
Elforsk

Maj 2014

PROVENT

PROJEKTERINGSVIDEN OM VENTILATIONSVINDUER

PROJEKTProVent
Elforsk

Projekt nr. 13.749.00
Version 1
Udarbejdet af CJJ og JBI
Kontrolleret af KGE

Forord

Denne rapport er resultatet af PSO projektet 340-035 "ProVent, Projekteringsviden om ventilationsvinduer" udført med støtte fra Dansk Energi.

Projektet er gennemført af følgende projektgruppe med NIRAS som projektleder:

NIRAS A/S (projektleder):	Jacob Birck Laustsen Christopher Just Johnston Lau Markussen Raffnsøe
SBi	Rob Marsh
DTU BYG	Svend Svendsen David Appelfeld
HORN vinduer	Poul Christensen
HansenProfile A/S	Søren Haubjerg Sørensen

Juni 2014

1	Resume	1
2	Introduktion	3
2.1	Baggrund	3
2.2	Formål	3
3	Metode	5
3.1	Fremgangsmåde	6
3.1.1	Første trin	6
3.1.2	Andet trin	7
3.1.3	Tredje trin	7
3.2	Vindueskonstruktion	7
3.3	Guarded Hot Box (GHB)	8
3.3.1	Forsøgsopstilling	9
3.3.2	Testvindue 1, DTU BYG	10
3.3.3	Testvindue 2, FH IBP	10
3.3.4	Ramme/karmkonstruktion	11
3.4	Computational Fluid Dynamics (CFD)	11
3.4.1	Første beregningstrin: SIMPLE & groft mesh	12
3.4.2	Andet beregningstrin: PISO & fint mesh	12
3.4.3	Turbulens model: SST k- ω	13
3.4.4	Geometri og rammebetingelser	13
3.4.5	Begrænsninger	14
3.5	Numerisk algoritme WinVent (WV)	15
3.5.1	Varmeledning og konvektion	15
3.5.2	Stråling og solstråling	16
3.5.3	Kontrol af kvalitet	16
3.5.4	Anvendelighed og brug	17
3.5.5	Begrænsninger	17
3.6	Parametervariation og multipel lineær regression	18
3.6.1	Parametervariation	18
3.6.2	Multipel lineær regression	18
3.6.3	Matematiske modeller til dynamisk simulering	19
3.6.3.1	Bestemmelse af optimal volumenstrøm gennem ventilationsvindue	19
3.6.3.2	Model til bestemmelse af temperaturstigning i dynamisk simulering	21
3.6.3.3	Model til bestemmelse af energitab i dynamisk simulering	21
3.6.4	Begrænsninger	22
3.7	Dynamisk simulering i simpel bygning (IESVE)	23
3.7.1	Implementering i IESVE	23
3.7.2	Model geometri	23
3.7.2.1	Rum	24
3.7.2.2	Vinduer	24
3.7.2.3	Konstruktioner	24

INDHOLD

3.7.2.4	Opvarmning og ventilationssystem.....	25
4	Resultater	27
4.1	Eksperimentelt- og beregningsteknisk grundlag for metode	27
4.1.1	Sammenhold af resultater fra GHB og WV – Volumenstrømme	27
4.1.2	Sammenhold af resultater uden strålingsbidrag fra WV og CFD – Volumenstrømme	28
4.1.3	Sammenhold af resultater uden strålingsbidrag fra CFD og WV – Udetemperaturer.....	30
4.1.4	Solstråling	31
4.1.5	Delkonklusion.....	31
4.2	Multipel lineær regression – Matematiske modeller	31
4.2.1	Matematisk model til beregning af leveret frisklufttemperatur ..	32
4.2.2	Matematisk model til beregning af effektiv U-værdi.....	34
4.2.3	Delkonklusion.....	36
4.3	Dynamisk simulering i simpel bygning (IESVE).....	36
4.3.1	Resultater.....	37
5	diskussion	39
5.1	Luftskifte.....	39
5.2	Indeklima.....	39
5.3	Køling.....	39
5.4	Arkitektur og pladsforhold.....	40
5.5	Vinduesopbygning	40
5.6	Solstråling	40
5.7	g-værdi.....	41
5.8	Støjdæmpning	41
5.9	Forvarmning i ramme/karm.....	41
6	Referencer	42

1 RESUME

Der er stor interesse for såkaldte Ventilationsvinduer, som fungerer ved, at der føres ventilationsluft fra udeklimaet ind via en åbning i bunden af vinduet, op gennem et stort hulrum mellem glaslagene, og videre ind i bygningen via en åbning i toppen af vinduet. På vej op gennem det ventilerede hulrum sker der en vis forvarmning af den kolde udeluft, idet en del af varmetabet gennem ruden overføres til ventilationsluften som en form for varmegenvinding. Samtidig forventes det, at der kan opnås en forbedret udnyttelse af solindfaldet, idet en del af den absorberede solstråling i glaslagene transporteres med ventilationsluften ind i bygningen.

Der er forventninger om, at ventilationsvinduer kan reducere energibehovet i bygninger og eventuelt øge komforten, men der er stadig uklarhed om besparelspotentialet, og hvordan de påvirker indeklimaet i bygninger. Idet ventilationsvinduer har dynamiske egenskaber, kan de ikke håndteres på traditionel vis i gængse bygningssimuleringsprogrammer.

I dette projekt er der udviklet en metode til at bestemme ventilationsvinduers energimæssige egenskaber og deres effekt på energibehovet i bygninger på en retvisende måde. Metoden er baseret på simuleringer i en CFD-model af ventilationsvinduet, målinger i Guarded Hot Box (GHB), samt beregningsalgoritmen WinVent. Ved at sammenholde WinVent-beregninger med CFD-simuleringer og Hot Box målingerne er det fundet, at WinVent kan bestemme ventilationsvinduers energimæssige egenskaber tilfredsstillende ved varierende fysiske rammebetingelser.

Vha. en lang række parametervariationer i WinVent er der udviklet generelle formeludtryk, som beskriver indblæsningstemperaturen og den effektive U-værdi (varmetabet fra det yderste glas til omgivelserne) som funktion af udetemperatur, volumenstrøm og solstråling. Med de udviklede formeludtryk kombineret med bl.a. g-værdien og den "almindelige" U-værdi uden ventilation kan ventilationsvinduets energimæssige egenskaber bestemmes for vilkårlige rammebetingelser. De udviklede formeludtryk gør det således muligt, at foretage bygningssimuleringer på årsbasis med ventilationsvinduer, og på den måde bestemme deres effekt på energiforbruget og indeklima i bygninger.

Ved hjælp af den udviklede metode er der foretaget beregninger i programmet IES-VE på en simplificeret bygningsmodel med ventilationsvinduer monteret i den sydvendte facade. Beregningerne viser, at der for den konkrete model med mekanisk udsugning på en halv gang i timen, kan opnås en årlig energibesparelse på 7% ved anvendelse af ventilationsvinduer sammenlignet med tilsvarende traditionelle vinduer. Til sammenligning viser beregningerne med traditionelle men energioptimerede lavenergivinduer med tre-lags ruder og mekanisk ventilation med effektiv varmegenvinding og det samme luftskifte en

årlig energibesparelse på op til 22%. Der er i projektet ikke taget højde for effekten på eventuelt kølebehov.

Således kan anvendelse af ventilationsvinduer give en ikke ubetydelig energibesparelse, men der kan stadig opnås væsentlig større energibesparelse med traditionelle lavenergivinduer kombineret med mekanisk ventilation med varmegenvinding.

2 INTRODUKTION

2.1 Baggrund

Der har i de senere år været en stigende interesse for ventilationsvinduer, hvor den kolde udeluft forvarmes af transmissionstabet og solindfaldet i et lodret luftfyldt hulrum mellem to af vinduets glaslag. Princippet og fordelene ved vinduet er, at en del af varmetabet fra vinduet varmegenvindes til ventilationsluften som strømmer ind gennem hulrummet i vinduet. Samtidig reducerer den øgede indblæsningstemperatur generne ved kold indblæsningsluft til en vis grad sammenlignet med traditionelle vinduer med friskluftsventiler.

Der er de seneste år gennemført forskellige analyser samt forsknings- og udviklingsprojekter vedrørende ventilationsvinduernes energimæssige egenskaber og deres effekt på energiforbruget i bygninger. De opnåede resultater er dog ikke enslydende og den reelle effekt er endnu ikke endeligt kortlagt på en retvisende måde. Mange analyser er kun baseret på et teoretisk grundlag og mangler at blive verificeret af empiriske målinger og tests, som kan dokumentere egenskaberne.

Samtidig er der sket betydelige stramninger af energibestemmelserne i bygningsreglementet, som stiller højere krav til ventilation og det samlede energibehov i bygninger. Det er endnu uvist om ventilationsvinduer kan leve op til disse høje krav til energiforbrug, samtidig med at der opretholdes et behageligt indeklima, som bl.a. kræver et luftskifte af en vis størrelse.

På grund af ventilationsvinduernes dynamiske egenskaber kan de ikke håndteres som traditionelle vinduer i gængse bygningssimuleringsprogrammer, hvor de normalt beskrives ved bl.a. angivelse af faste U- og g-værdier.

Der er derfor et behov for at analysere og dokumentere ventilationsvinduernes energimæssige egenskaber og virkemåde samt udvikle metoder til at vurdere deres reelle effekt på energiforbruget og indeklimaet i bygninger.

2.2 Formål

Formålet med projektet er at analysere ventilationsvinduernes energimæssige egenskaber og bestemme deres effekt på energiforbrug og indeklima i bygninger. For at kunne regne på ventilationsvinduer og sammenligne med andre løsninger, skal der udvikles en CFD-model, som kan beskrive vinduets egenskaber. Resultaterne fra CFD-modellen sammenholdt med målinger på ventilationsvinduet i Guarded Hot Box for givne fysiske rammebetingelser, skal verificere rigtigheden af en udviklet numerisk beregningsalgoritme, som kan bestemme vinduets egenskaber for en vilkårlig kombination af

rammebetingelserne. På baggrund af parametervariationer er det målet at udvikle regressionsudtryk, der kan implementeres i et bygningssimuleringsprogram, som herved kan bestemme ventilationsvinduers effekt på energiforbrug og indeklima i bygninger.

3 METODE

Formålet med den nedenfor beskrevne metode er at udarbejde en metode, der til praktisk anvendelig præcision kan kvantificere energibidraget fra det undersøgte ventilationsvindue til konditionerede indeklimaer ved givne vejrforhold. Det undersøgte ventilationsvindue antages at repræsentere et typisk gennemsnitligt ventilationsvindue i forhold til udformning og funktionalitet og er derfor egnet til generel analyse af anvendeligheden af teknologien.

Til at udarbejde den matematiske metode benyttes beregningsprogrammet WinVent (WV), måleresultater fra Guarded Hot Box (GHB) forsøg udført ved DTU BYG og Fraunhofer – Institut für Bauphysik (FH IBP) (uden solstråling) samt CFD-simuleringer af det ventilerede hulrum (ligeledes uden solstråling). Det har inden for projektets rammer ikke været muligt at foretage målinger af vinduets energimæssige egenskaber under påvirkning af solstråling.

Måleresultater fra GHB forsøg og beregnede resultater fra CFD bruges til at vurdere kvaliteten af WV's metode til at bestemme U- og g-værdier for ventilationsvinduet samt temperatur af den leverede friske luft. Idet der er vurderet tilstrækkeligt sammenfald mellem resultaterne fra beregningerne og målingerne, er det konkluderet, at de af WV bestemte resultater er anvendelige til videre analyse af ventilationsvinduet.

WV benyttes til at foretage serier af beregninger for varierende fysiske rammebetingelser (udetemperatur, volumenstrøm og strålingsintensitet).

Resultaterne bruges i en multipel lineær regressionsanalyse.

Regressionsanalysen har til formål at levere beregningsudtryk for energitab gennem ventilationsvinduet til omgivelserne (effektive U-værdier) og leveret friskluftstemperatur.

Beregningsudtrykkene benyttes i en dynamisk analyse af ventilationsvinduets performance over tid under danske klimaforhold. Den dynamiske analyse udføres i beregningsprogrammet IES-Virtual Environment (IESVE). I analysen bliver ventilationsvinduet testet under designmæssigt optimale forhold.

Ventilationsvinduerne installeres kun i en enkelt facade, orienteres mod syd og simuleres med den volumenstrøm, der yder de bedste energitekniske resultater. Bygningen, hvori ventilationsvinduerne testes, designes således, at grundarealet sikrer, at der ved den mest effektive volumenstrøm altid er et luftskifte på en halv gang i timen, som det foreskrives af Bygningsreglementet. Det konstante luftskifte sikres ved mekanisk udsugning.

Energiforbruget for den designede bygning bliver ligeledes beregnet for situationer hvor bygningen er udstyret med almindelige 1+2 vinduer (identiske med ventilationsvinduet uden ventilation) med henholdsvis mekanisk udsugning, og balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding, samt nye 3-lags lavenergivinduer med mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Energiforbrugene for de forskellige scenarier bliver sammenholdt. Udover energiforbruget bliver ventilationsvinduet indflydelse på det termiske indeklima også vurderet kort.

3.1 Fremgangsmåde

I dette afsnit bliver den anvendte metodes trin kort listet og begrundet. For detaljer om de enkelte trin henvises til de følgende relevante sektioner i metodeafsnittet.

Metoden kan groft opdeles i tre trin

1. Identifikation og validering af matematisk metode til analyse af ventilationsvinduesteknologi
2. Udformning af matematiske udtryk til beskrivelse af ventilationsvinduesteknologi
3. Anvendelse af matematiske udtryk i dynamisk analyse for kvantitativt at kunne vurdere ventilationsvinduers indflydelse på bygningers energibalance og indeklima

3.1.1 Første trin

I metodens første trin benyttes GHB måledata til at vise, at WV ved varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum præcist kan beregne både den leverede frisklufttemperatur og den mængde af energi, der går ind i systemet.

De udførte CFD simuleringer er ikke direkte sammenlignelige med GHB målingerne, fordi CFD simuleringerne ikke er foretaget med varmetransmissionbidrag fra stråling. Derfor er CFD simuleringernes evne til præcist at kunne beregne lufttemperatur og energistrøm ind i systemet ved varierende volumenstrømme blevet bestemt ved at sammenholde med resultater fra WV, som i denne sammenhæng er kørt uden bidrag fra stråling. I og med at WV er valideret på baggrund af GHB, bliver CFD simuleringerne også valideret på baggrund af GHB, hvor WV er benyttet som stedfortræder for GHB.

WV's evne til at beregne lufttemperatur og energistrøm ind i systemet ved varierende udetemperaturer bestemmes ved at sammenholde med CFD simuleringer, hvor udetemperaturen er variabel men volumenstrømmen fast. Disse sammenligninger er foretaget med resultater, der er opnået ved simuleringer uden strålingsbidrag.

Det har ikke været muligt at finde målinger, der tilstrækkeligt detaljeret dokumenterer ventilationsvinduers ydelse under påvirkning af solstråling til sammenligningsgrundlag med WV's beregninger. I kraft af at WV benytter sig af den anerkendte og i ISO 15099 [1] beskrevne teori om solstråling på

rudesystemer antages det, at WV korrekt kan bestemme indflydelsen af solstråling.

På baggrund af ovenstående del-trin fastslås det, at WV er egnet til projektet ProVents formål.

3.1.2 *Andet trin*

Der udformes to matematiske udtryk: Ét til bestemmelse af den leverede frisklufttemperatur og ét til bestemmelse af det effektive varmetab, altså det som forlader systemet til omgivelserne. De to udtryk bestemmes ved hjælp af trinvis lineær regression foretaget på baggrund af et datasæt, der er produceret ved parametervariationer udført i WV.

3.1.3 *Tredje trin*

I IESVE designes en forsimplet bygning med det formål, at sikre at ventilationsvinduerne bliver simuleret under de mest gunstige forhold. Til dette formål identificeres bl.a. den volumenstrøm gennem ventilationsvinduet, der minimerer systemets tab til omgivelserne. De i det andet trin udformede matematiske udtryk simplificeres og omformes til et format, som passer til IESVE og implementeres i modellen. På denne baggrund køres en dynamisk simulering.

Den konstruerede model modificeres til at kunne simulere scenarier med alternativer til ventilationsvinduer. Alternativer er eksempelvis et scenarie med almindelige lavenergiruder og balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding og et scenarie med almindelige lavenergiruder og udsugningsventilation.

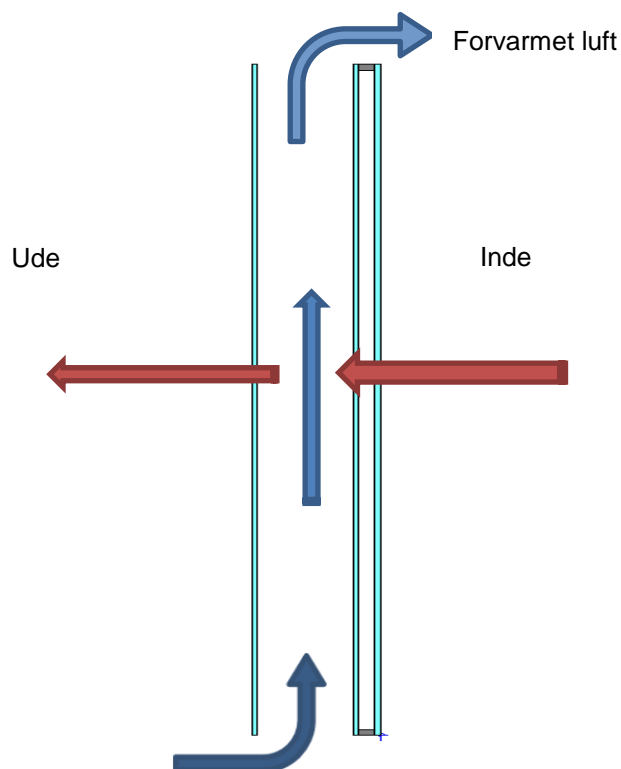
På baggrund af de udførte dynamiske simuleringer bliver den relative effektivitet af ventilationsvinduesteknologien vurderet.

3.2 **Vindueskonstruktion**

Princippet i et ventilationsvindue er, at ruden er opbygget med et stort ventileret hulrum mellem de yderste og inderste glaslag. I bunden udvendigt findes en ventilationsåbning, hvor udeluften føres ind i hulrummet og op og videre ind i bygningen via en åbning i toppen på den indvendige side. På vej op gennem hulrummet overføres en del af varmetabet fra den indvendige rude til ventilationsluften, som herved forvarmes inden den sendes ind i bygningen. Således sker der en vis varmegenvinding af transmissionstabet. Ligeledes kan der ske en vis opvarmning af ventilationsluften, når der er solstråling på ruden, idet en del af den solenergi, der absorberes i glaslagene, som vender mod hulrummet, afgives som varme til luften i hulrummet. Det er dog kun en lille del af solstrålingen, som kan udnyttes til forvarmning af luften, da størstedelen transmitteres direkte igennem ruden. Princippet i ventilationsvinduet er vist på Figur 3.1.

Figur 3.1

Princip for ventilationsvindue



Det undersøgte ventilationsvindue er opbygget som en 1+2 vinduesløsning, dvs. et enkelt 4 mm lag glas yderst, et tykt luftfyldt ventileret hulrum i midten og en to-lags energirude med blød lavemissionsbelægning og argon inderst.

En konstruktion med et enkelt lag glas kunne alt andet lige give en større forvarmning af ventilationsluften pga. større varmetab gennem det inderste glas. Men idet det er forudsat, at der altid vil være en fast volumenstrøm gennem vinduet, for at sikre et ønsket luftskifte på en halv gang i timen, vil der, når det er koldt udenfor, være meget stor risiko for kondensdannelse på indersiden af ruden i den nederste del nær karmen. Dette er hovedårsagen til, at der er valgt en opbygning med 2-lags energirude inderst.

3.3 Guarded Hot Box (GHB)

For at undersøge om den udviklede CFD model og WinVent (WV) giver retvisende resultater af ventilationsvinduers virkemåde og energimæssige egenskaber er der som en del af projektet udført målinger af vinduets U-værdi og temperaturforhold i Guarded Hot Box (GHB) på DTU. Ligeledes er der gjort brug af GHB målinger udført på Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) [2]. GHB målingerne er udført i henhold til ISO 12567-1 [3].

3.3.1 Forsøgsopstilling

Måleprincippet i GHB er som følger: Forsøgsopstillingen består af en kold kasse, hvor temperaturen holdes konstant ved ca. 0 °C og en varm kasse, hvor temperaturen holdes konstant ved ca. 20 °C. I skillevæggen mellem de to kasser placeres vinduet, der skal måles på. På vinduets varme side monteres en målekasse på selve vinduet. Målekassen er forsynet med et elektrisk varmelegeme, som afgiver en kendt varmemængde. Ved at holde temperaturen konstant ved 20 °C i både den varme kasse og i målekassen og 0 °C i den kolde kasse sikres det, at alt den afgivne varme fra varmelegemet transmitteres ud gennem vinduet. Den afgivne varme fra varmelegemet i målekassen er således et direkte mål for vinduets U-værdi. Der korrigeres for eventuelle linjetab i samlingen mellem vindue og skillevæg. Forsøgsopstillingen er vist på Figur 3.2

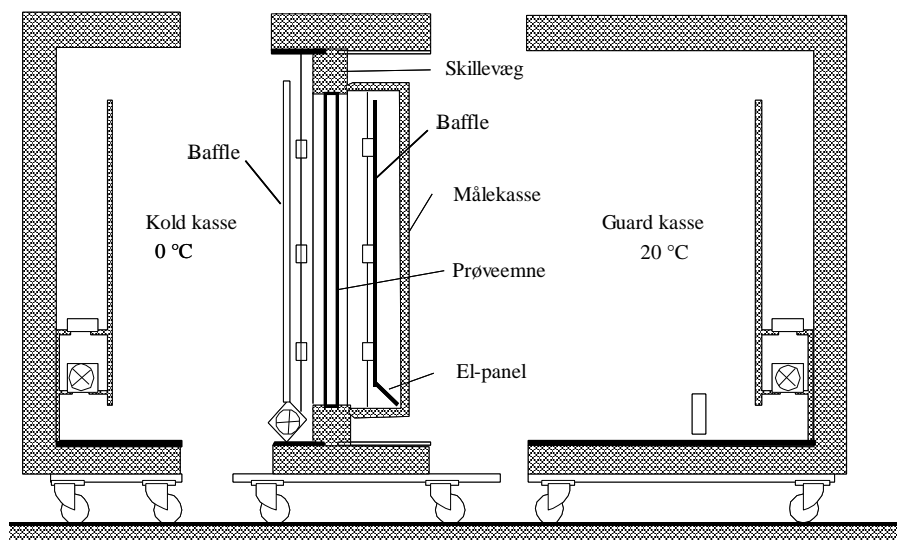
For at kunne tage højde for ventilationsluften i ventilationsvinduet er forsøgsopstillingen modificeret ved at tilslutte en variabel udsugningsventilator til vinduets øverste ventil. Ved målingerne udført på DTU suges ventilationsluften ud på den varme side via en fleksibel kanal, som er ført gennem målekassens væg. Efter ventilatoren sendes ventilationsluften tilbage til den kolde kasse. Ventilatoren og mikromanometret sørger for, at der suges en kontrolleret mængde luft gennem vinduet. Ved at måle temperaturen af indblæsningsluften, som forlader vinduet, kan den overførte varmemængde til ventilationsluften således bestemmes. Yderligere detaljer om GHB målingerne fremgår af Appelfeld og Svendsen 2011 [4].

Forsøgsopstillingen ved målingerne udført på Fraunhofer IBP er identisk med den fra DTU, bortset fra at ventilationsluften på Fraunhofer suges direkte ud på den kolde side af vinduet via en fleksibel kanal, som er monteret udvendigt på den øverste ventil. Således udføres målingen af vinduets U-værdi korrekt efter ISO 12567-1, idet ventilationsluften gennem vinduet holdes adskilt fra målekassen og varmelegemet på den varme side. Effekten af ventilationsluften gennem vinduet kommer til udtryk i form af, at U-værdien varierer for forskellige volumenstrømme. Yderligere detaljer om GHB målingerne fra Fraunhofer IPB fremgår af rapporten fra Fraunhofer IBP [2].

Den samlede varmestrøm gennem det målte vindue inkluderer varmetabet gennem ruden og ramme/karm samt energiforbruget til at forvarme luften som transporteres fra ude til inde via det ventilerede hulrum.

Figur 3.2

Guarded Hot Box forsøgsopstilling.
Anordninger til måling af ventilation gennem vinduet er ikke vist.



Figur 3.3

Ventilationsvinduet som blev testet i GHB ved DTU BYG.

Testvindue 1, DTU BYG.



De to vinduer der er testet er ikke 100 % identiske i opbygningen. De to testede vinduer har følgende rudeopbygning:

3.3.2 Testvindue 1, DTU BYG

Vinduet testet ved DTU BYG er opbygget af

- 4 mm float gals
- 84 mm ventileret hulrum
- 24 mm energirude, 4-16-4, med argon

Med en blød lavemissionsbelægning på overfladen i position 5 og en hård lavemissionsbelægning i position 3, talt udefra.

3.3.3 Testvindue 2, FH IBP

Vinduet testet ved FH IBP er opbygget af

- 4 mm float gals
- 100 mm ventileret hulrum
- 24 mm energirude, 4-16-4, med argon

Med en blød lavemissionsbelægning på overfladen i position 5, talt udefra.

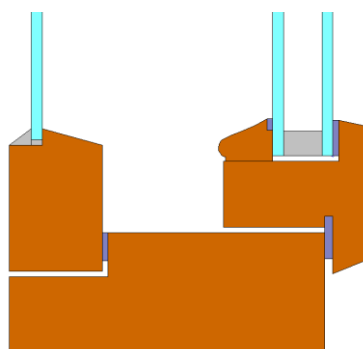
3.3.4 Ramme/karmkonstruktion

Ramme/karmkonstruktionen er identisk for de to vinduer, bortset fra tykkelsen. På Figur 3.4 ramme/karmprofilet i Testvindue 1, fra DTU BYG vist.

Figur 3.4

Skitse af ramme/karm i vinduet som blev testet i GHB på DTU BYG.

Testvindue 1, DTU BYG.



I de efterfølgende sammenligninger af måleresultaterne for de to vinduer og beregninger i CFD og WV er der taget højde for forskellene i de to vinduers opbygning.

3.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

I nedenstående tekst vil der blive givet et overordnet indblik i fremgangsmåden og de numeriske modeller, der er benyttet i forbindelse med udarbejdelsen af CFD analyserne af de undersøgte scenarier.

De udførte CFD simuleringer blev foretaget i open source programmet OpenFOAM. OpenFOAM kommer med en stribe eksempler på beregninger for forskellige typer af problemer. Udover at illustrere brugen af OpenFOAM er et af formålene med eksemplerne, at disse kan bruges som skabeloner og omformes og tilpasses til de aktuelle problemer som brugerne søger løsninger til. En styrke i denne tilgangsmåde er, at beregningseksemplerne støtter sig op af måleresultater. Det betyder, at de i eksemplerne anvendte metoder har en høj grad af troværdighed, der ellers kan være svær at skabe, når en metode designes fra bunden. Et eksempel fra OpenFOAMs katalog er benyttet som basis for undersøgelserne, der er foretaget i forbindelse med nærværende projekt.

Metoden der er udviklet til at simulere de fysiske forhold i de undersøgte ventilationsvinduer er inddelt i to trin. Det første trin er en steady state beregningsrunde på et groft mesh, der har til formål at skabe udgangspunktet for den anden beregningsrunde. Det andet trin er en pseudo-transient beregningsrunde på et forfinet mesh, der har til formål at opnå en konvergeret

løsning. Opbygningen i to trin er lavet således for at nedbringe den overordnede beregningstid.

3.4.1 *Første beregningstrin: SIMPLE & groft mesh*

Første beregningstrin benytter sig af en steady state algoritme ved navn SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) til at løse Navier-Stokes ligningerne og en turbulens model der kendes som SST $k-\omega$. Turbulens modellen beskrives kort i det følgende.

Det fysiske problem der arbejdes med, kan ikke løses som et steady state problem og skal i stedet løses som et pseudo-transient problem, altså ét der reelt ikke bevæger sig i tid men heller ikke har en endelig løsning. Tilfælde som dette kan opstå i sager, hvor der forekommer turbulens. I forhold til computerkraft og tid er SIMPLE metoden billigere end den følgende PISO (Pressure implicit with splitting of operator) metode og SIMPLE benyttes derfor til at skabe grundlaget for det følgende beregningstrin. Det første beregningstrin er sat til at udføre 1000 iterationer, før den opnåede løsning eksporteres til det andet beregningstrin. De 1000 iterationer er valgt på baggrund af en simpel analyse af residualer. Fra disse kan det ses, at SIMPLE efter 1000 iterationer ikke længere nærmer sig en konvergeret løsning, men at residualerne antager tilnærmelsesvist konstante værdier.

De diskretiserede dele af Navier-Stokes ligningerne og de yderligere ligninger, der er tilføjet systemet af den valgte turbulensmodel, løses med de i OpenFOAMs eksempler foreslåede diskretiseringsmetoder, solvere og under-relaxation faktorer. De valgte diskretiseringsmetoder er præcise til den første eller anden orden.

3.4.2 *Andet beregningstrin: PISO & fint mesh*

Andet beregningstrin benytter sig af en transient algoritme ved navn PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) til at løse Navier-Stokes ligningerne og en turbulens model der kendes som SST $k-\omega$. Turbulens modellen beskrives kort i det følgende.

PISO metoden er i OpenFOAM implementeret i en lettere modereret udgave under navnet PIMPLE. PISO er i ProVent benyttet i OpenFOAMs PIMPLE version. Forkortelsen PIMPLE hentyder til oprindelsen af algoritmen, der stammer fra PISO som igen oprindeligt stammer fra SIMPLE. Navnet er en sammensmeltning af navnene på de to oprindelige algoritmer. PIMPLE reduceres i sin mest simple form til PISO, men er blevet tilføjet yderligere muligheder for kontrol. Ideen bag PIMPLE er, at metoden kan indstilles til at køre flere PISO beregningsrunder per tidsskridt, hvor resultater fra én beregningsrunde/iteration benyttes som grundlaget for den følgende. Dette giver mulighed for at benytte sig af under-relaxation faktorer som det ses i SIMPLE og generelt bedre kontrol over størrelsen af tidsskridt (og Courant numre).

Ved at udnytte mulighederne for at raffinere løsningerne i hvert enkelt tidsskridt bliver det muligt at opnå konvergens for simuleringer af forholdene i ventilationsspalten. For at sikre, at CFD simuleringerne går mod konvergens, er de kørt med variable tidsskridt med en maksimal værdi for Courant nummeret på 0.4. Beregningstrinnet er sat til at køre indtil algoritmen har bestemt løsninger for i alt 1 sekund. I og med at løsningen reelt er uafhængig af tid (kun pseudo-transient), skal tidsskridtene i stedet ses som iterationer, hvor ændringer i variable mellem iterationer gøres i en størrelse, der er forsøgt optimeret, set i forhold til ønsker om stabilitet af beregning og lav beregningstid. Længden af det "tidsrum" der simuleres, er valgt på baggrund af en simpel analyse af residualer. Fra disse kan det ses, at PIMPLE efter 1 sekund har nået en konvergeret løsning for det undersøgte problem.

De diskretiserede dele af Navier-Stokes ligningerne og de yderligere ligninger, der er tilføjet systemet af den valgte turbulensmodel, løses med de i OpenFOAMs eksempler foreslåede diskretiseringsmetoder, solvere og under-relaxation faktorer. De valgte diskretiseringsmetoder er præcise til den første eller anden orden.

3.4.3 *Turbulens model: SST k- ω*

Turbulens modellen SST k- ω er en variant af standard k- ω modellen. k- ω modellen er en model, der beskriver turbulensen ved turbulent kinetisk energi, k, og en specifik dissipation, ω , med enheden tid^{-1} . SST k- ω modellen tilhører gruppen af RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) sammen med de mere klassiske k- ϵ modeller. SST k- ω kombinerer de fordelagtige nær-væg egenskaber fra standard k- ω modellen med standard k- ϵ modellen, der benyttes i resten af det simulerede volumen. Metoden har vist at opnå gode resultater og er blevet populær på baggrund af sin blanding af styrkerne fra henholdsvis k- ϵ og k- ω modellerne. Metoden er også den, der blev benyttet i OpenFOAMs eksempel.

For at benytte turbulens modellen anbefales det i teorien, at det yderste lag af meshet (viscous sub-layer) skal designes således, at de har en y^+ -værdi i en størrelsesorden af 1, hvor y^+ er en dimensionsløs distance, der bruges til at beskrive hvor grov eller fin et mesh skal være. Der er nogen usikkerhed og forskellige kilder angiver forskellige størrelser, men det nævnes flere steder, at $0 < y^+ < 1$ men at $0 < y^+ < 5$ også kan bruges. For at holde antallet af celler lavt, er der for det grove og fine mesh henholdsvis benyttet y^+ -værdier på ca. 5 og 3.

3.4.4 *Geometri og rammebetingelser*

CFD simuleringerne er kun blevet lavet for de ventilerede hulrum, der at finde mellem vinduernes ruder. Der er ikke taget højde for opvarmning af luften i vinduernes rammer. Der er set bort fra rammernes bidrag, fordi det er vurderet, at kernen af teknologien i ventilationsvinduet er det ventilerede hulrum. På denne vis bliver konklusioner draget fra indeværende analyse uafhængige af design af

fremtidige rammer og deres indflydelse på energitab og opvarmning af luft. Simuleringerne er lavet på forsimplede modeller af ventilationsspalterne. Spalterne er simuleret som værende 1316 mm høje og 1066 mm brede. Disse dimensioner er beregnet ud fra størrelsen af standard vinduer fratrukket en karmbredde på 82 mm. Dybden af det simulerede hulrum er afhængig af vinduets design. Ind- og aftag i det ventilerede hulrum er simuleret som værende 1066 mm lange (den fulde længde af ventilationsspaltens bund) og 24 mm brede. Hvor udformning af indtag vil have en indflydelse på flowmønstre, er det antaget, at denne effekt kun vil være synlig i bunden af ventilationsspalten og uden betydning for de overordnede flowmønstre, det samlede energitab og opvarmningen af ventilationsluften. Meshets endelige udformning er for hvert trin bygget på betragtninger af y^+ -værdier, cellers vækstrate og cellers resulterende størrelse i midten af det diskretiserede volumen.

Simuleringerne er foretaget i de tre rumlige dimensioner, grænsefladerne mod rammerne er behandlet som adiabatisk og ruderens overflader er simuleret med U-værdier beregnet i WIS og fratrukket de relevante overgangskoefficienter som de er opgivet i DS 418 [5].

De simulerede resultaters uafhængighed af meshets udformning er testet, ved at sammenligne resultaterne fra de to beregningstrin. I og med at resultaterne, på trods af manglende konvergens i første trin, er sammenlignelige bekræftes det, at resultaterne er uafhængige af meshets udformning. Det er også på baggrund af resultatet af denne betragtning, at der i simuleringerne kun foretages to trin og ikke et tredje på et endnu finere mesh.

3.4.5 *Begrænsninger*

OpenFOAMs funktionalitet er begrænset når det kommer til at håndtere varmeoverførsel ved stråling. Hvor det er forholdsvis nemt at simulere den afsatte effekt i et medie (fluid) fra stråling, er det mere besværligt at simulere den afsatte effekt fra stråling i grænseflader. Denne ønskede funktionalitet er, hvis ikke umulig, stort set udokumenteret og usikkerhed om kvaliteten af resultatet af implementering af stråling fra overflade til overflade har gjort, at forsøget blev forkastet. I teorien betyder denne manglende implementering af stråling, at CFD simuleringernes resultater ikke er direkte sammenlignelige med GHB testenes måleresultater. Dette har en indvirkning på hvorledes resultater fra de forskellige metoder benyttet i analysen kan sammenholdes. At der ikke tages højde for stråling kan medføre at simuleringerne undervurderer varmetabet gennem ruderne til omgivelserne, have en dæmpende effekt på de sette trends i flowmønstrene og mindske præcisionen af den beregnede temperaturforøgelse i ventilationsspalten. Det vurderes, at det er overvejende sandsynligt, at en effekt på varmetabet vil kunne findes ved implementering af varmeoverførsel ved stråling, men at påvirkningen af flowmønstre og lufttemperaturer vil være begrænset.

3.5 Numerisk algoritme WinVent (WV)

I nedenstående tekst vil der blive givet et overordnet indblik i hvilke metoder og antagelser, der ligger til grund for metoden, der anvendes i algoritmen WinVent (WV). En mere detaljeret beskrivelse af hvordan WV fungerer, kan findes i Raffnsøe 2007 [6].

3.5.1 Varmeledning og konvektion

WV er en algoritme der kan bestemme ventilationsvinduers energimæssige egenskaber som funktion af udetemperatur, solstråling, volumenstrøm. WV blev udviklet i forbindelse med et tidligere projekt [6] der havde til formål at vurdere ventilationsvinduers potentiale som energibesparende teknologi. Historisk set var motivationen for udviklingen af WV, at det i projektet blev fastslået, at den i ISO 15099 [1] beskrevne teori for beregning af temperaturstigninger i ventilerede hulrum (i vinduesruder) ikke var tilstrækkelig præcis til projektets formål.

Metoden der står beskrevet i ISO 15099 antager en uniform temperaturfordeling i ventilationsvinduers ventilerede hulrum. Denne antagelse har vist sig at være for upræcis og at have den effekt, at metoden undervurderer opvarmningen af den leverede friskluft. En uniform temperaturfordeling kræver en total opblanding af luften i hulrummet. For at en antagelse om uniform temperaturfordeling kan anvendes, kræves det, at luften i hulrummet overordnet set kan betragtes som fuldstændigt opblandet. CFD undersøgelser foretaget i forbindelse med Raffnsøe 2007 [6] og ProVent har vist, at det konvektive flowmønster, der normalt optræder i ikke-ventilerede hulrum, kortsluttes af den gennemgående volumenstrøm. Det reelle flowmønster er et, hvor luften i hulrummet fra indtag til afkast stort set udelukkende bevæger sig op ad hulrummets varme flade. Det konvektive varmetab til hulrummets kolde flade er derfor mindre, end antagelsen i ISO 15099 giver anledning til at tro. Af samme årsag er luftens opvarmning og vinduets varmetab også i højere grad domineret af luftens varmeledningsevne og kan derfor med god præcision beskrives som tidsafhængige funktioner af varmeledningsevne og opvarmningspotentiale.

Konkret kvantificerer WV den konvektive opvarmning af luften i hulrummet ved en numerisk Finite Control Volume (FCV) algoritme under antagelse af, at opvarmningen kan beskrives som en endimensionel, transient varmeledning i et semi-uendeligt element. Potentialet for opvarmning er temperaturforskellen over den kolde og varme flade i hulrummet.

Ved brug af denne tilnærmelse bliver det oprindelige flerdimensionelle, analytiske problem reduceret til at være et relativt simpelt problem, som i øvrigt er væsentligt billigere at løse rent beregningsmæssigt. Det tidligere udførte projekt Raffnsøe 2007 [6] dokumenterer, at denne antagelse er anvendelig. Analyser af metoden udført i forbindelse med ProVent konkluderer ligeledes, at metoden er anvendelig med en præcision, der er egnet til projektets formål.

3.5.2 *Stråling og solstråling*

Med henblik på beskrivelse af indflydelse af stråling og solstråling på friskluftens temperaturudvikling benytter WV sig af den i ISO 15099 [1] beskrevne teori om varmeoverførsel ved stråling og energibidrag fra solstråling. Præcisionen af denne teori er anerkendt og veldokumenteret og er ikke yderligere undersøgt i forbindelse med ProVent. Teorien beskriver hvorledes overflader udveksler energi med hinanden og hvorledes disse overflader opvarmes af stråling. I og med at WV's antagelse om opvarmning af luften i hulrummet kun arbejder med hulrummets overfladetemperaturer over tid, er der ingen problemer i at benytte ISO 15099's teori om varmeoverførsel via stråling sammen med WV's antagelse.

3.5.3 *Kontrol af kvalitet*

Kvaliteten af beregningsmetoden som benyttes i WV er undersøgt ved at sammenholde resultater fra GHB målinger og CFD beregninger med resultater beregnet af WV. Direkte sammenligning mellem de tre metoder har ikke været mulig.

GHB målingerne er blevet foretaget på prototyper af ventilationsvinduet med vinduesrammer og uden solstråling. Der sker en forvarmning af friskluften i den nederste ramme af vinduet med det resultat, at den luft, der kommer ind i det ventilerede hulrum, ikke har samme temperatur som udeklimaet. Det er ikke umiddelbart muligt at ændre temperaturerne i WV således, at der er forskel på temperaturen af luften i bunden af hulrummet og udeluften. Derfor vil potentialet for opvarmning reelt være større i WV, end det er i selve hulrummet mellem ruderne i vinduerne i GHB målingerne. For at sammenholde GHB med WV har det derfor været nødvendigt at korrigere for opvarmning i rammen.

CFD beregningerne er som nævnt udført uden at tage højde for effekten af varmeoverførsel ved stråling. Det valgte open source CFD program, OpenFOAM (OF), har endnu ingen veldokumenteret eller lettilgængelig funktionalitet, der muliggør inklusion af stråling i simuleringerne af det ventilerede hulrum. For at sammenholde CFD simuleringer med WV har det derfor været nødvendigt at fjerne for strålingsbidrag i WV.

Ydermere har det ikke været muligt at sammenholde CFD simuleringerne med GHB målingerne, fordi det ikke er muligt at korrigere GHB målingerne for stråling. Herudover har hverken GHB målinger eller CFD simuleringer inkluderet solstråling. Derfor har det heller ikke været muligt at teste WV's evne til at beregne solstrålingens effekt på opvarmningen af luften eller varmetabet gennem vinduet til omgivelserne.

For at teste WV's evne til at beregne U- og g-værdier samt opvarmning af friskluft er følgende fremgangsmåde anvendt.

1. GHB målinger er blevet korrigeret for opvarmning i nederste ramme og sammenholdt med standardberegninger fra WV. Dette har givet indblik i

om hvorvidt WV er i stand til at beregne korrekte værdier og har evalueret WV's evne til at håndtere varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum.

2. Strålingsbidrag er blevet fjernet fra WV's beregningsmodel og er blevet sammenholdt med CFD simuleringer. Dette har ligeledes givet indblik i, om hvorvidt WV er i stand til at beregne korrekte værdier og har evalueret WV's evne til at håndtere varierende udetemperaturer. Samtidig har sammenligningen, via WV's dobbelte bekræftelse, givet styrke til både GHB målinger og CFD simuleringer.
3. WV's evne til at beregne effekt af solstråling på systemet har ikke været mulig at teste mod hverken GHB målinger eller CFD simuleringer. I og med, at ISO 15099's teori om solstråling (og stråling) er (relativt) simpel, generelt accepteret og direkte implementerbar i WV's programmel, er det vurderet, at det er rimeligt at antage, at WV med tilstrækkelig præcision kan beregne solstrålings effekt på systemet af ruder og hulrum.

Efter at have fulgt ovenstående fremgangsmåde, er det endeligt konkluderet, at WV kan estimere teknologiens formåen til en rimelig præcision og til et niveau der gør WV anvendelig til projektets formål.

3.5.4 *Anvendelighed og brug*

Ved brug af WV's tidbesparende fremgangsmåde og algoritmens opsætning er det muligt at lave serier af parametervariationer, der tydeligt kan illustrere teknologiens anvendelighed. Formatet af algoritmens output tillader nem databehandling.

Algoritmen kræver en serie af input, der beskriver de fysiske rammer omkring vinduet og leverer en stribe outputdata, der inkluderer, men ikke er begrænset til, mørke U- og g-værdier, energimængder der går ind og ud af systemet og leveret frisklufttemperatur.

3.5.5 *Begrænsninger*

Algoritmen er skrevet i programsproget MATLAB og brug er derfor begrænset til interessenter, der holder MATLAB licenser.

Selve algoritmen har på grund af dens udformning problemer med at håndtere lave flow hastigheder. Ifølge Raffnsøe 2007 [6] bliver algoritmen upræcis ved volumenstrømme under 2 l/s. Denne størrelse er dog kun vejledende, eftersom flowhastighederne er afhængige af hulrummets geometri.

Ligeledes er algoritmen udformet således, at den, i dens nuværende form, kun kan håndtere vindueskonstruktioner, hvor der er et enkelt lag glas på ydersiden af hulrummet og en dobbeltrude på indersiden.

Hertil kommer at algoritmen ikke har mulighed for at tage højde for rammers indflydelse på systemet.

3.6 Parametervariation og multipel lineær regression

Ventilationsvinduer har dynamiske egenskaber som bl.a. afhænger af volumenstrømmen af ventilationsluften gennem vinduet, udetemperaturen og solstrålingen. Det er derfor ikke muligt at udføre årsberegninger i bygningssimuleringsprogrammer på traditionel vis, hvor vinduernes egenskaber beskrives ved en fast U-værdi og g-værdi. Der er derfor, på baggrund af beregninger i WV med en række parametervariationer, udviklet matematiske udtryk for temperaturstigningen af ventilationsluften og den effektive U-værdi, U_{eff} .

Parametervariationer og efterfølgende multiple lineære regressionsanalyser er baseret på samme design af ventilationsvindue som blev undersøgt ved GHB tests udført ved DTU BYG. Analysen bliver kun fortaget på rudesystemet og ser bort fra vinduesrammens bidrag fra opvarmning af leveret friskluft og energibalance.

3.6.1 Parametervariation

Parametervariationerne tager udgangspunkt i variationer af tre variable: Volumenstrøm gennem vinduet, udetemperatur og solstråling. Der er til formålet udviklet en version af WV, der kan tage vektorer med inputvariable.

Følgende vektorer er indtastet i WV

T_e	[°C]	-10	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	16
I_s	[W/m ²]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
G_a	[l/s]	2	4	6	8	10							

Hvor T_e er udetemperaturen [°C]
 I_s er solbestrælingsstyrken [W/m²]
 G_a er volumenstrømmen [l/s]

En parametervariation gøres for hver mulig kombination af variable. I alt bliver der således foretaget 660 parametervariationer.

3.6.2 Multipel lineær regression

På baggrund af resultaterne fra parametervariationerne bliver der lavet to lineære regressionsanalyser, der hver resulterer i et matematisk udtryk. Der laves en lineær regression for at bestemme et udtryk for den leverede frisklufttemperatur og en for at bestemme den effektive U-værdi. Der gøres brug af trinvis lineær regression til at bestemme de matematiske udtryk.

Den leverede frisklufttemperatur er afhængig af alle de tre variable, der er indtastet i parametervariationen og det matematiske udtryk bliver udarbejdet på

det fulde grundlag af 660 parametervariationer. Den effektive U-værdi bliver i WV beregnet som mørk, altså uden solstråling, og er derfor kun afhængig af udetemperaturer og volumenstrømme. I og med at den effektive U-værdi kun er afhængig af to variable, bliver det matematiske udtryk udført på baggrund af de tilbageværende 60 mulige parametervariationer.

3.6.3 *Matematiske modeller til dynamisk simulering*

For at kunne simulere hvorledes ventilationsvinduerne fungerer i praksis over tid og under varierende danske klimaforhold og for at kunne vurdere, hvilken indflydelse ventilationsvinduerne har på bygningers energibalance og indeklima, er der brug for matematiske udtryk i et format, der lader sig implementere i det valgte dynamiske simuleringsprogram. Simuleringsprogrammet IESVE er valgt til simuleringen, da dets brugerflade tillader integration af sådanne matematiske udtryk. Der er dog begrænsninger på, hvor lange de matematiske udtryk må være, og hvor de kan implementeres i beregningssystemet. I nedenstående afsnit gennemgås, hvorledes disse matematiske udtryk udformes.

3.6.3.1 *Bestemmelse af optimal volumenstrøm gennem ventilationsvindue*

Bygningsreglementet foreskriver, at boliger skal have konstant luftskifte på mindst en halv gang i timen. For at kunne optimere ventilationsvinduers bidrag til bygningers energibalance er det nødvendigt at bestemme ved hvilken volumenstrøm gennem ventilationsvinduet, energiforbruget til opvarmning af ventilationsluften er mindst. Dette gøres i to trin. Første trin er at opskrive energibalancen for rummet, hvori ventilationsvinduerne placeres og omforme den til et udtryk for opvarmningsbehovet som en funktion af luftskiftet i rummet.

Det andet trin er at udføre en søgning, der skal bestemmes funktionens minimum

Den optimale volumenstrøm bliver bestemt for en situation uden solstråling, og hvor ude- og indetemperaturene er henholdsvis 0 og 20 °C.

Energibalancen

$$Q_{heat} = Q_{Ueff} + Q_{a,out} - Q_{a,in}$$

Hvor	Q_{heat}	er opvarmningsbehovet	[W]
	Q_{Ueff}	er det effektive varmetab gennem vinduerne	[W]
	$Q_{a,out}$	er varmetabet til omgivelserne (her ved ventilation)	[W]
	$Q_{a,in}$	er energitilførslen med den leverede friskluft	[W]

Som det ses er der set bort fra bidrag til varmebalancen for rummets konstruktioner. Dette er gjort, fordi formålet med undersøgelsen er at bestemme bidragene fra ventilationsvinduerne. De øvrige konstruktionsdele har ingen indflydelse på dette bidrag.

De forskellige bestanddele af energibalancen skrevet ud

$$Q_{U_{eff}} = U_{eff} \cdot A_g \cdot \Delta T_{i-e}$$

$$Q_{a,out} = G_a \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} (20^\circ\text{C} - T_{v2})$$

$$Q_{a,in} = G_a \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} (T_{v2} - 0^\circ\text{C})$$

Hvor	U_{eff}	er den effektive U-værdi	[W/(m ² ·K)]
	A_g	er ventilationsvinduet glasareal	[m ²]
	ΔT_{i-e}	er temperaturforskellen mellem inde og ude	[°C]
	G_a	er volumenstrømmen gennem ventilationsvinduet	[m ³ /s]
	ρ_a	er luftens densitet	[kg/m ³]
	$c_{p,a}$	er luftens specifikke varmekapacitet	[J/(kg·K)]
	$Q_{a,in}$	er energitilførslen med den leverede friskluft	[W]
	T_{v2}	er den leverede frisklufttemperatur	[°C]

Både den effektive U-værdi og den leverede frisklufttemperatur er under undersøgelsens rammebetingelser kun afhængige af volumenstrømmen. De følgende udtryk er bestemt ved lineær regression

$$U_{eff} = 0,84486 - 0,18374G_a + 0,017923G_a^2 - 0,0006424G_a^3$$

$$T_{v2} = 5,1203 - 0,35374G_a - 0,0040937G_a^2 + 0,001001G_a^3$$

Ved at gøre volumenstrømmen afhængig af antallet af vinduer i rummet fås følgende funktion

$$G_a = \frac{H_r \cdot A_r \cdot n}{3600 \frac{s}{h} \cdot x}$$

Hvor	H_r	er rummets højde	[m]
	A_r	er rummets gulvareal	[m ²]
	n	er luftskiftet (sat til en halv gang i timen)	[h ⁻¹]
	x	er antallet af ventilationsvinduer	[m ³ /s]

Løses ovenstående ligningssystem for en mindsteværdi af varmetabet Q_{heat} , kan det optimale antal af vinduer for det givne rum bestemmes. I og med at volumenstrømmen er defineret som en funktion af det ukendte antal ventilationsvinduer, vil en sådan løsning af ligningssystemet også betyde, at den optimale volumenstrøm for ventilationsvinduet er bestemt. Ligningssystemet skal løses iterativt med en matematisk metode, der kan bestemme netop mindsteværdien af varmetabet Q_{heat} .

Den optimale volumenstrøm gennem det givne ventilationsvinduesdesign er under de givne forhold (20 °C temperaturforskel) konstant og ved ovenstående metode bestemt til at være 4,57 l/s.

3.6.3.2 Model til bestemmelse af temperaturstigning i dynamisk simulering

Som beskrevet ovenfor kan der i et begrænset omfang implementeres matematisk udtryk i IESVE. Bl.a. har IESVE en begrænsning på hvor lange matematiske udtryk kan være. Derfor er det nødvendigt at forsimple det udledte udtryk for beregning af den leverede frisklufttemperatur. Udtrykket beskriver den leverede frisklufttemperatur og er det udtryk, der benyttes til at bestemme den positive energitilvækst, der tilkommer til energibalancen i form af varmegenvinding i ventilationsvinduerne.

Udtrykket udledes ved hjælp af samme tidligere omtalte trinvis lineære regressionsmetode. Udtrykket er

$$T_{v2} = 3,5326 + 0,82706 \cdot T_e + 0,028082 \cdot I_s - 1,7402 \cdot 10^{-5} \cdot T_e \cdot I_s - 0,0001177 \cdot T_e^2 - 1,9225 \cdot 10^{-6} \cdot I_s^2$$

Hvor	T_{v2}	er den leverede frisklufttemperatur	[°C]
	T_e	er udetemperaturen	[°C]
	I_s	er solbestrålingsstyrken	[W/m ²]

Solbestrålingsstyrken på ruden er ikke en parameter der findes direkte i IESVE. Derfor laves følgende omregning:

$$I_s = \frac{I_r}{g_g \cdot n \cdot A_g}$$

Hvor	I_r	er solvarmetilskuddet i rummet	[W]
	g_g	er den totale solenergitransmittans for ruden	
	n	er antallet af ruder/vinduer	
	A_g	Er arealet af ruden	m ²

Årsagen til at volumenstrømmen ikke optræder i ovenstående udtryk skal findes i, at IESVE simuleringerne kører med en fast volumenstrøm, der sikrer et konstant luftskifte på en halv gang i timen.

3.6.3.3 Model til bestemmelse af energitab i dynamisk simulering

IESVE tillader ikke ændringer i måden hvorpå vinduer behandles. Derfor er det ikke praktisk at benytte den effektive U-værdi i den form, den oprindeligt er blevet udtrykt. I stedet omformes et forsimplet udtryk (grundet pladskrav stillet af IESVE) produceret ved lineær regression til at være et udtryk for en ændring af varmetabet gennem de traditionelle vinduer, der bliver simuleret i IESVE. Det omformede udtryk, der beskriver mertabet der skal suppleres til varmetabet fra vinduerne, Q_{diff} , har følgende form

$$Q_{diff} = Q_{g,win} - (Q_{a,in} + Q_{Ueff}) \Leftrightarrow$$
$$Q_{diff} = U_g \cdot A_g \cdot \Delta T_{i-e} - (G_a \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} \cdot \Delta T_{Tv2-i} + U_{eff} \cdot A_g \cdot \Delta T_{i-e})$$

Hvor	Q_{diff}	er udtrykket for mertab af energi gennem vinduerne	[W]
	$Q_{g,win}$	er varmetabet gennem vinduets glasareal	[W]
	$Q_{a,in}$	er energitilførslen med den leverede friskluft	[W]
	Q_{Ueff}	er det effektive varmetab gennem vinduerne	[W]
	U_g	er den simulerede rudes center U-værdi	[W/(m ² ·K)]
	U_{eff}	er ventilationsvinduets effektive U-værdi (for A_g)	[W/(m ² ·K)]
	A_g	er ventilationsvinduets glasareal	[m ²]
	ΔT_{i-e}	er temperaturforskellen mellem inde og ude	[°C]
	ΔT_{TV2-i}	er temp.diff. mellem leveret friskluft og inde	[°C]
	G_a	er volumenstrømmen gennem ventilationsvinduet	[m ³ /s]
	ρ_a	er luftens densitet	[kg/m ³]
	$c_{p,a}$	er luftens specifikke varmekapacitet	[J/(kg·K)]

Ved at indsætte standardværdier for densitet og specifik varmekapacitet for luft og at gøre brug af følgende forsimplede udtryk for opvarmningen af friskluften og den effektive U-værdi kan udtrykket reduceres.

$$T_{v2-i} = 3,5487 + 0,81724 \cdot T_e$$

$$U_{eff} = 0,31958 - 0,0023482 \cdot T_e$$

Hvor T_e er udetemperaturen [°C]

Årsagen til at volumenstrømmen ikke optræder i ovenstående udtryk skal findes i, at IESVE simuleringerne kører med en fast volumenstrøm, der sikrer et konstant luftskifte på en halv gang i timen. Udtrykkene er udledt ved en lineær regressionsanalyse. Det endelige reducerede udtryk for Q_{diff} er

$$Q_{diff} = 5,3038 \cdot T_i + 2,9615 \cdot T_e - 160,49 + 0,0259 \cdot T_i \cdot T_e - 0,0259 \cdot T_e^2$$

Hvor T_i er indetemperaturen [°C]

Det kan her tilføjes at Q_{diff} er udformet således, at det giver et negativt bidrag til energibalancen i de tilfælde, hvor udetemperaturerne er lavere end de indvendige.

3.6.4 Begrænsninger

De udførte matematiske udtryk er udført på baggrund af måle- og simuleringresultater opnået i forbindelse med analysen af ventilationsvinduet som blev undersøgt ved DTU BYG. De matematiske udtryk er således kun gyldige for netop dette design. Til gengæld vurderes det, at det undersøgte design er repræsentativt for design af ventilationsvinduer og at de matematiske udtryk også kan benyttes til at give overslag på leverede frisklufttemperaturer og effektive U-værdier for lignende design. Med lignende design menes en opbygning, hvor der er et enkelt lag glas yderst, en dobbeltrude inderst og vinduets størrelse ikke afviger markant fra standarddimensionerne.

3.7 Dynamisk simulering i simpel bygning (IESVE)

For at vurdere ventilationsvinduers indflydelse på energibehov og indeklima i bygninger er beregningsudtrykkene fra de lineære regressionsanalyser brugt i en dynamisk analyse af ventilationsvinduet performance over tid under danske klimaforhold. Disse bygningssimuleringer er udført i programmet IESVE, som giver mulighed for at anvende variable parametre beskrevet ved funktionsudtryk.

3.7.1 Implementering i IESVE

Ventilationsvinduet dynamiske egenskaber er implementeret i IESVE ved anvendelse af de udviklede regressionsudtryk, beskrevet i foregående afsnit, på følgende måde.

Vinduerne beskrives som udgangspunkt i IESVE ved faste U- og g-værdier gældende for basisvinduet uden hensyntagen til ventilation. Korrektion for effekten af ventilationen gennem vinduet sker ved for hvert tidskridt at bestemme indblæsningstemperaturen, T_{v2} , og forskellen i varmetabet, Q_{diff} , mellem basisvinduet og det virkelige vindue med ventilation. Effekten på eventuelt kølebehov er ikke behandlet i projektet.

Vha. indblæsningstemperaturen tages der højde for den genvundne varmemængde i ventilationsluften, hvilket også inkluderer evt. ændring i g-værdien, når der er solstråling på vinduet. Når indblæsningstemperaturen hæves over udetemperaturen, reduceres ventilationstabet til udsugning tilsvarende.

Q_{diff} udtrykker som nævnt forskellen mellem varmetabet baseret på den faste U-værdi for basisvinduet og varmetabet for det virkelige vindue baseret på den effektive U-værdi, U_{eff} , for det aktuelle tidskridt under hensyntagen til ventilation gennem vinduet. Den effektive U-værdi udtrykker det effektive varmetab som sker gennem vinduets ydre overflade til omgivelserne. Det håndteres i IESVE ved at tilføje den fiktive varmemængde Q_{diff} til rummet som korrigerer for, at U-værdien afviger fra basis U-værdien. Varmen, som bliver genvundet via ventilation gennem vinduet, tilføres som en del af den temperaturstigning, der udtrykkes i indblæsningstemperaturen. Q_{diff} er derfor et negativt bidrag (varmetab) som udtrykker forøgelsen af varmetab, netop fordi der trækkes (ofte kold) luft ind igennem vinduet.

3.7.2 Model geometri

Ved hjælp af IESVE er ventilationsvinduet analyseret under designmæssigt optimale forhold i en simplificeret bygning: Ventilationsvinduerne installeres kun i en enkelt facade orienteret mod syd, hvor deres fordele er størst, og simuleres med den volumenstrøm gennem vinduerne, der yder de bedste energitekniske resultater. Således er bygningen designet, så etagearealet svarer til, at der ved den mest effektive volumenstrøm gennem vinduerne altid er et luftskifte på en halv gang i timen, som det foreskrives af Bygningsreglementet. Da bygningens

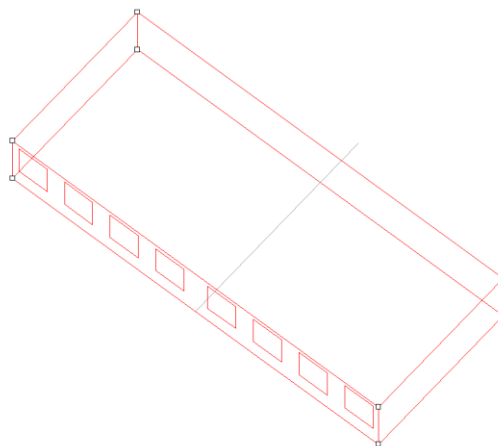
udformning sammen med ventilationsvinduerne i sig selv ikke er tilstrækkeligt til at sikre et konstant luftskifte på en halv gang i timen, er dette sikret ved mekanisk udsugning.

3.7.2.1 Rum

For at simplificere analysen og rette fokus på ventilationsvinduerne effekt på energibehovet, er der regnet på et enkelt rektangulært rum med et gulvareal på 104 m^2 (netto) ($16,0 \times 6,5 \text{ m}$) og en rumhøjde på $2,50 \text{ m}$ (netto). Der er monteret 8 vinduer i den sydvendte facade på 16 m . Dette er valgt, så det passer med, at der opnås et på luftskifte $0,5 \text{ h}^{-1}$ med en ventilationsmængde på $4,5 \text{ l/s}$ per vindue. Som den forudgående analyse har vist, giver denne volumenstrøm den bedste energitekniske performance af vinduerne. En skitse af rummet er vist i Figur 3.5.

Figur 3.5

Udformning af bygningen der regnes på i IESVE



3.7.2.2 Vinduer

Der er som nævnt monteret 8 vinduer i den sydvendte facade med en indbyrdes afstand på 750 mm (1000 mm mellem de midterste)

Alle vinduerne har standardstørrelsen ($b \times h$) $1230 \times 1480 \text{ mm}$ og glasandelen, F_f , udgør 77% af vindues arealet.

3.7.2.3 Konstruktioner

Da ventilationsvinduer kan være relevante at benytte i både nybyggeri eller eksisterende bygninger, er det valgt at designe bygningen, så den blot overholder bygningsreglementets (BR10) krav til mindste varmeisolering af bygningsdele, jf. BR10 kap. 7.6.

Konstruktionsopbygningerne og U-værdier for ydervægge, terrændæk og tag er vist i Tabel 1 til Tabel 3.

Tabel 1. Egenskaber for ydervægge

Ydervæg	Tykkelse [mm]	Varmeledning [W/(m·K)]	Densitet [kg/m ³]	U-værdi [W/(m ² ·K)]
tegl	100	0,84	1700	
Isolering	110	0,039	200	
Beton	100	0,51	1400	
Puds	4	0,42	1200	
I alt	314			0,30

Tabel 2. Egenskaber for terrændæk

Terrændæk	Tykkelse [mm]	Varmeledning [W/(m·K)]	Densitet [kg/m ³]	U-værdi [W/(m ² ·K)]
Kapillarbrydende lag	650	0,36	1840	
Isolering	100	0,039	200	
Beton (støbt)	300	1,13	2000	
Trægulv	20	0,14	650	
I alt	1070			0,20

Tabel 3. Egenskaber for tag

Tag	Tykkelse [mm]	Varmeledning [W/(m·K)]	Densitet [kg/m ³]	U-værdi [W/(m ² ·K)]
Tagpap	6	0,19	960	
Undertag	5	0,50	1700	
Beton	100	0,51	1400	
Isolering	170	0,039	200	
Luftspalte	100	–	–	
Gips	13	0,16	950	0,20
I alt	394			0,20

3.7.2.4 Opvarmning og ventilationssystem

Brugstiden er 8760 timer pr. år, svarende til boliger.

Infiltrationen er sat til 0,13 l/(s·m²)

Der er foretaget beregninger for fire forskellige scenarier: 2 med udsugning og 2 med mekanisk ventilation med varmegenvinding

I henhold til BR10 kapitel 8.3 Ventilationssystemer stk. 9, er SEL-værdierne for hhv. udsugningsanlæg og ventilationsanlæg med varmegenvinding 800 og 1800 J/m³. Yderligere detaljer om ventilationsanlæg fremgår af afsnit 4.3.

Udsugning/mechanisk ventilation er aktiv for alle årets 8760 timer.

Der er anvendt et traditionelt varmeanlæg med radiatorer med en sætpunktstemperatur på 20 °C.

Ved beregning af bygningens energibehov indgår energibehovet til opvarmning med en faktor 1 og elforbruget til ventilation med en faktor 2,5.

4 RESULTATER

Der er to hovedformål med den tekniske analyse af ventilationsvinduet som teknologi. Det første er at bestemme en matematisk metode, der nemt og hurtigt kan give en forståelse af teknologiens performance under givne forhold. Det andet formål er at anvende denne metode i en dynamisk analyse til at bestemme, hvordan ventilationsvinduet som teknologi påvirker bygningers energiforbrug og indeklima over tid under danske klimaforhold. For at nå disse mål er der blevet opstillet eksperimenter og arbejdet med matematiske analyser af de opnåede måleresultater. Nedenfor bliver relevante resultater fra de forskellige delprojekter præsenteret i den rækkefølge, projektet er blevet bygget op.

4.1 Eksperimentelt- og beregningsteknisk grundlag for metode

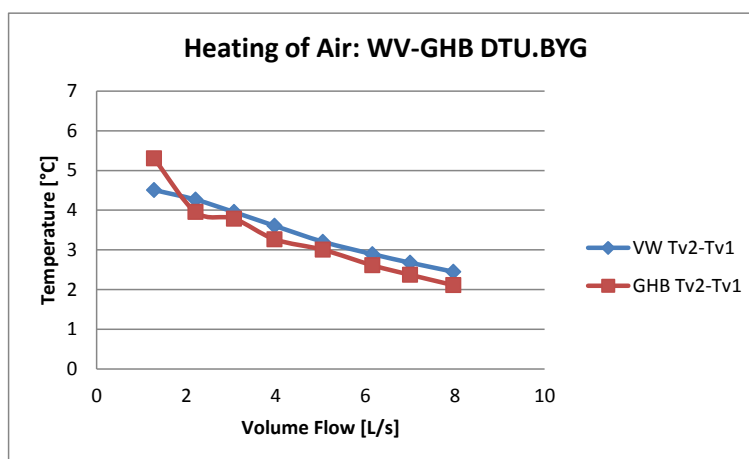
4.1.1 Sammenhold af resultater fra GHB og WV – Volumenstrømme

Figur 4.1 viser temperaturer som de er blevet målt ved GHB forsøg ved DTU BYG og beregnet af WV ved varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum. De præsenterede temperaturer er opvarmningen af luften i det ventilerede hulrum og altså eksklusiv bidrag til opvarmning fra vinduets ramme.

Det ses, at WV med stor præcision kan regne sig frem til opvarmningen af luften mellem ruderne i ventilationsvinduet. Den gennemsnitlige afvigelse fra de målte resultater i det analyserede interval er 0,1 °C. En hypotesetest angiver, at der under antagelse af normalfordelte forskelle, er en 32 % sandsynlighed ($p = 0,32$) for, at de to temperaturserier er ens. En hypotese test med $\alpha = 0,05$ kan således ikke afvise, at de to temperaturserier er ens. Det betyder altså, at de af WV beregnede resultater for temperatur er statistisk signifikante.

Figur 4.1

Opvarmningen af luften mellem ruderne i ventilationsvinduet som målt ved GHB ved DTU og beregnet af WV ved varierende volumenstrømme



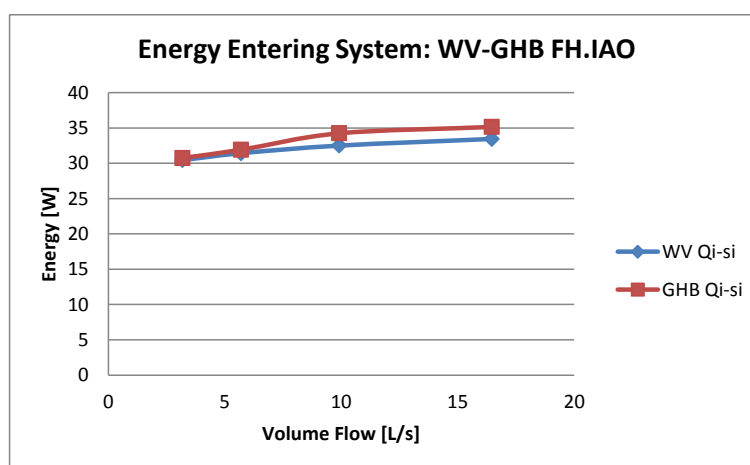
Figur 4.2 viser de energimængder, der går ind systemet (dvs. varmeoverførslen fra rummet til indersiden af det indvendige glas) målt ved GHB forsøg ved Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (FH IBP) og beregnet af WV ved varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum. Systemet, der

henvises til her, er den specifikke sammensætning af ruder, der blev testet af FH IBP. De præsenterede måleresultater er justeret fra de oprindelige målinger ved at fratække overslag på vinduesrammens bidrag til energibalancen. Der er således indført en mindre usikkerhed i forhold til størrelsen af energimængden.

Ikke desto mindre kan det ses, at WV med god præcision kan regne sig frem til energimængden, der går ind i systemet. Den gennemsnitlige afvigelse fra de justerede målte resultater i det analyserede interval er 1,1 W. En hypotesetest angiver, at der under antagelse af normalfordelte forskelle er en 7 % sandsynlighed ($p = 0,07$) for at de to energiserier er ens. En hypotesetest med $\alpha = 0,05$ kan således ikke afvise, at de to energiserier er ens. Det betyder altså, at de af WV beregnede resultater for mængder af energi, der går ind i systemet er statistisk signifikante.

Figur 4.2

Mængder af energi der går ind systemet som de er blevet målt ved GHB ved FH IBP og beregnet af WV ved varierende volumenstrømme



Ved sammenligning af måleresultater fra GHB med beregnede resultater fra WV kan det konkluderes, at WV regner præcist til et niveau der møder projektet ProVents behov.

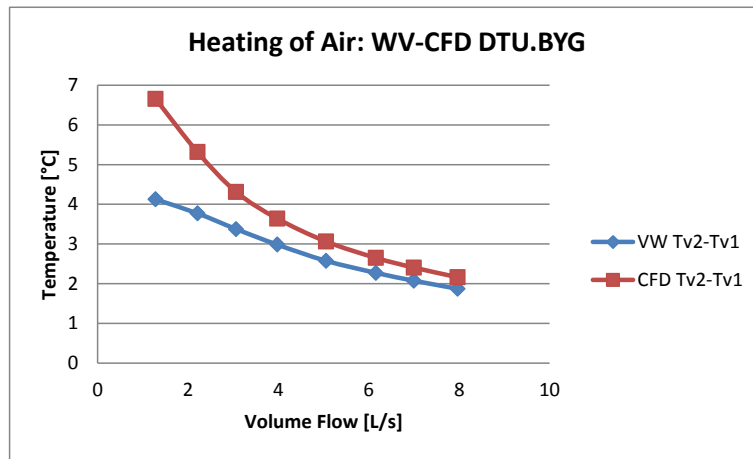
4.1.2 Sammenhold af resultater uden strålingsbidrag fra WV og CFD – Volumenstrømme

Figur 4.3 viser temperaturer som de er blevet beregnet af henholdsvis WV og CFD ved varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum og uden bidrag til varmetransmission fra stråling. Årsagen til den manglende stråling skal findes i, at det benyttede CFD program OpenFOAM endnu ikke understøtter stråling i en form der har gjort anvendelse mulig i projektet. De præsenterede temperaturer er opvarmningen af luften i det ventilerede hulrum og altså eksklusiv bidrag til opvarmning fra vinduets ramme.

Figur 4.4 viser de energimængder, der går ind systemet som de er blevet beregnet af henholdsvis WV og CFD ved varierende volumenstrømme gennem det ventilerede hulrum og uden bidrag til varmetransmission via stråling.

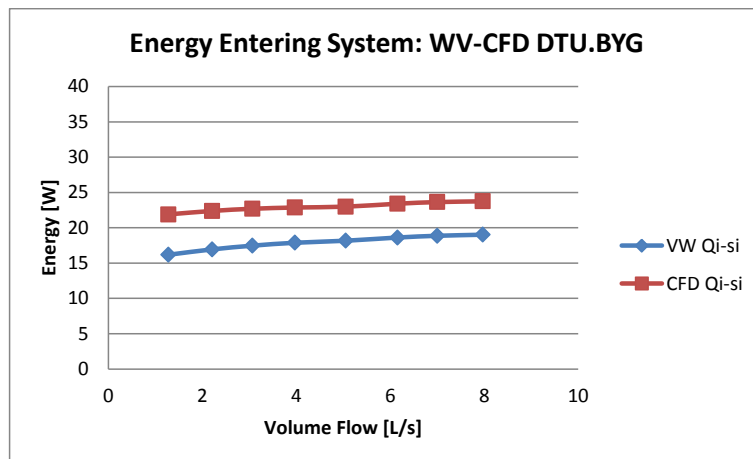
Figur 4.3

Opvarmningen af luften mellem ruderne i ventilationsvinduet beregnet af WV og CFD uden bidrag fra stråling ved varierende volumenstrømme



Figur 4.4

Mængder af energi der går ind systemet som der er beregnet af WV og CFD uden bidrag fra stråling ved varierende volumenstrømme



Det kan af henholdsvis Figur 4.3 og Figur 4.4 ses, at CFD beregner højere leverede frisklufttemperaturer end WV og at CFD ligeledes beregner energi mængder, der går ind systemet som værende højere. Forklaringen på dette forventes at skulle findes i, at de to beregningsformer benytter sig af forskellige U-værdier (overgangstal). Hvor WV selv beregner vinduessystemets energimæssige egenskaber, skal der i CFD indtastes overslag på systemets forskellige bestanddeles varmetransportegenskaber. Disse overslag er behæftet med usikkerheder og er angiveligt blevet designet for høje værdier.

Denne teori støttes af resultaterne præsenteret på både Figur 4.3 og Figur 4.4. På Figur 4.3 kan det ses, at forskellene i de beregnede temperaturer mindskes ved større volumenstrømme. Overgangstal beskriver potentialet for overførsel af energi som en funktion af temperaturforskellen. Eftersom temperaturforskellen mindskes over tid i takt med at luften opvarmes, bliver forskelle i varmeovergangstal relativt mere indflydelsesrige over tid. Højere volumenstrømme vil betyde, at et givent luftvolumen vil tilbringe kortere tid i det ventilerede hulrum. Altså er relativt små forskelle i overgangstal mindre betydningsfulde ved høje volumenstrømme, fordi der er mindre tid til at reducere temperaturforskellene. Det forventelige resultat af at have værdisat for høje varmetransmissionsegenskaber i rammebetingelserne i CFD analysen, vil altså

være, at der beregnes for høje temperaturer og at betydningen af fejlen vil mindskes ved højere volumenstrømme, ganske som det ses i Figur 4.3

Ses der herefter på Figur 4.4 kan det ses, at forskellen mellem de beregnede mængder af energi der går ind i systemet er stort set konstant over variationerne i volumenstrømmene. Forskellen er gennemsnitlig 5,1 W og standard deviationen er lav på 0,4. De konstante forskelle understøtter ligeledes teorien om at overgangstallene er blevet sat for højt i CFD simuleringerne.

På trods af den beskrevne usikkerhed kan det ses, at der er god overensstemmelse mellem WV og CFD målingerne for volumenstrømme større end 3 l/s. Ved sammenligning af beregnede resultater for volumenstrømme fra 3 l/s og op og med den beskrevne usikkerhed i mente konkluderes det, at CFD simuleringerne regner præcist til et niveau, der møder projektet ProVents behov.

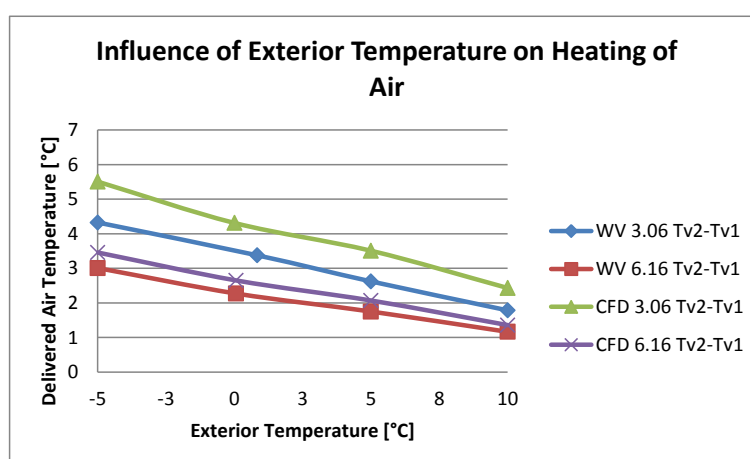
4.1.3 Sammenhold af resultater uden strålingsbidrag fra CFD og WV – Udetemperaturer

Figur 4.5 viser temperaturer som de er blevet beregnet af henholdsvis CFD og WV ved varierende udetemperaturer ved volumenstrømme på 3,06 og 6,16 l/s og uden bidrag til energitransport og -balance fra stråling. Årsagen til den manglende energitransportform skal findes i, at det benyttede CFD program OpenFOAM endnu ikke understøtter stråling i en form, der har gjort anvendelse mulig i projektet. De præsenterede temperaturer er opvarmningen af luften i det ventilerede hulrum og altså eksklusiv bidrag til opvarmning fra vinduets ramme.

Figur 4.6 viser de mængder af energi, der går ind systemet som de er blevet beregnet af henholdsvis CFD og WV ved varierende udetemperaturer ved volumenstrømme på 3,06 og 6,16 l/s og uden bidrag til energitransport og -balance fra stråling.

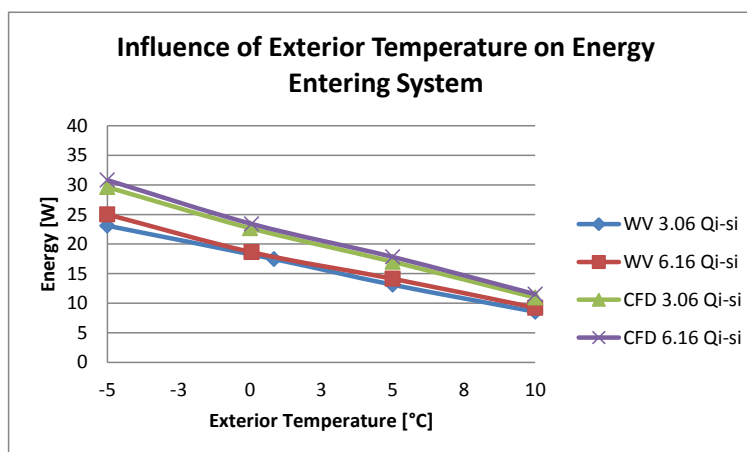
Figur 4.5

Opvarmningen af luften mellem ruderne i ventilationsvinduet beregnet af CFD og WV uden bidrag fra stråling ved varierende udetemperaturer



Figur 4.6

Mængder af energi der går ind systemet som de er beregnet af CFD og WV uden bidrag fra stråling ved varierende udetemperaturer



Det kan af henholdsvis Figur 4.5 og Figur 4.6 ses, at CFD beregner højere leverede frisklufttemperaturer end WV og, at CFD ligeledes beregner energimængder, der går ind systemet, som værende højere. Forklaringen på og de umiddelbare implikationer af dette kan findes i det foregående afsnit 4.1.2.

De sete uoverensstemmelser mellem resultaterne på CFD og WV er direkte sammenlignelige med dem, der er beskrevet i afsnit 4.1.2 og betragtes, under antagelsen af, at problemet er forstået, ikke som værende problematiske set i forhold til projektet ProVents behov. Med udgangspunkt i denne forståelse og efter at have sammenholdt de beregnede data, konkluderes det, at WV kan håndtere udetemperaturvariationer præcist til et niveau, der møder projektet ProVents behov.

4.1.4 Solstråling

Det har ikke været muligt at teste WV's evne til at beregne solstrålings effekt på opvarmning af luft og varmebalance i systemet. Det er i afsnit 3.5.2 kort beskrevet hvorfra WV's benyttede teori er hentet. Det er en begrundet antagelse, at WV kan beregne effekten af solstråling.

4.1.5 Delkonklusion

På baggrund af de ovenstående fremlagte målinger, beregninger og analyser konkluderes det, at WV regner præcist på de undersøgte ventilationsvindues designs til en præcision, der er anvendelig for projektet ProVent.

4.2 Multipel lineær regression – Matematiske modeller

Baseret på designet af det testvindue 1, DTU, er der foretaget to trinvis lineære regressionsanalyser med det formål at bestemme matematiske udtryk, der kan beregne værdier for henholdsvis opvarmningen af luften i ventilationspalten og den effektive U-værdi. De lineære regressionsanalyser indeholder krydsprodukter og led op til anden orden.

4.2.1 Matematisk model til beregning af leveret frisklufttemperatur

Det matematiske udtryk der beregner opvarmningen af luften i ventilationsspalten er bestemt til

$$T_{v2} = 5,7431 + 0,77593T_e - 0,54042G_a + 3,3757 \cdot 10^{-2}I_s + 1,5829 \cdot 10^{-2}G_a^2 - 1,5359 \cdot 10^{-6}I_s^2 + 1,1067 \cdot 10^{-2}T_e \cdot G_a - 1,7066 \cdot 10^{-5}T_e \cdot I_s - 1,392 \cdot 10^{-3}G_a \cdot I_s$$

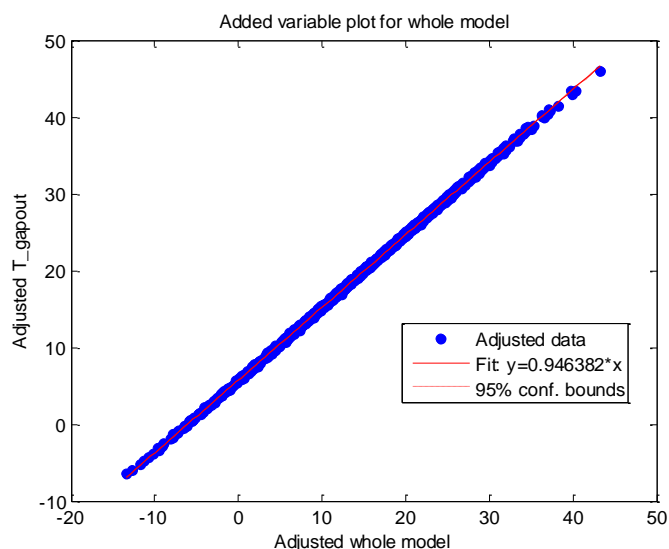
Hvor	T_{v2}	er den leverede frisklufttemperatur	[°C]
	T_e	er udetemperaturen	[°C]
	I_s	er solbestrålingsstyrken	[W/m ²]
	G_a	er volumenstrømmen	[L/s]

Til den lineære regression er benyttet WVs beregningsresultater fra 660 parametervariationer. Modellens R^2 og Justerede R^2 har begge værdien 1. Modellens Root Mean Squared Error, der er en analog til standard deviationen, har en værdi på 0,178 °C. Disse statistikker indikerer, at modellen er af høj kvalitet og præcist kan bestemme ventilationsvinduets rudesystems leverede frisklufttemperaturer.

Figur 4.7 viser et punktdiagram hvor regressionsmodellen for leverede frisklufttemperaturer beskrives ved den røde linje og WV's beregnede temperaturer er markeret ved blå punkter. Figurforklaringen indikerer, at der er et konfidensinterval omkring den røde modellinje. Grundet det høje antal datapunkter og regressionsmodellens præcision er konfidensintervallet meget tyndt og det kan derfor ikke ses på grafen. Alle datapunkter er samlet omkring modellens linje. Grafen viser, at regressionsmodellen forudsiger værdierne beregnet ved parametervariationerne med stor præcision.

Figur 4.7

Punktdiagram af regressionsmodellens forudsete temperaturer overfor WVs beregnede temperaturer

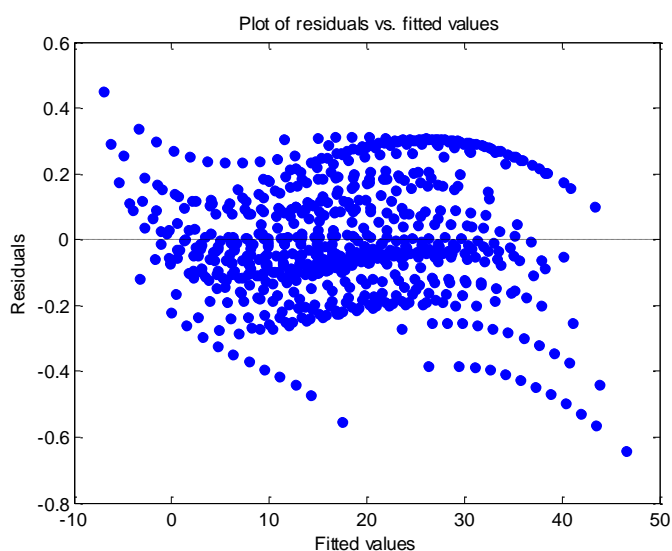


Figur 4.8 viser et punktdiagram hvor de af regressionsmodellen forudsete leverede frisklufttemperaturer er placeret ud af x-aksen og afvigelse (residualerne) fra WV's beregnede temperaturer fra parametervariationerne er fordelt op af y-aksen.

Residualernes afstand og placering i forhold til den horisontale linje, der går fra y-aksens nulpunkt kan hjælpe til at analysere på kvaliteten af den beregnede regressionsmodel. Det ses, at residualerne ligger uniformt fordelt om y-aksens nulpunkt ud langs x-aksen. Dette viser, at residualernes varians er af samme størrelsesorden. Det kan ligeledes ses, at der ikke er markante outliers, altså residualer, der ligger uforholdsmæssigt langt fra y-aksens nulpunktlinje. Disse er gode tegn og indikerer, at den valgte regressionsmetode er egnet til den udførte analyse. Tilbage er at vurdere hvorvidt residualerne er tilfældigt fordelt omkring nulpunktlinjen. Det ses, at de ikke er tilfældigt fordelt. Men en tilfældig fordeling kan ikke rimeligt forventes, da de fittede data ikke er tilfældigt genereret. Dataene er beregnet af WV og tilfældighed kan derfor ikke forventes.

Figur 4.8

Punktdiagram af regressionsmodellens forudsete temperaturer overfor afvigelse (residualerne) fra WV's beregnede temperaturer

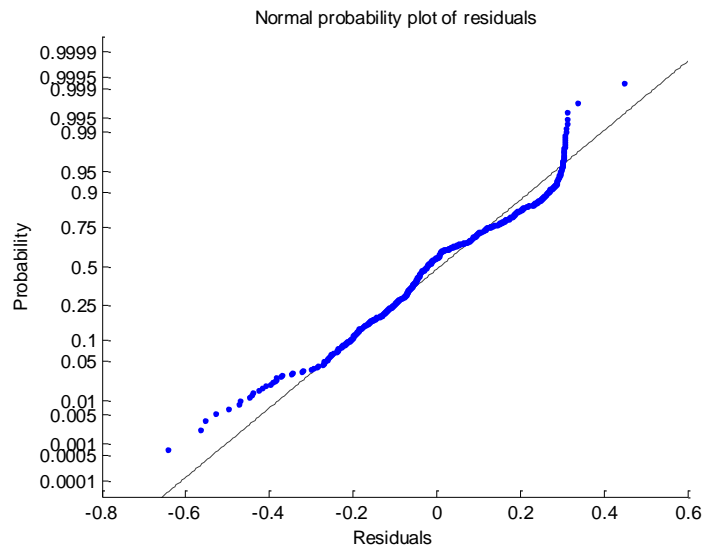


Figur 4.9 viser et punktdiagram hvor regressionsmodellens afvigelser fra WV's beregnede leverede frisklufttemperaturer er placeret ud af x-aksen og deres sandsynligheder under normalfordelingen er fordelt op af y-aksen.

Grafens repræsentation kan give et indblik i om hvorvidt residualernes fordeling lever op til kravet om normalfordeling. Gør de ikke det, kan det betyde, at den valgte metode til regressionsanalysen ikke er gyldig for den form de analyserede data har. På grafen kan det ses, at størstedelen af residualerne følger normalfordelingen. Det er kun de største residualer, dem der henholdsvis ligger under 5 % og over 95 %, der ikke helt følger normalfordelingen. Disse afvigelser vurderes at være acceptable.

Figur 4.9

Punktdiagram af regressionsmodellens afvigelser (residualer) fra WVs beregnede temperaturer overfor deres sandsynlighed under normalfordelingen



4.2.2 Matematisk model til beregning af effektiv U-værdi

Det matematiske udtryk der beregner den effektive U-værdi for ventilationsvinduet rudesystem er bestemt til

$$U_{eff} = 0,84749 - 6,0054 \cdot 10^{-3}T_e - 0,1846G_a - 6,4186 \cdot 10^{-5}T_e^2 + 1,8095 \cdot 10^{-2}G_a^2 - 6,553 \cdot 10^{-4}G_a^3 + 9,6559 \cdot 10^{-4}T_e \cdot G_a + 1,6195 \cdot 10^{-5}T_e^2 \cdot G_a - 3,6015 \cdot 10^{-5}T_e \cdot G_a^2$$

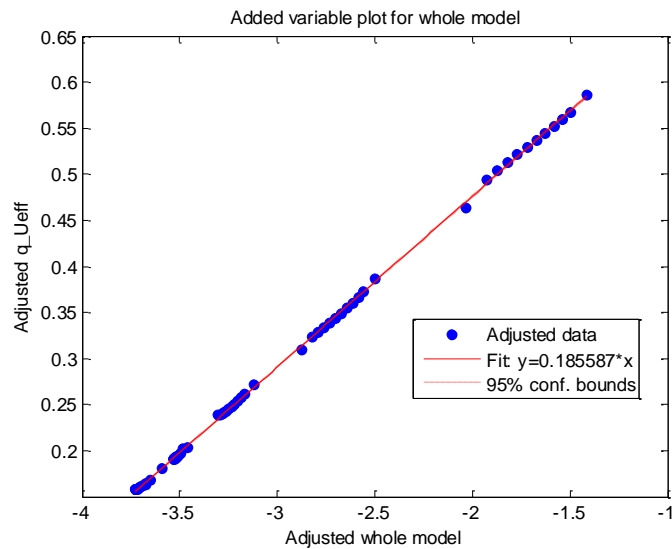
Hvor	U_{eff}	er den effektive U-værdi	[W/(m ² ·K)]
	T_e	er udetemperaturen	[°C]
	I_s	er solbestrålingsstyrken	[W/m ²]
	G_a	er volumenstrømmen	[l/s]

Til den lineære regression er benyttet WV's beregningsresultater fra 60 parametervariationer. Modellens R2 og Justerede R2 har begge værdien 1. Modellens Root Mean Squared Error, der er en analog til standard deviationen, har en værdi på 0,00224 W/(m²·K). Disse statistikker indikerer, at modellen er af høj kvalitet og præcist kan bestemme ventilationsvinduet rudesystems effektive U-værdi.

Figur 4.10 viser et punktdiagram hvor regressionsmodellen for effektive U-værdier beskrives ved den røde linje og WV's beregnede effektive U-værdier er markeret ved blå punkter. Figurforklaringen indikerer, at der et konfidensinterval omkring den røde modellinje. Grundet det høje antal af datapunkter og regressionsmodellens præcision er konfidensintervallet meget tyndt og det kan derfor ikke ses på grafen. Alle datapunkter er samlet omkring modellens linje. Grafen viser, at regressionsmodellen forudser værdierne beregnet ved parametervariationerne med god præcision.

Figur 4.10

Punktdiagram af regressionsmodellens forudsete effektive U-værdier overfor WVs beregnede effektive U-værdier

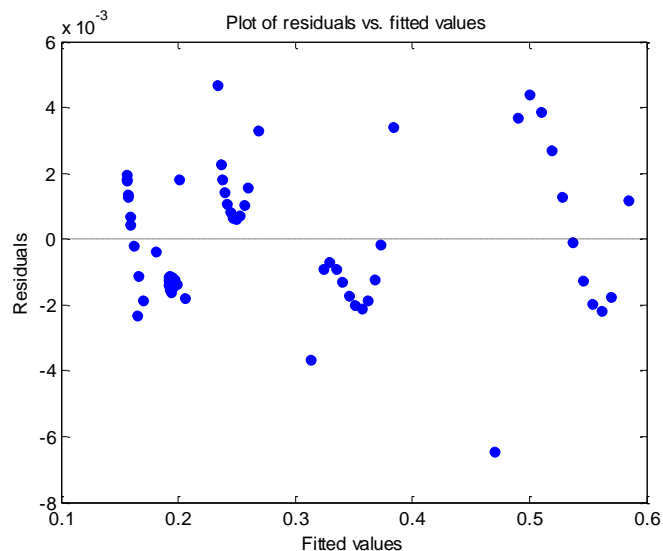


Figur 4.11 viser et punktdiagram hvor de af regressionsmodellen forudsete effektive U-værdier er placeret ud af x-aksen og afvigelse (residualerne) fra WVs beregnede effektive U-værdier fra parametervariationerne er fordelt op af y-aksen.

Det ses, at residualerne ligger uniformt fordelt om y-aksens nulpunkt ud langs x-aksen. Dette viser, at residualernes varians er af samme størrelsesorden. Det kan ligeledes ses, at der ikke er markante outliers, altså residualer der ligger uforholdsmæssigt langt fra y-aksens nulpunktlinje. Disse er gode tegn og indikerer, at den valgte regressionsmetode er egent til den udførte analyse. Med henblik på fordelingen af residualer kan det ses, at den ikke er aldeles tilfældig. Som før nævnt kan sand tilfældig fordeling ikke forventes, når dataene beregnet af programmer som WV.

Figur 4.11

Punktdiagram af regressionsmodellens forudsete effektive U-værdier overfor afvigelse (residualerne) fra WVs beregnede effektive U-værdier

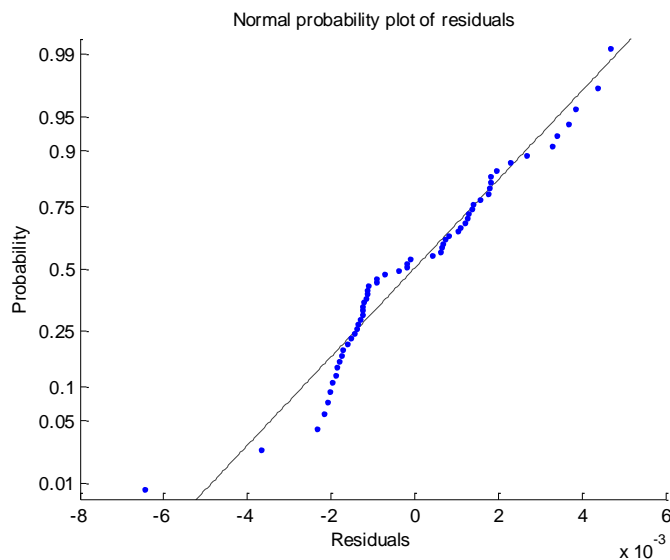


Figur 4.12 viser et punktdiagram, hvor regressionsmodellens afvigelser fra WV's beregnede effektive U-værdier er placeret ud af x-aksen, og deres sandsynligheder under normalfordelingen er fordelt op af y-aksen.

På grafen kan det ses, at størstedelen af residualerne følger normalfordelingen. Afvigelserne fra normalitet er mindre og vurderes at være acceptable.

Figur 4.12

Punktdiagram af regressionsmodellens afvigelser (residualer) fra WVs beregnede effektive U-værdier overfor deres sandsynlighed under normalfordelingen



4.2.3 Delkonklusion

Det konkluderes på baggrund af de præsenterede statistikker og den gennemgåede analyse af residualer, at de producerede matematiske modeller til bestemmelse af størrelsen af opvarmningen af luft i ventilationsvinduerne rudesystem og den effektive U-værdi for samme rudesystem er præcis til et niveau, der er acceptabelt for projektet ProVent.

4.3 Dynamisk simulering i simpel bygning (IESVE)

For at sammenligne ventilationsvinduet med "almindelige vinduer" og mekanisk ventilation med varmegenvinding, er energiforbruget for den designede bygning beregnet for følgende fire scenarier:

1. Basisvinduer (1+2 vinduer) svarende til ventilationsvinduet (uden ventilation) og mekanisk udsugning
2. Ventilationsvinduet og mekanisk udsugning.
3. Basisvinduer (1+2 vinduer) svarende til ventilationsvinduet (uden ventilation) og balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding på 75 %
4. Traditionelle nye tre-lags lavenergivinduer og effektiv balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding på 80 %.

Scenarie 4 er medtaget for at vise besparelspotentialet ved anvendelse af nogle af de bedste teknologier på markedet. Data for de fire scenarier er vist i Tabel 4.

Som tidligere nævnt, er der af hensyn til opnåelse af et godt indeklima i henhold til bygningsreglementets krav i alle beregningerne regnet med et fast luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$. Dimensionerne er ens for alle vinduerne i de fire scenarier, dvs. vinduerne har standardstørrelse (1480 x 1230 mm) og en ramme/karm-bredde på 82 mm, hvilket giver en glasandel, F_g , på 76 %.

Tabel 4. Energimæssige egenskaber for vinduer og ventilationstype for de fire scenarier.

	Rude		Ramme- karm	Vindue		Ventilation
	U_g [W/(m ² ·K)]	g_g [-]	U [W/(m ² ·K)]	U_w [W/(m ² ·K)]	g_w [-]	
Scenarie 1. Basisvindue	0,80	0,56	1,9	1,07	0,43	Udsugning
Scenarie 2. Ventilationsvindue	0,80	0,56	1,9	1,07	0,43	Udsugning
Scenarie 3. Basisvindue	0,80	0,56	1,9	1,07	0,43	Balanceret med VGV
Scenarie 4. 3-lags energivinde	0,59	0,50	1,4	0,80	0,38	Balanceret med VGV

4.3.1 Resultater

I Tabel 5 og Figur 4.13 kan hovedresultaterne for det beregnede årlige energiforbrug ses. Af tabellen og figuren fremgår det, at der for den aktuelle bygning opnås en årlig energibesparelse på 7 % ved at anvende ventilationsvinduer med mekanisk udsugning fremfor basisvinduer med udsugning. Således har det altså en gavnlig effekt på energiforbruget at trække den friske luft til rummet ind gennem hulrummet i ventilationsvinduet fremfor, at trække den ind gennem traditionelle friskluftventiler eller lignende ventilationsåbninger.

I scenarie 3, hvor der etableres mekanisk ventilation med varmegenvinding kombineret med basisvinduer, opnås der til gengæld en energibesparelse på 19 %. Den større besparelse skyldes hovedsagligt, at ventilationsanlægget har en væsentlig mere effektiv varmegenvinding (temperaturvirkningsgrad på 75) sammenlignet med den varmebesparelse, der kan opnås ved forvarmningen af ventilationsluften i ventilationsvinduerne, hvor afkastluften sendes direkte ud i det fri. For ventilationsvinduerne er det kun varmetabet ud gennem vinduerne samt en del af solindfaldet, der potentielt kan udnyttes til forvarmning af indblæsningsluften og dermed opvarmning af bygningen. Omvendt er det ved ventilation med varmegenvinding hele luftskiftet, der potentielt kan

varmegenvindes på, og ved det aktuelle luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ er energiindholdet i den ventilerede luftmængde væsentlig større end varmetabet fra vinduerne.

For scenarie 4 ses en endnu større energibesparelse på 22 %, hvilket skyldes, at der anvendes nogle af markedets energimæssigt bedste 3-lags vinduer med U-værdi på $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ og en varmegenvinding på ventilationsanlægget på 80 %.

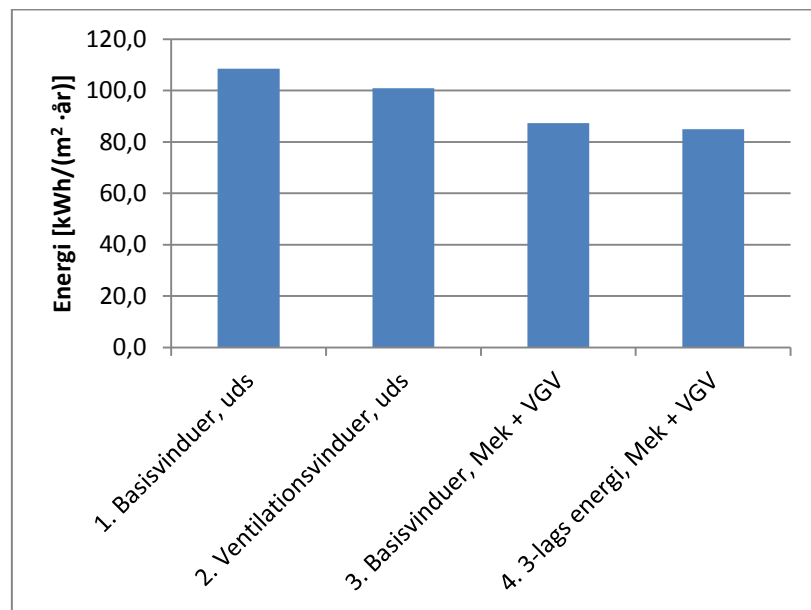
Det skal bemærkes, at der ikke er taget højde for behovet for køling pga. overtemperaturer.

Tabel 5. Bygningens årlige energibehov for de fire scenarier. Besparelse angiver den opnåede energibesparelse i procent i forhold til scenarie 1.

	Energibehov [kWh/m ²]	Besparelse [%]
Scenarie 1 Basisvinduer + udsugning	108	0 %
Scenarie 2. Ventilationsvinduer + udsugning	101	7 %
Scenarie 3. Basisvinduer + ventilation med VGV 75 %	87	19 %
Scenarie 4. 3-lags energivinduer + ventilation med VGV 80 %	85	22 %

Figur 4.13

Bygningens årlige energibehov for de fire scenarier



5 DISKUSSION

I dette afsnit behandles eventuelle forbehold og begrænsninger i de udførte analyser og der diskuteres fordele, ulemper og problemstillinger ved anvendelse af ventilationsvinduer.

5.1 Luftsifte

Det er gennem hele projektet forudsat, at der tilvejebringes et luftsifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ ved mekanisk udsugning eller mekanisk balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding. Dette for at sikre, at der er et tilfredsstillende indeklima i bygningen og for at opfylde bygningsreglementets krav. Selvom ventilationsvinduer i sig selv og/eller i samspil med aftræk over husets tag kan skabe en skorstenseffekt og dermed et naturligt luftsifte, vurderes det ikke at være tilstrækkeligt til på alle tidspunkter, at sikre et tilstrækkeligt luftsifte til det termiske og atmosfæriske indeklima, som kræves i moderne bygninger. Den naturlige ventilation afhænger i høj grad af udeklimaet, f.eks. spiller vindforhold en meget stor rolle. Indendørs kan simple brugsforhold som åbnede eller lukkede døre også have en indflydelse på den dominerende trykfordeling og dermed også det resulterende luftsifte. Således vurderes det, at det kan være svært at sikre at luftstrømmen altid bevæger sig indad gennem vinduet, med mindre ventilationsåbningerne er forsynet med kontraventiler.

5.2 Indeklima

Målingerne og beregningerne viser, at forvarmningen af ventilationsluften gennem ventilationsvinduet er forholdsvis begrænset, når der ikke er solskin på vinduet. F.eks. vil indblæsningstemperaturen en mørk vinteraften med en udetemperatur på $0 \text{ }^\circ\text{C}$, med den givne volumenstrøm på $4,5 \text{ l/s}$, medføre en opvarmning på ca. $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dog vil den yderligere forvarmning i ramme og karm forventeligt forøge indblæsningstemperatur til $5\text{-}6 \text{ }^\circ\text{C}$. Det er en ikke uvæsentlig forbedring i forhold til traditionelle friskluftsventiler, men det er dog stadig så koldt, at det kan give anledning til oplevelsen af træk og kuldenedfald tæt ved vinduet. Indblæsningstemperaturen kan øges betydeligt hvis volumenstrømmen reduceres, men i givet fald er det på bekostning af luftsiftet og dermed indeklimaet. Selvom den kolde og ofte tørre udeluft om vinteren giver mulighed for, at reducere frisklufttilførslen i forhold til at opnå en passende lav relativ luftfugtighed i bygningen, er der stadig ofte behov for et luftsifte af en vis størrelse, for at sikre et godt atmosfærisk indeklima ved opblanding og fortynding og bortskaffelse af forurening fra byggematerialer, inventar og personer mv.

5.3 Køling

Det skal bemærkes, at der i projektet ikke er taget højde for eventuel behov for køling pga. overtemperaturer. Her kan ventilationsvinduer også have en gavnlig effekt hvis de er forsynet med ventiler eller åbninger, som gør det muligt at sende den solopvarmede luft i hulrummet ud igen til omgivelserne i toppen af vinduet. Det vurderes dog, at ventilation af hulrummet i ruden kun vil kunne reducere solenergitilskuddet i begrænset omfang da størstedelen af

solenergitilskuddet sker ved direkte transmission gennem glassene til rummet, hvor det afsættes som varme. Samtidig vil en returnering af luften i hulrummet direkte til udeklimaet betyde, at den nødvendige friske luft til rummet skal komme andre steder fra.

5.4 Arkitektur og pladsforhold.

Som det fremgår af afsnit 4.3 viser beregningerne at ventilationsvinduerne giver en besparelse i energibehovet på 7 % under de givne forudsætninger sammenlignet med tilsvarende basisvinduer, mens mekanisk ventilation med varmegenvinding og basisvinduer giver en besparelse på 19 %. Dette skal holdes op imod, at der ofte kan være store omkostninger forbundet med etablering af mekanisk ventilation. Særligt hvis der er tale om eksisterende ejendomme, hvor der skal etableres nye ventilationskanaler mv. I mange ældre ejendomme er det problematisk, at få plads til de nødvendige ventilationskanaler og ventilationsaggregatet, og det er ikke altid foreneligt med bygningens indretning og arkitektur.

5.5 Vinduesopbygning

De undersøgte ventilationsvindue er opbygget som en 1+2 vinduesløsning, dvs. et enkelt lag glas yderst, et tykt luftfyldt ventileret hulrum i midten og en to-lags energirude inderst. En konstruktion med et enkelt lag glas kunne alt andet lige give en større forvarmning af ventilationsluften pga. større varmetab gennem det inderste glas. Men idet det er forudsat, at der altid vil være en fast volumenstrøm gennem vinduet, for at sikre et ønsket luftskifte på en halv gang i timen, vil der, når det er koldt udenfor, være meget stor risiko for kondensdannelse på indersiden af ruden i den nederste del nær karmen. Samtidig vurderes det, at en øget forvarmning af ventilationsluften, ved en opbygning med et-lags rude inderst, direkte kommer fra et tilsvarende øget varmetab, hvilket samlet set ikke medfører en yderligere varmebesparelse. Dette er hovedårsagerne til, at der er valgt opbygningen med 2-lags energirude inderst, for at sikre at der undgås problemer med kondensdannelse.

5.6 Solstråling

Som nævnt giver ventilationsvinduer mulighed for at udnytte solstrålingen til forvarmning af ventilationsluften, inden den sendes ind i rummet. Muligheden for dette vurderes dog at være begrænset, da antallet af solskinstimer i fyringssæsonen er ganske få. For at få den bedste udnyttelse af solstrålingen i form af en "behagelig" indblæsningstemperatur skal vinduerne placeres mod syd og til dels øst/vest vendt i bygninger, som anvendes i dagtimerne, hvor der er solskin. For boliger er dette ofte et problem, da solskinstimerne i fyringssæsonen som regel falder på tidspunkter i dagtimerne, hvor mange beboere er ude af huset. Dvs. fordelene ved solopvarmningen af indblæsningsluften som skulle reducere eventuelle problemer med kuldenedfald og træk, ikke kommer til gavn en stor del af tiden.

5.7 g-værdi

Ifølge WV er der kun en 1,66 % stigning i g-værdien når det kun er effekten af udetemperatur og solstråling der undersøges. Størstedelen af "variationen" i g-værdien skal findes i opvarmningen af luften. Den er der taget højde i den leverede frisklufttemperatur. Andelen af solstråling der går gennem vinduet er kun ændret fordi mere varme vil blive afsat i glasset.

5.8 Støjdæmpning

Ventilationsvinduers indflydelse på støjforhold er ikke behandlet i nærværende projekt. Der findes dog en række studier, der omhandler ventilationsvinduers støjdæpende egenskaber. Disse peger på, at rudekonstruktionen med tre lag glas og et stort luftfyldt hulrum i sig selv giver en effektiv støjdæmpning. Selv med ventilationsspalterne åbne i vinduet er støjdæmpningen betydelig. Pga. den lange vej gennem ventilationsvinduet fra den udvendige åbning nederst til de indvendige åbning øverst i vinduet giver ventilationsvinduer en betydelig bedre støjdæmpning end et tilsvarende traditionelt vindue, som er åbnet så meget, at det leverer den samme ventilationsmængde. Ventilationsvinduer kan derfor være attraktive i støjplagede områder, hvor man ønsker mulighed for frisk luft gennem vinduerne, men samtidig ønsker støjdæmpning.

5.9 Forvarmning i ramme/karm

I forbindelse med målingerne i GHB blev det observeret, at der sker en forvarmning af ventilationsluften på op til 2,5 grader (afhængig af volumenstrømmen) i passagen gennem rammen og karmen allerede før luften når hulrummet i ruden. Det må formodes, at der sker en lignende forvarmning i samme størrelsesorden af udeluft, som trænger ind via friskluftsventiler i traditionelle vinduer eller sprækker og andre utætheder i klimaskærmen. Der er ikke taget højde for dette i bygningssimuleringerne hvor der sammenlignes med traditionelle vinduer. Det vurderes dog at effekt kun har ganske lille betydning og primært er relevant i forbindelse med udsugning.

Det skal her nævnes, at der ved infiltration generelt vil forekomme en form for varmegenvinding men, at det er et koncept der ses bort fra i standardberegninger af bygningers energiforbrug. Ved ikke at regne på den genvundne varme ved infiltration i standardsituationer giver man ventilationsvinduet en regneteknisk fordel. For resultaterne betyder det at den beregnede forskel på 7 % givetvis vil være mindre i den virkelige verden. Hvor stor en indflydelse denne udeladte effekt har, er ikke bestemt i projektet.

6 REFERENCER

- [1] ISO 15099. Thermal performance of windows, doors and shading devices -- Detailed calculations. International Organization for Standardization, 2003.
- [2] Zegowitz A, Heusler I. Fraunhofer IBP report name [An intelligent window for optimal ventilation and minimum thermal loss, Final test report]. Stuttgart, Germany: Fraunhofer Institute for Building Physics; 2012.
- [3] ISO 12567-1. Thermal performance of windows and doors -- Determination of thermal transmittance by the hot-box method -- Part 1: Complete windows and doors. International Organization for Standardization, 2010.
- [4] Appelfeld D, Svendsen S. Experimental analysis of energy performance of a ventilated window for heat recovery under controlled conditions. Energy and Buildings 2011;43:3200-7.
- [5] DS 418. Beregning af bygningers varmetab. Dansk Standard, 2011.
- [6] Raffnsøe LM. Thermal Performance of Air Flow Windows [master thesis]. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark; 2007.