5] J.S. Spiegelhauer, *Multiphysical calculation model for pre-heating of replacement air through ventilated façade elements*, Kandidatspeciale, DTU, 2018.
- [6] L. Thorsted og N. Østergaard, *Development of multifunctional facade elements for renovation of building facades*, Kandidatspeciale, DTU, 2018.
- [7] J. Kragh, *Energirenovering af etagebyggeriet*, Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2010.  
WEB: [https://byggeriogenergi.dk/media/1234/energirenovering\\_af\\_etagebyggeriet.pdf](https://byggeriogenergi.dk/media/1234/energirenovering_af_etagebyggeriet.pdf)

## Appendix A – NMF kode for ventileret hulrum

CONTINUOUS\_MODEL Vent\_Gap\_WW

ABSTRACT

"Ventilated air gap with opaque construction on both sides

Revisions

Based on Double facade model\_proposal from EQUA

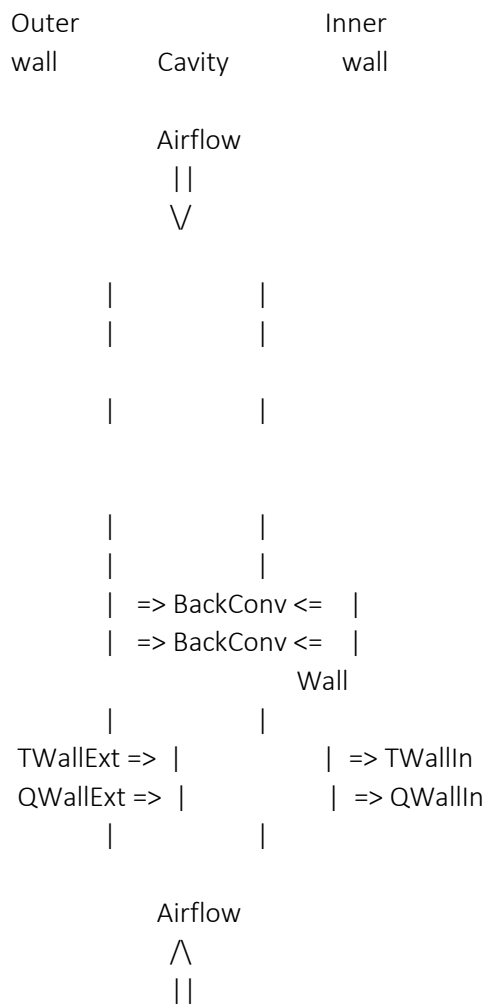
23/7-2019:

TRN, Convective heat transfer coeff. changed to parallel plate flow

Nusselt laminar flow reference: Advances in heat transfer, T.F. Irvine and J.P. Hartnett, 1978.

Nusselt turbulent flow reference: Heat Transfer, A.F. Mills, 1992.

Must have two and only two BIDIR connections



```

"
EQUATIONS
/***** Temperatures from terminals *****/
MTot := IF MF_0 > 0 THEN MF_0 ELSE 0 END_IF +
      SUM i = 1, nTerminal
      IF MF[i] > 0 THEN MF[i] ELSE 0 END_IF
      END_SUM;

FOR i = 1, nTerminal
  IF MF[i] > 0 THEN
    Tterm[i] := (Q[i]/MF[i]-XHum*2.501e6)/(1006+XHum*1805)
    /* Q[i] = Enthal(Tterm[i], XHum) * MF[i] */
  ELSE
    Tterm[i] := ABS_ZERO
  END_IF
END_FOR;

TtermInlet := MAX(Tterm[1], Tterm[2]);

IF MTot > 0 THEN
  Tmeanair := (TtermInlet+Tair)/2
ELSE
  Tmeanair := Tair
END_IF;

/***** Convective heat transfer coefficient *****/

ACH := MTot * 3600 / (Rho * vol);
AirSpeed := MTot / (Rho * aCav);

/* Hydraulic Diameter*/
Dh := 2*(length*depth)/(length+depth);

/* Reynolds number*/
Reynolds := AirSpeed * Dh / kinVisc;

Eric := IF Reynolds > 100 THEN
  (0.790 * log(Reynolds) - 1.64)**(-2)
ELSE
  1
END_IF;

```

```

/*Nusselt Inner Wall*/
Nu := IF NUinner > 0 THEN
    NUinner
ELSE_IF Reynolds < 2800 THEN
    /*For laminar flow between parallel plates with different wall temperatures*/
    4.0
ELSE
    ((Fric/8) * (Reynolds - 1000) * pr) / (1 + 12.7 * (Fric/8)**(1/2) * (pr**(2/3)-1))
END_IF;

```

```

/*Nusselt Outer Wall*/

```

```

NuOut := IF NUouter > 0 THEN
    NUouter
ELSE_IF Reynolds < 2800 THEN
    /*For laminar flow between parallel plates with different wall temperatures*/
    4.0
ELSE
    ((Fric/8) * (Reynolds - 1000)) * pr / (1 + 12.7 * (Fric/8)**(1/2) * (pr**(2/3)-1))
END_IF;

```

```

/*Forced Convection Coefficients*/

```

```

HConvForced := Nu * lambda / Dh;
OutHConvForced := NuOut * lambda / Dh;

```

```

/*Convective Heat Transfer Coefficients*/

```

```

HConvNatWall := U_film(1,1,Tmeanair, TWall, ACH,slopeDbFaca);
HConvWall := IF LINEARIZE(1) THEN
    1.
ELSE
    MAX(hConvNatWall, hConvForced)
END_IF;

```

```

HConvNWallOut := U_film(1,1,Tmeanair, TWallOut, ACH, slopeDbFaca);
HCnvWallOut := IF LINEARIZE(1) THEN
    1.
ELSE
    MAX(HConvNWallOut, outHConvForced)
END_IF;

```

```

/***** Convective heat transfer *****/

/***** Inner Wall *****/

QConvWall := HConvWall * aWall * (TWall - Tmeanair);
QLWWall := emitWall*aWall*BOLTZ *
          ABS(((TWall-ABS_ZERO)**2 + (TWallOut-ABS_ZERO)**2)
            * ((TWall-ABS_ZERO) + (TWallOut-ABS_ZERO) ))
          * ( TWall - TWallOut);

QWall = QConvWall + QLWWall;

QLWWallTot := QLWWall;
QConvWallTot := QConvWall;

/***** Outer Wall *****/

QCnvWallOut := HCnvWallOut * aWall * (TWallOut - Tmeanair);

QCnvWallTotOut := QCnvWallOut;

QWallOut = QCnvWallTotOut - QLWWallTot;

/***** Air mass balance *****/
0 = MF_0 + SUM i=1, nTerminal MF[i] END_SUM;

/***** Energy balance - Air *****/
HAir = Enthal(Tmeanair, XHum);
MassAir := Rho * vol;

MassAir * HAir' = QConvWallTot + QCnvWallTotOut +
                 Q_0 + SUM i=1, nTerminal Q[i] END_SUM;

/***** CO2 balance *****/
MassAir * XCO2' = XF_0 + SUM i=1, nTerminal XF[i] END_SUM;

/***** Humidity balance *****/
MassAir * XHum' = VapF_0 + SUM i=1, nTerminal VapF[i] END_SUM;

```



```
Rho := RhoMois(Tmeanair,XHum);
```

#### LINKS

```
ControlLink CtrShad CtrShading (input);
```

```
T ReadTemp TAir (output);
```

```
/* Air flows */
```

```
BiDirAir Term_0 P, POS_IN MF_0, TAir, POS_IN Q_0,  
XCO2, POS_IN XF_0, XHum, POS_IN VapF_0;
```

```
FOR i = 1, nTerminal
```

```
BiDirAir Term[i] P, POS_IN MF[i], TAir, POS_IN Q[i],  
XCO2, POS_IN XF[i], XHum, POS_IN VapF[i]
```

```
END_FOR;
```

```
/* Heatflow from the inner wall */
```

```
TQ TQWall TWall, POS_IN QWall;
```

```
/* Heatflow from the outer wall */
```

```
TQ TQWallOut TWallOut, POS_IN QWallOut;
```

#### VARIABLES

```
Control CtrShading IN 0 0 1 "Shading control [0..1] NOT USED"
```

```
Temp TAir OUT 23.2 ABS_ZERO BIG "Exit air temp from gap"
```

```
Enthalpy HAir OUT 43000 -BIG BIG "Facade air enthalpy, well mixed"
```

```
Density Rho A_S 1.2 SMALL BIG "Air density"
```

```
Mass MassAir LOC 4 SMALL BIG "Air mass"
```

```
MassFlow MF_0 OUT 0.03 -BIG BIG "Mass flow from term_0"
```

```
MassFlow MF[nTerminal] IN -0.03 -BIG BIG "Mass flow from term[i]"
```

```
MassFlow MTot LOC 0.03 -BIG BIG "Total mass flow through double facade"
```

```
Factor ACH LOC 0.03 -BIG BIG "Air change per hour"
```

```
Velocity AirSpeed LOC 0.3 SMALL BIG "Air velocity"
```

```
Factor Reynolds LOC 0.03 -BIG BIG "Reynolds number"
```

```
Factor Nu LOC 0.03 -BIG BIG "Nusselts number for inner wall"
```

```
Factor NuOut LOC 0.03 -BIG BIG "Nusselts number for outer wall"
```

```
Length Dh LOC 0.059 SMALL BIG "Hydraulic Diameter"
```

```
Factor Fric LOC 0.059 SMALL BIG "Friction factor turbulent flow"
```

```

HeatFlux Q_0          IN  0  -BIG  BIG  "Heat flux from term_0"
HeatFlux Q[nTerminal] IN  0  -BIG  BIG  "Heat flux from term[i]"

HeatFlux QConvWall    LOC  0  -BIG  BIG  "Convective heat flux from inner wall"
HeatFlux QCnvWallOut  LOC  0  -BIG  BIG  "Convective heat flux from outer wall"
HeatFlux QLWWall      LOC  0  -BIG  BIG  "LW heat flux from wall"
HeatFlux QWall        OUT  0  -BIG  BIG  "Heat flux from inner wall"
HeatFlux QConvWallTot LOC  0  -BIG  BIG  "Total Convective heat flux from inner
wall"
HeatFlux QCnvWallTotOut LOC  0  -BIG  BIG  "Total Convective heat flux from outer
wall"
HeatFlux QLWWallTot   LOC  0  -BIG  BIG  "Total Long Wave heat flux from inner wall"
HeatFlux QWallOut     OUT  0  -BIG  BIG  "Heat flux from outer wall"

Temp TWall           IN  23.2 ABS_ZERO BIG  "Wall temp"
Temp TWallOut        IN  23.2 ABS_ZERO BIG  "Outer wall temp"
Temp Tterm[nTerminal] LOC  23.2 ABS_ZERO BIG  "Temperature air from term[i]"
Temp TtermInlet      LOC  23.2 ABS_ZERO BIG  "Inlet air temp"
Temp Tmeanair        LOC  23.2 ABS_ZERO BIG  "Mean air temp in gap"

/* FRACTION CO2 */
Fraction_y XCO2      OUT  720  SMALL  BIG  "Fraction concentrate in zone"
FractFlow_y XF_0     IN  17   -BIG  BIG  "Fract flow from term_0"
FractFlow_y XF[nTerminal] IN -17  -BIG  BIG  "Fract flow from term[i]"

/* HUMIDITY */
HumRatio XHum        OUT  0.005 SMALL  BIG  "Humidity in facade, ratio [kg/kg]"
HumFlow VapF_0       IN  0.00017 -BIG  BIG  "Vapour flow, term_0"
HumFlow VapF[nTerminal] IN -0.00017 -BIG  BIG  "Vapour flow, term[i]"

/* PRESSURE */
Pressure P           IN  1324  SMALL  BIG  "Facade air pressure"

HeatConda HConvWall  LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, inner wall"
HeatConda HConvNatWall LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, natural, inner
wall"
HeatConda HCnvWallOut LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, outer wall"
HeatConda HConvNWallOut LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, natural, outer
wall"

HeatConda HConvForced LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, forced"
HeatConda OutHConvForced LOC  3  SMALL  BIG  "Conv heat transfer, forced"

```

MODEL\_PARAMETERS

INT nTerminal SMP 1 1 BIGINT "Air flow terminals-1"

PARAMETERS

Length depth S\_P 0.03 SMALL BIG "Depth of cavity"

Length height S\_P 3 SMALL BIG "Height of cavity"

Length length S\_P 4 SMALL BIG "Length of cavity/wall"

Volume vol C\_P 3.25 SMALL BIG "Volume of cavity"

Area aWall C\_P 12 SMALL BIG "Area of wall part"

Area aCav C\_P 0.36 SMALL BIG "Area of cavity face"

Factor kinVisc S\_P 1.6E-5 SMALL BIG "Kinematic viscosity"

Factor pr S\_P 0.71 SMALL BIG "Prand's number"

Factor lambda S\_P 0.0263 SMALL BIG "Thermal conductivity"

Factor NUinner S\_P 0 0 BIG "Nusselt for inner wall. Possible to give fixed value  
e.g. from CFD. IF = 0 then calculated"

Factor NUouter S\_P 0 0 BIG "Nusselt for outer wall. Possible to give fixed  
value e.g. from CFD. IF = 0 then calculated"

Angle slopeDbFaca S\_P 90 0 180 "Slope of cavity"

Factor emitWall S\_P 0.9 SMALL 1 "Wall surface emittance"

PARAMETER\_PROCESSING

aWall := length \* height;

aCav := length \* depth;

vol := length \* height \* depth;

END\_MODEL