

Energirenoveringstiltag i Komponistkvarteret med særligt fokus på ventilationsvinduer

Christoffer Rasmussen (s083008)

Ronnie Piil Haagenzen (s083017)

BYG DTU
Danmarks Tekniske Universitet

3. juni 2013

Forord

Nærværende rapport er bygget op omkring Komponistkvarteret på Østerbro. Komponistkvarteret kendes også under navnet Strandvejskvarteret. Kvarteret består af knap 400 byggeforeningshuse i tre plan eksklusiv kælder. Bebyggelsen i kvarteret er af bevaringsværdig karakter, hvilket giver anledning til særligt stramme rammer for eventuelle renoveringstiltag.

Strukturen i rapporten er baseret på en indledende analyse af en repræsentativ boligtype for området. På baggrund af bygningsregistreringer, spørgeskemaundersøgelser og tegningsmateriale af forskellig art er der udarbejdet en række energiberegninger af referencehuset, for på den måde at belyse effekten af forskellige energibesparende tiltag. Resultaterne fra de indledende undersøgelser har rettet fokus på ventilationsvinduer samt brugen af dynamiske simuleringsværktøjer til vurdering af de indeklimatiske og energimæssige effekter af disse. I sidste del af rapporten belyses hvorledes alternative ventilationsstrategier kan anvendes til at reducere energiforbruget i boligerne og samtidig forbedre eller opretholde et fornuftigt indeklima.

Rapporten er udarbejdet af Christoffer Rasmussen og Ronnie Haagen, civilingeniørstuderende ved Danmarks Tekniske Universitet, under vejledning af Peter Andreas Sattrup og Søren Peter Bjarløv – begge lektorer ved DTU BYG.

Arbejdet er sket på opfordring og med hjælp fra beboer i komponistkvarteret, Søren Borch. Desuden tak for hjælpen til Toke Rammer Nielsen og Jianhua Fan (begge DTU BYG) og diplomingeniørstuderende Kevin Tran og Søren Frisch Larsen.

Indhold

Forord	ii
1 Introduktion	1
1.1 Område og bygningsbeskrivelse	1
1.2 Lokalplan og bevaringsværdighed	2
2 Indledende bygningsanalyse	4
2.1 Kategorisering af boligtyper	4
2.2 Følsomhedsanalyse af energirenoveringstiltag	4
3 Ventilationsvinduet i dag	7
3.1 Undersøgelser af ventilationsvinduer i Danmark	7
3.2 Opbygning og funktion af ventilationsvinduer	8
4 Implementering af ventilationsvinduer i IES VE	12
4.1 Konstant luftmængde	12
4.2 Variabel luftmængde	13
5 Analyse af ventilationsvinduet i skalamæssig kontekst	16
5.1 Site	16
5.2 Structure	19
5.3 Skin	20
5.4 Service	21
5.5 Space Plan	23
6 Diskussion og konklusion af ventilationsvinduet	26
6.1 Implementering og virkning	26
6.2 Alternativer og økonomi	29
6.3 Konklusion	33
7 Litteratur	35

1

Introduktion

En betragtelig del af energiforbruget i Danmark går til bygningsdrift, og langt hovedparten af de eksisterende bygninger der ses i gadebilledet i dag, vil stå mange år endnu. Dette betyder, at det er nødvendigt at energirenovere den eksisterende bygningsmasse, for at opnå betragtelige energireduktioner i den samlede bygningsmasse. Mange bygninger har en kulturhistorisk værdi i form af deres arkitektoniske udtryk. Disse bygninger lægger i høj grad op til at der udvikles renoveringsløsninger med en dokumentér- og målbar effekt, som tilgodeser deres arkitektoniske udtryk.

Dette forslag til hvorledes energiforbruget i byggeriet kan reduceres, samtidig med at indeklimakvaliteten opretholdes eller ligefrem forbedres, er baseret på principperne bag ventilationsvinduet. Vinduestypen har været kendt længe og brugt i f.eks. vinterpaladset i Sct. Petersborg (Reinholdt 2008), men den dynamiske virkning af de energi- og indeklimamæssige effekter på rum- og bygningsniveau er i kendt i meget ringe grad. Vinduet er behandlet i adskillige videnskabelige projekter og deres effekt virker lovende i flere af disse afrapporteringer. Problemet med vinduerne, som det ser ud i dag, er at kan være svært at vurdere deres effekt på timemæssig basis, da de nuværende beregningsmetoder bygger på stationære klimatiske forhold i og omkring bygningen.

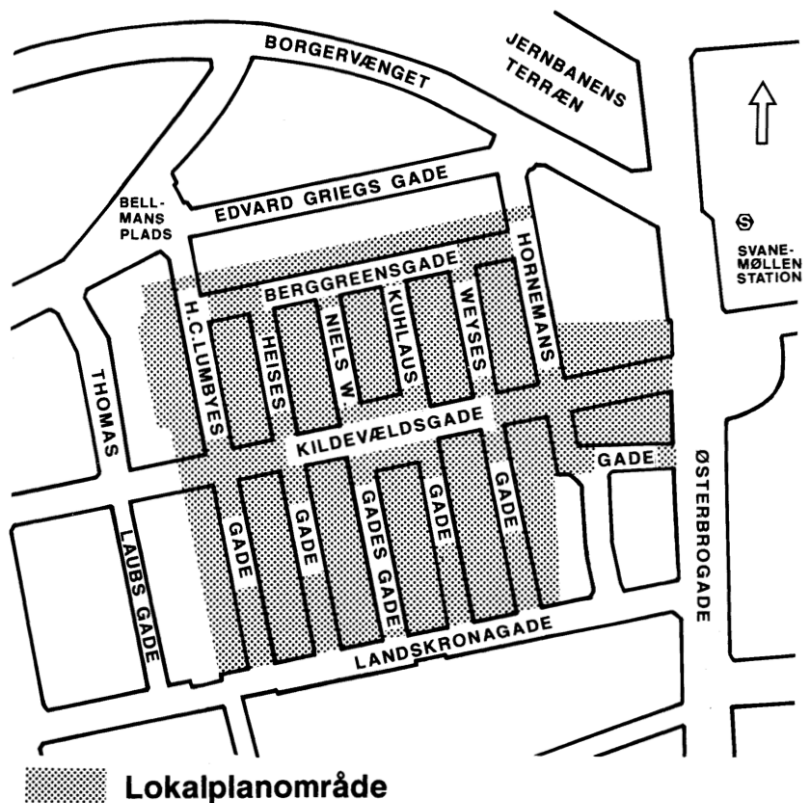
Vinduet kan med den rette udvikling sikre at bevaringsværdigt byggeri kan behold sit arkitektoniske udtryk, og måske medvirke til at decentrale ventilationsløsninger på husets facader, som kendes fra adskillige storbyer verden over, i mindre grad bliver nødvendige.

Det ønskes her at beskrive en metode som skal hjælpe med at vurdere potentialet i ventilationsvinduer i et eksisterende byggeri, samt give en konkret vurdering for en typisk bolig i Komponistkvarteret.

1.1 Område og bygningsbeskrivelse

De 393 byggeforeningshuse som sammen danner Komponistkvarteret er beliggende på Ydre Østerbro tæt ved Svanemølle Station i København. Kvarteret er opført over en tiårig periode startende i år 1892 og tegnet af Frederik Bøttger for Arbejdernes Byggeförening. Husene bestod oprindeligt af tre etager som hver blev betragtet som

selvstændige boliger – i dag er flere af boligetagerne slået sammen til enkelte ejerboliger (Strandvejskvarteret 2013).



Figur 1.1: Kort over Komponistkvarteret.
Kilde: Lokalplan 221.

Kvarterets karréer er bygget op omkring den øst-vestgående gade, Kildevældsgade. Facadeorienteringen er ligeledes overvejende øst-vestvendt. Boliger for enden af hver karré samt en væsentlig part i den nord- og østlige del af kvarteret har dog nord-sydvendte facader.

1.2 Lokalplan og bevaringsværdighed

Komponistkvarteret er bevaringsværdigt byggeri og underlagt en lokalplan (Bygge- og Teknikforvaltningen 1993), der begrænser mulighederne for energirenovring. Lokalplanen for kvarteret beskriver, hvorledes kvarterets kulturhistoriske og arkitektoniske udtryk skal bevares. Lokalplanens formål er både at fastholde kvarterets helhedsindtryk og detaljer. Ombygning af husene må kun ske ved godkendelse fra magistraten.

I lokalplanen samt håndbogen for husejere i kvarteret fremlægges en række punkter der skal sikre det arkitektoniske udtryk. Det nævnes, at facader – herunder vinduer og døre – mod gård og gade skal fremstå som oprindeligt. Dette gælder for både materialer, udformning, farve og øvrig fremtræden.

Tagfladen og skorstenspipen er ligeledes omfattet af flere restriktioner. Eventuelle vind- og/ventilationshætter må kun placeres på

Liste over relevante energirenovrings-tiltag for komponistkvarteret beskrevet i Håndbog for husejere i Strandvejskvarteret (Strandvejskvarteret 2006).

- Vinduer
- Loft
- Kviste
- Skråvægge/skunke
- Paneler under vinduer
- Etageadskillelse over kælder
- Kældergulv
- Kældervægge

tagsiden mod gården. Skorstenspipecn skal, som facaderne, fremstå som oprindelig.

Da husene er opbygget med massive teglvægge, er der ikke mulighed for hulmursisolering i forbindelse med en efterisolering. Ligeledes kan der ikke gives tilladelse til udvendig efterisolering, og indvendig isolering vil optage for meget af de i forvejen små rum (Strandvejskvarteret 2006). De relevante løsninger for kvarteret kan derfor begrænses til tiltagene listet i marginen.

Restriktionerne for kvarteret der har indskrænkende betydning for renoveringsmulighederne. I rapporten vil der så vidt muligt blive undersøgt tiltag, der strider minimalt imod lokalplan og kvarterets håndbog.

Indledende bygningsanalyse

2.1 Kategorisering af boligtyper

Komponistkvarterets 393 huse er sammensat af tre bygningstyper plus enkelte unikke bygningsudformninger i kvarteret nær Østerbrogade. Af de tre typiske bygningsgeometrier er der ende-huse, frontspids-huse og kvist-huse, hvoraf kvist-huset er den mest udbredte type i kvarteret. For de tre hovedtyper er der igen en mindre variationer, for eksempel kvist størrelse og antal gavlvinduer.

På facadeopstalten i figur 2.1 ses de tre typer samt mindre variationer i enkelte af husene. Andelen af den tre hustyper er estimeret til 15-30-55 for henholdsvis frontspids-, ende- og kvisthuse.

Kvarterets gader er bygget op omkring de tre øst-vestgående gader, Berggreensgade i nord, Landskronagade i syd og Kildevældsgade som midterakse. Mellem disse gader ligger hovedparten af kvarterets huse på de nord-sydgående gader, hvis facader er orienteret øst-vest. Kort over kvarteret kan ses i figur 1.1.

Til at analysere kvarterets potentielle energirenoveringstiltag er en enkelt repræsentativ hustype udvalgt, og en række faste betingelser er sat op for konstruktionsopbygninger og lignende. Via optællinger af boligtyper og deres typiske orientering, er et kvist-hus med øst-vestvendte facader valgt som reference for undersøgelserne. Opbygningen af det valgte referencehus, der benyttes i undersøgelserne beskrives yderligere i afsnit 2.2.

2.2 Følsomhedsanalyse af energirenoveringstiltag

For at vurdere hvorledes midler til energirenovering bruges bedst muligt og skaber den største energimæssige gevinst, er der indledningsvis udarbejdet en følsomhedsanalyse af de mulige energibesparelser ved forskellige renoveringstiltag. For det særligt udvalgte



Figur 2.1: Original facadeopstalt af byggeforeningshusene fra Landskronagade i Komponistkvarteret.

element - ventilationsvinduer - vil projektet afslutningsvis indeholde totaløkonomiske vurderinger.

Til beregning af boligernes energiforbrug og potentielle energibesparelser er programmet Be10 fra Statens Byggeforskningsinstitut anvendt. Beregningsmodellens geometri er defineret på baggrund af offentligt tilgængelige planer, snit og tekniske tegninger for en repræsentativ adresse i kvarteret, samt digitalt tegningsmateriale for en tilsvarende bolig. Til vurdering af bygningernes nuværende tilstand er benyttet egne tilstandsregistreringer, spørgeskemaundersøgelse fra 38 beboere samt Håndbog for Energikonsulenter 2008. Desuden er der foretaget blower door-tests i to af boligerne, i et sideløbende afgangsprojekt for diplombachelorstuderende ved DTU Kevin Tran og Søren Frisch Larsen, hvorfra resultater er anvendt. Beregnet energiforbrug er sammenholdt med forbrugsdata fra HOFOR (2011).

Som reference er oprindelige konstruktioner og de mest almindelig renoveringstiltag – vurderet ud fra svar på spørgeskemaer – hovedsagligt anvendt. De fleste boliger har nyere varmeanlæg. Omkring halvdelen af boligerne har efterisolerede skråtag på anden sal, men energibesparelsen ved dette ønskes stadig synliggjort og er derfor ikke en del af referencen.

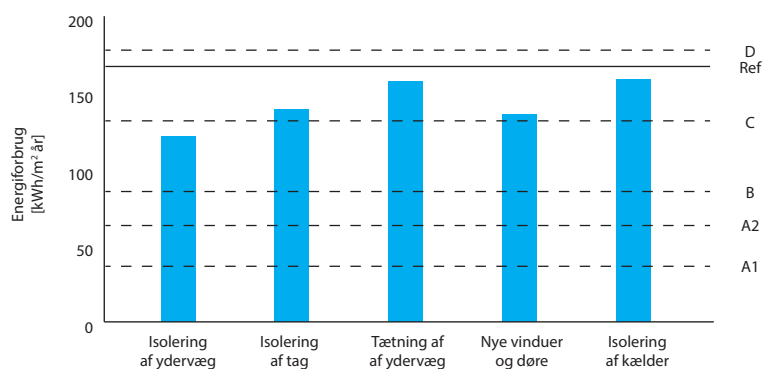
Renoveringstiltag	Primær parameterændring	Sekundær parameterændring	Pris
100 mm indv. isolering og beklædning	$U_{væg}$ [W/m ² K] 1,32 → 0,3	–	75 000 kr
100 mm isolering af skråtag og kvistvægge	U_{tag} [W/m ² K] 1,2 → 0,38	–	12 000 kr
Lufttætning af klimaskærm	Q_{inf} [l/s m ²] 0,45 → 0,3	–	10 000 kr
Nye døre og dannebrogsvinduer	U_{vin} [W/m ² K] 2,7 → 0,8	g_{vin} [–] 0,75 → 0,5 Q_{inf} [l/s m ²] 0,45 → 0,35	55 000 kr
Efterisolering af kæder- væg og tærrændæk	$U_{kælder}$ [W/m ² K] 0,48 → 0,19	$U_{terrændæk}$ [W/m ² K] 1,32 → 0,35	55 000 kr
Decentral/kompakt mekanisk ventilation	Varmegenvindingsgrad 0,8 på 50-65 % af luften SEL 0,5 kJ/m ³	–	50 000 kr

Tabel 2.1: Nuværdisbetragtning af forskellige ventilationsløsninger.

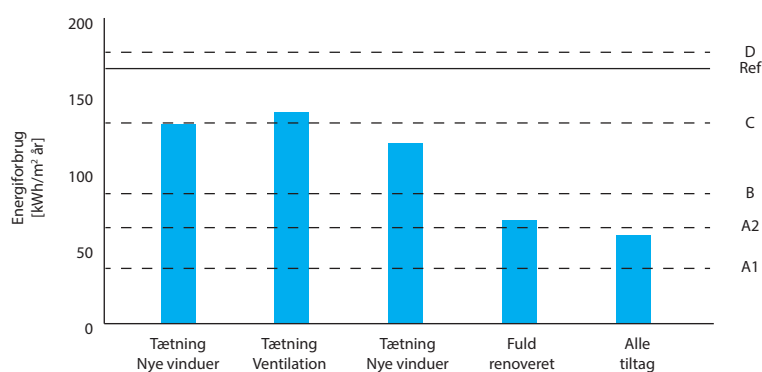
Kælder, spidsloft og trappeopgang er defineret som uopvarmede rum. Dog har sidst nævnte stor varmeudveksling med boligrummene og derfor medregnet i det samlede boligareal. Det samlede boligareal er på omtrent 150 m².

I tabellen (2.1) oplistes hvilke renoveringstiltag, der giver anledning til de angivne årlige energibesparelser i søjlediagrammerne (Figur 2.2 og 2.3). Overslagspriser er angivet ud fra DTU Byg-Rapport R-223 (Tommerup 2010) og der henvises hertil for yderligere beskrivelse af energirenoveringstiltag.

Energibesparelserne ved tiltagene illustreret i figur 2.2 er ikke kumulative, da de enkelte tiltag som regel vekselvirker. Eksempelvis vil det fulde udbytte af en klimaskærmstætning ikke komme til udtryk, uden at etablere varmegenvinding på ventilationen eller gå kompromis på indeklimaet i boligen. Omvendt er etablering af mekanisk ventilation med varmegenvind ikke et fornuftig renoveringstiltag, før klimaskærmen er tilstrækkelig tæt. Tiltaget er derfor først medtaget i figur 2.3, som viser beregnede energibesparelser for almindelig renoveringskombinationer.



Figur 2.2: Oversigt over enkelttiltag.



Figur 2.3: Oversigt over kombinerede energirenoveringstiltag.

3

Ventilationsvinduet i dag

I løbet af de sidste 15 år har en række virksomheder beskæftiget sig med ventilationsvinduet. Af danske navne kan nævnes vinduesproducenterne HORN Vinduer, Hansen Group, P.C. Vinduer og Døre, ClimaWin Techniq samt ventilproducenten, Winvent. Winvent er underleverandør af ventilerne til ventilationsvinduerne af typen som HORN Vinduer har lanceret. Rettighederne til ventilationsvinduet fra HORN vinduer er dog solgt til ClimaWin (Horn, personlig kommunikation, 8. maj 2013). P.C. Vinduer og Døre er gået konkurs i 2008 (Building Supply 2008). I de følgende dele af rapporten vil der ikke blive skelnet mellem ClimaWin Techniq og HORN i forbindelse med ventilationsvinduer.

3.1 Undersøgelser af ventilationsvinduer i Danmark

Trods egne undersøgelser af ventilationsvinduer fra både HORN Vinduer, Hansen Group og P.C. Vinduer og Døre er den offentligt tilgængelig dokumentationen af vinduernes energimæssige effekt yderst begrænset. P.C. Vinduer og Døre har fået udarbejdet en teoretisk rapport af DTU i 2005 (Tommerup), omhandlende vinduernes energimæssige egenskaber. Hansen Group har i 2002 undersøgt to prototyper af ventilationsvinduet i et eksisterende byggeri på Store Strandstræde i Indre København. Dokumentationsrapporten beskriver en række fordele ved ventilationsvinduet i forhold til ekstern støj og ventilation gennem vinduerne. Beskrivelsen af vinduets til tænkte ventilations-/energimæssige egenskaber berøres til gengæld kun meget perifert: *De målinger, som er foretaget af udeluften og af den luft som kommer ind i rummet, viser en temperaturforskel på 4 graders opvarmning af udeluften. Dette ene resultat viser med tydelighed, hvor stor komfort dette vindue giver* (DesignGroup 2002). Dette udsagn er dog langt fra fyldestgørende, da både meteorologiske forhold (temperatur, vind, solstråling) og bebyggelsens kontekst har betydning for opvarmningen af ventilationsluften.

ClimaWin Techniq har i samarbejde med blandt andre Fraunhofer Institutet i Stuttgart og Aalborg Universitet udarbejdet en rapport omhandlende ventilationsvinduet fra ClimaWin. Rapporten er dog ikke offentliggjort endnu.

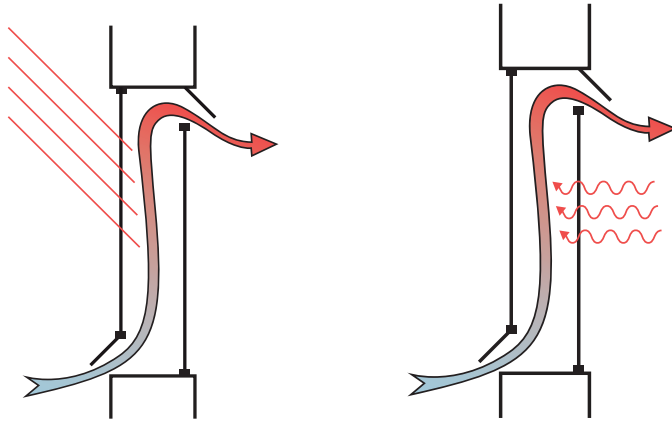
Udover arbejdet, der har direkte tilknytning til vinduesproducenterne, er der også lavet en række uvildige undersøgelser, herunder specialet, *Thermal Performance of Air Flow Windows*, af Lau M. Raffnsøe fra DTU (2007). Rapporten afdækker termiske forhold i ventilationsvinduer under dynamiske forhold som varierende luftstrøm gennem luftspalten, temperatur og solpåvirkning. Rapporten konkluderer at der kan være energi- og indeklimamæssige gevinster ved at anvende ventilations vinduer. Med udgangspunkt i denne og rapporten, *Energibesparelse for "Ventilationsvinduet"* (Tommerup 2005), er undersøgelserne af ventilationsvinduet bygget op.

Generelt for de nævnte rapporter ses en positiv tendens i resultater og konklusioner. Undersøgelserne i denne rapport forsøger med afset i de nævnte publikationer, at belyse de indeklimatiske og energimæssige forhold ved brug af dynamiske simuleringsmodeller i *Integrated Environmental Solutions – Virtual Environment (IES VE)*. Ved brug af denne type kommercielle bygningssimuleringsprogrammer kan effekten af forskellige meteorologiske påvirkninger vurderes på timebasis, året igennem. Metoden er dog stadigvæk stærkt forsimplet og vil kunne analyseres endnu mere præcist med software tile finite element og CFD.

3.2 *Opbygning og funktion af ventilationsvinduer*

Ventilationsvinduet bygger på princippet om at frisk luft passerer gennem en luftspalte mellem glaslagene i vinduet, hvorved luften får tilført energi fra de to tilstødende glasflader. Det yderste glaslag har ofte kun en smule højere temperatur en ventilationsluften og bidrager derfor ikke med så meget varme. Ved solpåvirkning opvarmes dette glaslag dog væsentligt på grund af absorption og langt mere af denne varme føres derfor i et ventilationsvindue med ind i boligen. Samme effekt sker også i det inderste glaslag i mindre grad. Dette fænomen benævnes som en forbedret effektiv g-værdi.

Det dog især temperaturen inde i rummet, der er afgørende for dette glaslags temperatur. Generelt vil varmetransporten under danske klimatiske forhold bevæge sig fra inde til ude. Dette varmetab bevirker at det inderste glaslag i lange perioder er en del varme end ventilationsluften og kan give en decideret opvarmning. Da energitilførslen til ventilationsluften er forårsaget af et varmetab gennem ruden, vil det kræve ekstra energi at opretholde rumtemperaturen og den tvungne konvektion i luftspalten vil forøge dette varmetab yderligere. I stedet for at bruge rummets varme til at opvarme luften, som så igen føres ind i rummet, kan vinduerne i stedet blot konstrueres til at isolere langt bedre. Et moderne lavenergivindue med argongas i luftspalterne er for eksempel langt bedre til at minimere transmissionstab gennem ruden, især på grund af den isolerende gas. Forskellen mellem den effektive U-værdi for et ventilationsvindue og den almindelige U-værdi for et lavenergivindue er derfor om varmen føres aktivt ind i rummet igen med ventilationsluften eller om den passivt holdes inde.



Figur 3.1: Illustrations af de to opvarmningsprocesser ved hhv. solstråling og varmetransmission

En væsentlig fordel ved at ventilationsluften opvarmes er dog at det kan mindske trækgener. Ventilationsluften skal opvarmes i rummet alligevel, men for at undgå træk skal dette gøre hurtigt og her hjælper det at luften er forvarmet i ventilationsvinduet.

Af de nævnte ventilationsvinduesproducenter i forgående afsnit er der to grundtyper af ventilationsvinduer – ventilationsvinduet fra Hansen Group og ClimaWin Techniq. Hansen-vinduet, Hansen 3G, er det mest simple i dets opbygning, hvilket grundlæggende er et koblet vindue, med en indbyrdes afstand mellem de to vinduer på omtrent 200 mm.

Hansen 3G har U-værdier på $1,0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ på almindelige vinduesstørrelser med en 1 + 2 opbygning, og endnu lavere for 2 + 2 opbygning (Hansen Group 2011).

Hansen 3G er drevet af vindtrykket på vinduesåbningen samt andre naturlige drivkræfter. Vinduet fra ClimaWin benytter grundlæggende samme princip, men er mekanisk styret i forhold til udetemperaturen. Reguleringen af spjældene i ventilen sker automatisk ved brug af vokser med forskellige udvidelseskoefficienter. Ved udetemperaturer under 20°C nedreguleres luftstrømmen gennem vinduet afhængig af temperaturstigningen af ventilationsluften i vinduet. Under de mest ekstreme forhold reduceres ventilationsmængden med $3/5$ af den maksimale. For at forsvare denne reduktion er ventilationsbehovet bestemt efter den relative luftfugtighed i rummet. I vintermånederne hvor det absolutte fugtindhold i udeluften er relativt lavt, tilføres rumluften naturligt nok mindre fugt, end ved en varm dag med tilsvarende relative fugtighed. Af denne grund kan ventilationsmængden reduceres. Det skal dog bemærkes at fugtindholdet i boliger er særligt afhængigt af brugsmønstrene. Den interne fugtproduktion i boligen kan derfor godt forårsage, at der kræves betragtelige ventilationsmængder trods det lave fugtindhold i ventilationsluften. Andre forureningskilder som bio effluenter, CO_2 og kemikalieafgasning fra materialer vil også være bestemmende for hvor meget ventilationsmængden kan nedsættes med.

Ved temperaturer over 22°C trækkes luften direkte ind i rummet i toppen af vinduet, og virker derfor som traditionelle friskluftsventiler.

Koblede vinduer er bygget op af to vinduer med et luftlag imellem. Den indbyrdes afstand gør som regel vinduesdybden væsentlig større end traditionelle vinduer. De koblede vinduer har generelt en længere levetid end traditionelle forseglede flerlagsvinduer og isoleringsniveauet for moderne typer er fornuftig. Dog kræver de typisk mere vedligeholdelse, da der kan sætte sig snavs på både ydre og inderside af ruden.

I perioder med eventuelle overtemperaturer ventileres mellemrummet i vinduet for på den måde at øge varmetransporten ud gennem vinduet (Winvent 2013).

Fælles for både Hansen 3G og ClimaVent er at der kræves et undertryk i bygningen, for at drive ventilationsluften den rigtige vej gennem vinduet. Får indeluften mulighed for at bevæge sig ud via ventilationsvundet, er der risiko for kondensering i luftspalten. Generelt er tætning af bygningen derfor nødvendig, for at opnå det bedste resultat. Det kan ved begrænset drivtryk i bygningen være nødvendigt, at der anvendes mekanisk udsugning for at opretholde dette undertryk i boligen.

At anvende et system som Winvent i kombination med mekanisk udsug vil energimæssigt, være stort set på linje med et mekanisk balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding ifølge Winvent selv (Winvent 2013).

Ifølge Bygningsreglementets kræves en fast tilførsel af udeluft svarende til et luftskifte på 0,5 gange pr. time, og til sammenligning af både bygningskomponenter og bygninger bør denne luftmængde anvendes. En del af denne luftmængde er, som tidligere nævnt, infiltration, som i dette tilfældet forventes begrænset til et minimum ved omfattende tætningsarbejde. Der skal derfor tilføres tilsvarende mere luft enten gennem vinduer, friskluftsventiler eller et mekanisk anlæg, enten naturligt eller styret af en ventilator.

I de tidligere beregninger med Be10 svarer ventilationsmængden til et gennemsnit over året. At undersøge effekten af ventilationsvinduet som bygningskomponent i dynamisk sammenspil med det øvrige indeklimaparametre, er nødvendigt til fuldstændig evaluering af produktet og den tilhørende ventilationsstrategi. Denne konklusion baseres blandt andet på specialet Thermal Performance of Air Flow Windows (Raffnsøe, 2007), hvor performance-data for et teoretisk vindue med reference til ovennævnte producenter er udledt. Data herfra danner grundlag for nærværende undersøgelse af energiforbrug såvel som indeklima med det kommercielle dynamiske simuleringsprogram IES VE.

Nærmere undersøgelse med dynamisk simulering af ventilationsvinduet er en besværligt, da mange parametre skal spille sammen på en gang. Det forhindrer på den ene side implementering i byggeriet, da egentlig effekt ikke kan påvises. Omvendt kan dette have en hvis fordel for producenterne, da den påståede effekt er svær at modbevise. Problemet skyldes at ventilationsvinduernes performance ændres konstant, som følge af ændringer i ude- og indeklimapåvirkningerne omkring dem.

Hvis det som i Bygningsreglementet forudsættes at ventilationsmængden er konstant, så forøges mængden af varme der tilbageføres via ventilationsluften blot af solindstråling (en forbedret effektiv g-værdi) og af temperaturforskellen mellem inde og ude (en forbedret effektiv U-værdi). Men ved varierende luftmængder, for eksempel styret af eksternt vindtryk eller temperaturføler er det mere kompliceret. Den varierende luftmængde påvirker både den effektive g-værdi og U-

værdi samt den samlede mængde luft, som skal opvarmes. Desuden varierer de parametre, som giver den varierende luftmængde også hele tiden. Alt sammen gør implementering i bygningssimulering ganske besværlig.

For både at vise en mulig løsning for implementering samt undersøge ventilationsvinduerne virkning i den konkrete bolig, beregnes der på fire mulige konfigurationer af naturlige ventilationsanlæg. Etablering af et fuldt ud naturligt drevet ventilationsanlæg er muligt for de pågældende boliger, da der kan etableres en ventilationsskakt i ubrugte skorstene. Vindpåvirkning herpå og højdeforskellen på toppen af denne og de rum, der skal ventileres vil give pålidelige – om end varierende – drivtryk og derfor luftmængder. Den konstante luftmængde kan forestilles at være mekanisk styret af en ventilator.

Konstante og variable luftmængde er undersøgt for både ventilationsvinduet og friskluftsventiler. Noten i marginen beskriver hvad de fire cases kan associeres med.

Ventilationsvindue – Konstant

Ventilationsvindue med mekanisk udsug

Ventilationsvindue – Variabel

Naturligt drevet ventilationsvindue

Friskluftsventil – Konstant

Ventilationsventil med mekanisk udsug

Friskluftsventil – Variabel

Naturligt drevet ventilationsventil

4

Implementering af ventilationsvinduer i IES VE

I følgende afsnit vil de teoretiske udledninger af de matematisk beskrivelser af effekterne på ventilationsvinduet egenskaber blive belyst. Udledningerne beskriver temperaturstigningen i ventilationsvinduet som funktion af luftgennemstrømningen, solinstrålingen og varme-transporten gennem vinduet samtidig beskrives hvordan dette virker konceptuelt og praktisk i IES VE. I de endelige formelresultater er nødvendige numeriske værdier indsat så de svarer til by- og bygningssk kontekst for Komponistkvarteret. Disse er derfor ikke generelt gældende.

4.1 Konstant luftmængde

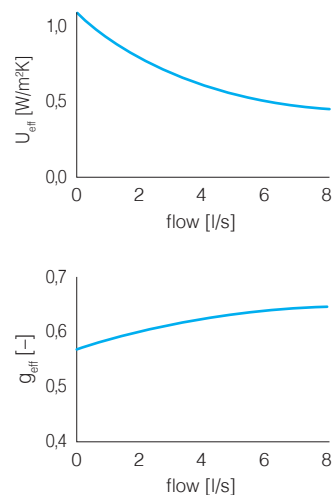
I tilfældet hvor luftmængden holdes konstant, er de to energibidrag til ventilationsluften (varmetransporten gennem ruden og solstrålingen), proportionelle med temperaturforskellen mellem ude og inde og solstrålingsintensiteten. I stedet for at alle vinduernes U- og g-værdier konstant varierer i bygningsmodellen, kan det antages at energibidraget af denne effekt alt sammen føres tilbage i rummet med ventilationsluften.

De to energibidrag kan beskrives ved en reduktion af U-værdien og forøgelsen af g-værdien i forhold til vinduets reelle U- og g-værdier. Den reducerede U-værdi og øgede g-værdi kaldes den effektive U- og g-værdi, eller U_{eff} og g_{eff} . Værdierne for U_{eff} og g_{eff} for det undersøgte vindue er bestemt ud fra graferne i figur 4.1.

Varmetilskuddet til ventilationsluften fra varmetransmissionen gennem ruden i watt, kan bestemmes ved forskellen mellem den reelle og den effektive U-værdi, multipliceret med rudearealet og temperaturforskellen mellem inde og ude. Udtrykket ses i formel 4.1.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = (U - U_{\text{eff}}) \cdot A_{\text{rude}} \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

På lignende vis kan varmetilskuddet fra solstrålingen bestemmes. I understående udtryk (4.2 og 4.3) anvendes den globale udvendige solstråling på ruden, $Q_{\text{sun,e}}$, og den samlede solstråling inde i rummet, $Q_{\text{sun,i}}$. Begge værdier er målt i watt. De to udtryk, 4.2 og 4.3, er ens. Da IES VE ikke giver mulighed for at benytte den udvendige



Figur 4.1: Grafer for U_{eff} og g_{eff} som funktion af luftstrømmen gennem ventilationsvinduet. Kilde: Raffnsøe, 2007

solstråling på ruden som variationsparameter i funktionsudtrykket er omskrivningen nødvendig.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = (g_{\text{eff}} - g) \cdot \dot{Q}_{\text{sun,e}} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = (g_{\text{eff}} - g) \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{sun,i}}}{2g} \quad (4.3)$$

I den benyttede formel (4.3) regnes der derved tilbage fra soltilskuddet i rummet, til solpåvirkningen på vinduets yderside. 2-tallet i divisionen skyldes at der er to vinduer i de pågældende rum.

Da der for både U_{eff} og g_{eff} benyttes rumvariable bevirker metoden også at bidraget vil variere for alle rummene i boligen som funktion af orientering og indetemperatur.

De to bidrag til temperaturstigningen i et ventilationsvindue med konstant luftstrøm samles, og temperaturforøgelsen af indblæsningsluften kan bestemmes.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{rad}}}{1/9 \cdot \rho_{\text{air}} \cdot q_{\text{total}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (4.4)$$

Luftens densitet og specifikke varmekapacitet kan for dette tilfælde antages at være uafhængig af temperatur og derfor konstant $1,29 \text{ kg/m}^3$ og 1005 J/kg K (Petersen 2008). Værdierne gælder for luft under 1 atmosfære tryk ved 0°C (Cengel & Ghajar 2011).

For at implementere effekten af opvarmningen på rumniveau er det også nødvendigt at ventilationsmængden er justeret til at passe til de enkelte rum. I denne undersøgelse foregår husets ventilation kun gennem vinduer, men for at sikre sammenligningsgrundlaget skal Bygningsreglements krav til ventilation per areal fra rummene uden vinduer også dækkes. Det samlede ventilationsbehov fordeles derfor ud på netop de arealer, som rummene med ventilationsvinduer har. Dette er lidt krævende rent modelteknisk, men i denne sammenhæng trivielt og det vil ikke blive omtalt yderligere.

4.2 Variabel luftmængde

Drivkræfterne i naturlig ventilation er vindtryk og termisk opdrift, drevet af temperaturforskelle. Det konstante skift i disse parametre gør det naturlige drivtryk, som er bestemmende for ventilationsmængde til en kompliceret størrelse. I denne undersøgelse drives ventilationen af det negative tryk, som forekommer i toppen af skorstenen som følge af vind og højdeforskel til ventilationsvinduerne. Ventilationsmængden skal herpå variere som funktion af globalt vindtryk og temperaturforskellen mellem ude og inde, som er de tilgængelige parametre i IES VE.

Omskrevet fra afsnit 4.1 kan luftstrømmen ud af skorstenshullet bestemmes ud fra 4.5.

$$q = A_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{T_e} \cdot g \cdot (h_n - z) + C_p \cdot 1/2 \cdot v_{\text{eff}}^2 \right)} \quad (4.5)$$

Hertil er den tidligere tilnærmelse om at luftens densitet er den samme uafhængigt af temperaturen igen benyttet. Det effektive areal for udstømningsåbningen, A_{eff} , svarer til skorstenens lysningsareal (175 cm^2) multipliceret med en udstømningskoefficient for et skorstenshul (ca. 0,5). Hvis et mere effektivt naturlig ventilationssystem ønskes er en optimering af udstømningsen oplagt.

Højdeforskellen mellem udstømningsniveauet, z , og neutralplanet i bygningen, H_n , måles på snittegning til 4,5 m. Herved er der gjort en antagelse om hvor neutralplanet - hvor der hverken er over- eller undertryk som følge af ventilationen - menes at befinde sig. Vindtrykskoefficienten, C_p , kan grundet skorstenens form og placering over taget bestemmes til konstant $-0,6$ for alle vindretninger. Den globale vindhastighed er den målbare parameter i IES VE, som kan styre det resulterende vindtryk i funktionen. I funktionen benyttes den lokale vindhastighed ved taghøjden, v_{ref} , som er fundet via simplificerede CFD-simuleringer af byrummet. Forholdet mellem de to størrelser kan derefter indsættes i funktionen og dette er gennemsnitligt bestemt til 0,28. Den endelige formel for volumenstrømmen for det pågældende system ses af 4.6. Da temperaturene i IES VE måles som grader celsius, men skal indgå i formlen som absolutte temperaturer, indsættes denne relation også.

$$q = 0,0088 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{\frac{t_i - t_e}{t_e + 273 \text{ °C}} \cdot 94,18 \text{ m}^2/\text{s}^2 + 0,047 \cdot v_{\text{global}}^2} \quad (4.6)$$

Til forskel fra udtrykket i 4.4 er bidraget fra U - og g -værdien ved variable luftstrømme nødvendigt til at afhænge af luftstrømmen igennem ventilationsvinduet, som det er vist i figur 4.1. En fitting af datapunkterne, som er vist på figuren, har givet en forskrift for forskellen mellem den reelle og effektive værdi for henholdsvis U og g . Denne anvendes til at variere U - og g -værdierne på baggrund af luftstrømmen.

Det bemærkes at forskrifterne begge er negative andengradspolynomier, hvilket vil sige at funktionsværdierne (U og g) ved en given luftmængde, begynder at aftage. Dette er ikke den rette karakteristik af funktionen for U og g , som nok nærmere vil stagnere ved en bestemt luftstrøm. Forskrifterne vil dog i passende grad være repræsentative for luftmængden, q , mellem 0 og 81 l/s pr. vindue, hvilket er tilstrækkeligt for undersøgelserne. Den maksimale luftstrøm gennem ét vindue er mindre end 51 l/s .

$$\Delta U = -0,0107q^2 + 0,1657q + 0,0043, \quad \text{for } 0 \leq q \leq 8 \quad (4.7)$$

$$\Delta g = -0,0009q^2 + 0,0171q - 0,0001, \quad \text{for } 0 \leq q \leq 8 \quad (4.8)$$

Ved indsættelse af ΔU , Δg samt q i formel 4.4, kan et samlet udtryk for temperaturstigningen ved variabel luftmængde bestemmes.

Da IES VE ikke accepterer formeludtryk på mere end 199 tegn har det været nødvendigt at reducere udtrykket, samt negligere mindre betydende led og faktorer. Der er løbende lavet testberegninger der sikre at ændringerne ikke har for stor betydning af resultatet.

Det samlede udtryk benyttes i IES VE til at bestemme energiforholdene ved brug af ventilationsvinduer, og den reelle temperaturstigning bestemmes af simulerings tekniske årsagere ud fra størrelsen af ventilationstabet 4.9. Dette er både tilfældet for den konstante og variable luftstrøm.

$$Q_v = \frac{n \cdot V \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot \Delta T}{3600} \Rightarrow$$

$$t_{\text{sup}} = t_i + \frac{Q_v \cdot 3600}{n \cdot V \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}}} \quad (4.9)$$

Samlet og reduceret formel for indblæsningstemperaturen benyttet i IES VE. Notationen t_o , t_a og ws er hhv. ude- og indetemperatur og vindhastighed.

$$t_o + ((-1.2 * (t_a - t_o) / (273 + t_o) + 0.2 * \text{sqrt}(94 * (t_a - t_o) / (273 + t_o) + 0.05 * ws * ws)) * (t_a - t_o) - (0.06 * (t_a - t_o) / (273 + t_o) - 0.01 * \text{sqrt}(94 * (t_a - t_o) / (273 + t_o) + 0.05 * ws * ws)) * \text{sol}) / \text{sqrt}(94 * (t_a - t_o) / (273 + t_o) + 0.05 * ws * ws))$$

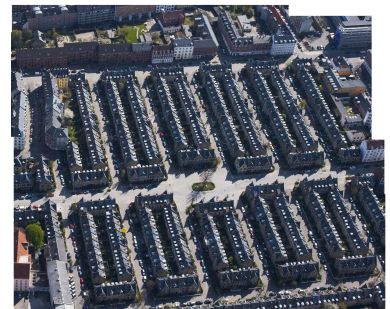
5

Analyse af ventilationsvinduet i skalamæssig kontekst

I dette kapitel vil ventilationsvinduet blive analyseret i gennem fem skalatrin: Site, Structure, Skin, Service og Space plan. Analysen er bygget op på en sådan måde, at skalaniveauet nedjusteres som trinene gennemgås. På den måde bliver ventilationsvinduet belyst på alle planer – fra bymæssig kontekst til komfortmæssig gevinst for brugerne.

Under Site analyseres den bymæssige konteksts betydning for de parametre, som har en virkning på effekten af ventilationsvinduet. Disse vil på site-niveau være især sol og vind. På Structure niveau beskrives parametrene på bygningsniveau, ofte med fokus på konstruktionsmæssige forhold. Disse er rimelig faste for denne analyse, men den mulige praktiske udformning af et naturligt ventilationssystem afhænger heraf, idet bygningsgeometrien skal underbygge den ønskede strategi. Under Skin analyseres effekten af den klimatiske udveksling hovedsagligt med fokus på selve vinduerne, men også klimaskærmens tæthed og isoleringsgrad har betydning. Den energimæssige analyse af ventilationsvinduerne effekt foregår på Service niveau, mens indeklima og komfort belyses under Space Plan.

Referencehuset, der er blevet brugt i undersøgelserne, er øst-vestvendt med gårdfacaden mod øst.



Figur 5.1: Luftfoto af Komponistkvarteret set fra nord

5.1 Site

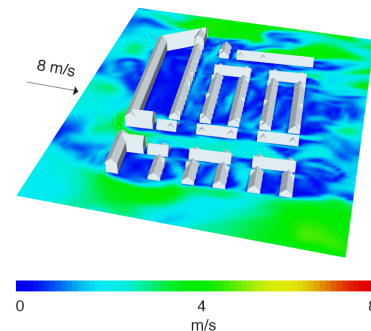
Komponistkvarteret er beliggende i en traditionel københavnsk kontekst med bygninger bestående af fire til fem etager. Selve Komponistkvarteret er dog blot tre etager samt spidsloft, og derfor en anelse lavere end omgivelserne. Husene på de nord-sydvendte gader ligger i forlængelse af hinanden. Afstanden til de modstående huse henover gården og gaden svarer til henholdsvis én og to husdybder (ca. 8 og 16 meter). For at få det bedst mulige billede af hvordan referenceboligens potentiale er i forhold til ventilationsvinduer er der foretaget undersøgelser af vind- og solforhold. Netop vind og sol er parametre, der afhænger af konteksten den optræder i. Dertil kommer at disse to parametre – samt temperaturforhold – er medbestemmende for opvarmning af luftstrømmen i ventilationsvinduet.

5.1.1 Vindforhold

Vindforholdene i kvarteret er medbestemmende for hvordan en naturlig ventilationsstrategi skal udføres. Ved brug af simplificeret CFD (Computational Fluid Dynamics) er der udarbejdet en analyse af vindforholdene i kvarteret.

Analysen er kun baseret på den mest dominerende vindretning/-styrke i området. Denne er bestemt ud fra rapporten, Observeret vindhastighed og -retning i Danmark - med klimanormaler 1961-90 (1999), fra Danmarks Meteorologisk Institut. Målingerne er sket ved Københavns Lufthavn i årene 1989 til 1998 – begge år inklusiv. Den hyppigst forekomne vindretning (8,8 % af året) er omkring vestsydvest med en vindhastighed på 5-11 m/s. Den gennemsnitlige værdi på 8 m/s er benyttet i CFD-modellen.

For området har det vist sig at vindhastighederne i mellembygningerne er meget lave for denne vindhastighed og -retning. At satse på et tilstrækkeligt vindtryk direkte på ventilationsvinduerne, virker derfor ikke som den bedste løsning. Ser man på hastighederne i en højde, der svarer til tagryggen på husene i kvarteret, er vindforholdene stort set konstante i over hele området. Åbninger på et vandret plan vil altid være udsat for sug, når der er en vindpåvirkning. Af denne grund – samt den øgede effekt af naturlig opdrift er det besluttet at benytte skorstenen i husene til afkastskanal for ventilationsløsningen. I IES VE kan der nu uden flere CFD-analyser vælges en vindprofil, der er uafhængig af vindretningen, fordi ventilationsåbningen er placeret højt over grunden og på en vandret flade. I de beskrevne formeler i afsnit 4.2, antages det at vindtrykket på selve vinduesåbningen ikke er medbestemmende for ventilationsmængden. Dette er ikke korrekt i praksis, men en nødvendig tilnærmelse for at simplificere funktionen af det naturlige drevne anlæg. Hvis der forekommer et stort sug ud af vinduerne på gadeniveau kan flowet ende med at være omvendt, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. En overstyrende udsugningsventilator vil kunne afhjælpe dette problem, men vil kræve noget energi. En anden løsning ville være en kontrolleret lukning af ventilationsspalten, såfremt en sensor registrerer en negativ trykpåvirkning. Dette vil i stedet betyde at ventilationen fra tid til anden nedsættes.



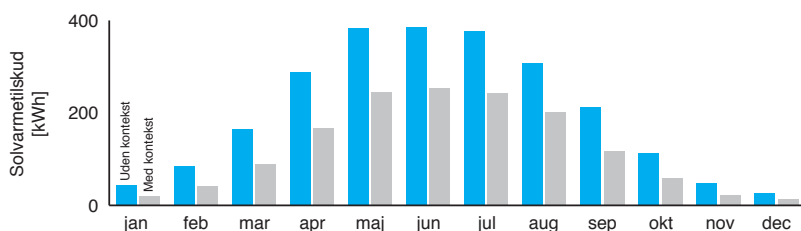
Figur 5.2: Illustration af CFD-output.

5.1.2 Solpotentiale

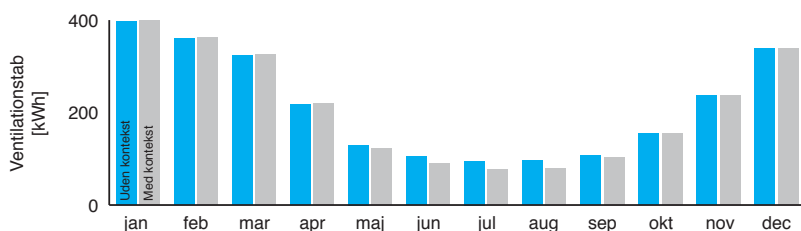
På grund af den relativt tætte bebyggelse vil der være forskelle mellem de enkelte huse og etagers soltilskud. Derudover vil der selvsagt også være en betragtelig forskel i soltilskuddet på ét enkelt hus, alt afhængig af om den bymæssige kontekst er inkluderet eller ej.

Som understående graf (figur 5.3) viser, er der betragtelig forskel på solvarmebidraget i rummene, alt efter om der er tale om en model med eller uden kontekst.

Denne forskel har dog ikke nogen særlig betydning for hvor meget ventilationsluften opvarmes, altså bidraget til den effektive g-værdi. Dette ses af figur 5.4, hvor ventilationstabet med og uden kontekst er angivet på månedsbasis.

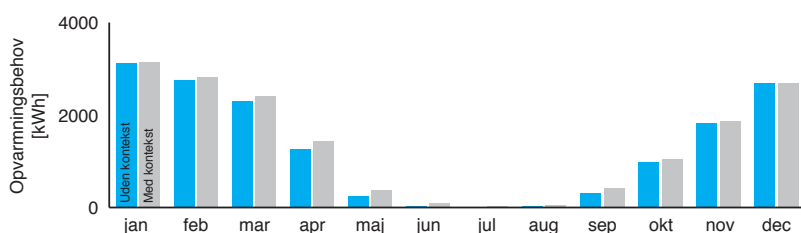


Figur 5.3: Månedelig solvarmetilskud med og uden kontekst.



Figur 5.4: Månedelig ventilationstab med og uden kontekst.

Trods denne tendens ser tallene for opvarmningsbehovet og ventilationstabet stort set ens ud, hvilket viser en uafhængighed af forskellen i soltilskuddet gennem vinduerne. Figur 5.5 viser hvorledes opvarmningsbehovet følger hinanden med og uden kontekst.



Figur 5.5: Månedelig opvarmningsbehov med og uden kontekst.

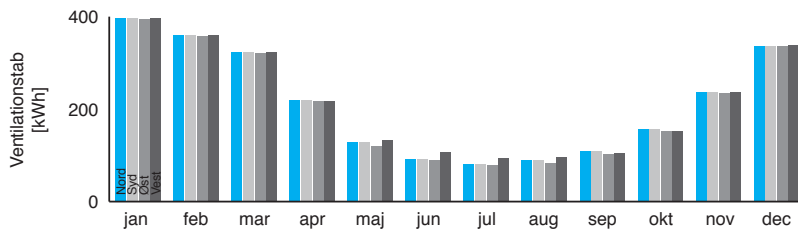
Grunden til at effekten af solpåvirkningen på ventilationsvinduet er så lav, er at solenergien i meget ringe grad afsættes i glasset, og derved opvarmer ventilationsluften. Der er muligheder for at optimere vinduet på en sådan måde, at der sikres en højere solvarmeabsorbering og dermed indblæsningstemperatur. Denne optimering vil dog i praksis være et kompromis med blandt andet dagslyset.

5.1.3 Orientering

Hovedparten af husene ligger som tidligere beskrevet med facaderne øst-vest. Orienteringen af facaden mod gaden varierer dog mellem alle fire verdenshjørner. I figur 5.6 ses variationen af ventilationstabet og dermed effekten på ventilationsvinduet funktion afhængig af orientering.

Det ses af grafen at der ikke den store forskel i værdierne for opvarmningsbehovet og ventilationstabet orienteringerne imellem. På samme måde som med indflydelsen af konteksten, ses det at effekten af ventilationsvinduet ikke er påvirket i særlig grad husenes

orienteringen. Solforhold har for det pågældende vindue derfor ikke den store indflydelse på ventilationsvinduetts effekt på site niveau. Dette skyldes blandt andet at hustypen har facader og vinduer til flere sider, således de samlede effekter blive tæt på ens.



Figur 5.6: Månedelig ventilationstab for hhv. nord, syd, øst og vest.

Da hverken konteksten eller orienteringen har en væsentlig indflydelse på det samlede opvarmningsbehov eller ventilationstab, vil husene uafhængigt af placering have nogenlunde samme effekt af ventilations vinduerne.

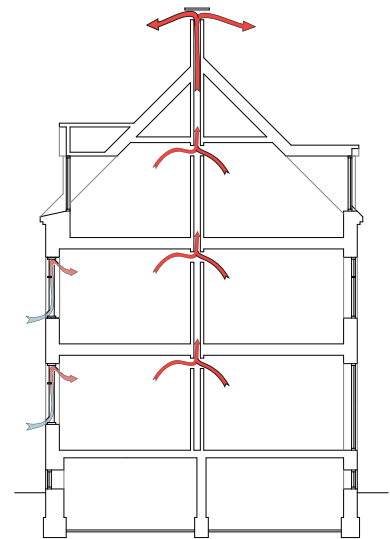
5.2 Structure

Som nævnt tidligere er bebyggelsens udformning benyttet som ramme for hvordan ventilationssystemet er opbygget. Den friske ventilationsluft trækkes gennem ventilationsvinduerne som beskrevet i afsnit 3.2. Udsugningen foregår via den eksisterende skorsten, som er gennemgående for alle etager. Opbygningen er illustreret i figur 5.7.

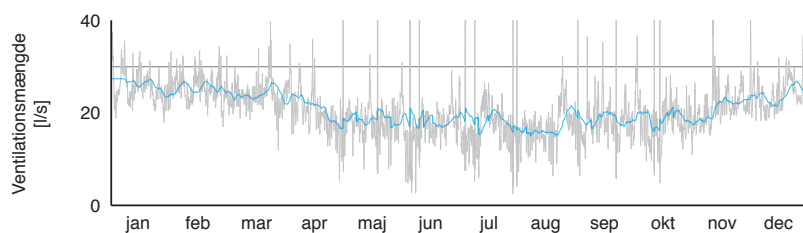
Designet af ventilationssystemet er bestemmende for hvor store ventilationsmængder, der kan opnås. Som beskrevet i kapitel 4 er de styrende parametre for ventilationsmængden vindhastigheden og temperaturforskellen mellem inde og ude. Desto større disse parametre er, jo større ventilationsmængder kan opnås. Samtidig har højdeforskellen en afgørende betydning, som dog ikke varierer.

Figur 5.8 illustrerer timeværdier samt det løbende ugentlige gennemsnit for ventilationsmængderne, der samlet passerer gennem de ni ventilationsvinduer i huset. Den konstante ventilationsmængde, som svarer til hvad der kræves i BR10, eksklusiv infiltration er på 30 l/s, hvilket også er vist.

Det løbende ugentlige gennemsnit svinger mellem 15 og 27 l/s, med medianen 20 l/s. Bygningens geometri og vindforholdene i området er derfor ikke tilstrækkelige for at opretholde den ventilationsmængde, som svarer til det foreskrevne i BR10. Hvis BR10 kravet skal opnås bør der derfor etableres supplerende mekanisk udsugning, som passende kan placeres i skorstenen. En anden mulighed er, som nævnt i afsnit 4.2, at drivtrykkene udnyttes bedre, for eksempel ved en optimeret ventilationshætte på taget. Sådanne produkter er allerede tilgængelige på markedet, men de vil dog være et synligt element i området, hvilket muligvis ikke kan accepteres.



Figur 5.7: Ventilationsprincipper vist på snit.



Figur 5.8: Løbende ugentligt gennemsnit af værdier for variabel luftmængde, samt de variable timeværdier og den konstant luftmængde på 30 l/s.

Ses der på dagene for jævndøgn og solhverv kan sammenhængen mellem vindstyrke, temperaturforskel mellem ude og inde og ventilationsmængden belyses.

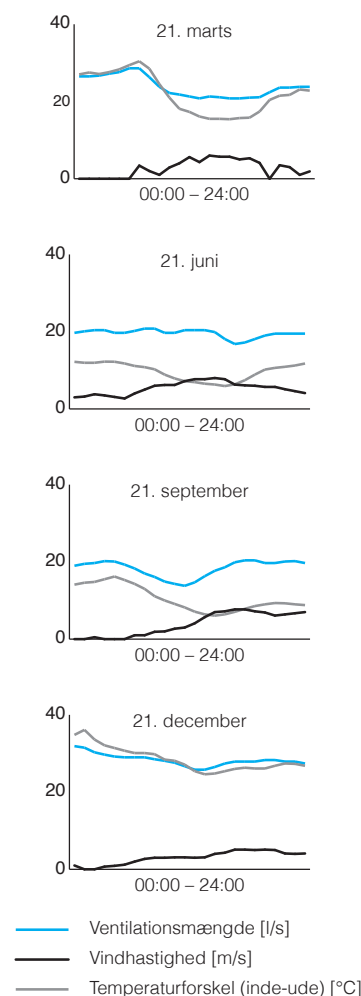
Ud fra figurerne og teorien bag ventilationsmængden kan det siges at ved en aftagende temperaturforskel mellem inde og ude, aftager ventilationsmængden tilsvarende. I de første fem timer af døgnet den 21. marts og september, hvor der ikke er nogen form for vindpåvirkning, ses at temperaturforskellen og ventilationsmængden følges ad. Vindhastigheden har ligeledes en forstærkende effekt på ventilationsmængden. Om eftermiddagene 21. marts, juni og september, kan en stagnering eller sågar forøgelse af ventilationsmængderne ses trods den faldende temperaturforskel. Dette skyldes – som det kan ses ud fra graferne – at vindhastigheden stiger i takt med at temperaturforskellen falder. Tendensen på samtlige af den fire udvalgte dage, viser tilmed at temperaturforskellen mellem inde og ude og vindhastigheden henholdsvis falder og stiger henover dagen. Således er der for alle dagene en øget vindhastighed når temperaturforskellen falder. Da indetemperaturen ligger relativt stabilt over året, kan sammenhængen derfor kobles til udetemperaturen og vindhastigheden, i stedet for temperaturforskellen.

Denne tendens har en generel positiv effekt på ventilationssystemets funktion, da det vil minimere muligheden for at ventilationsmængderne fluktuerer hen over dagen.

Det skal bemærkes at der stadig i visse huse bruges brændeovn eller lignende. Her krævers der andre løsninger som f.eks. brugen af trapperummet med ovenlysvinduer som ventilationsskakt. Dette vil dog ikke vil blive belyst yderligere i denne rapport.

5.3 Skin

Temperaturstigningen af ventilationsmængden afhænger af temperaturforskellen mellem inde og ude, solstrålingen på ruden samt luftstrømningen gennem vinduet, som belyst i kapitel 4. Det er vigtigt at pointere at alle resultater her er i forhold til en renoveret referencet bolig, hvor der er foretaget en fuld renovering af klimaskærmen. Denne reference er nødvendig, idet en utæt bolig ikke kan ventileres på en kontrolleret måde som ventilationsvinduerne kræver. At foretage den indvendige tætning og isolering af boligerne er vanskeligt og krævende. Fokus på dette må ikke negligeres, selvom det ikke behandles i denne rapport. For en nærmere analyse af problematikkerne omkring især efterisolering for boligerne i Komponistkvarteret



Figur 5.9: Døgnvariationer af ventilationsmængden, temperaturforskel mellem inde og ude samt vindhastighed.

henvises blandt andet til tidligere omtalte diplombachelorprojekt af Kevin Tran og Søren Frisch Larsen.

Som det allerede er set i figurerne i afsnit 5.1.2 har solstrålingen meget lille indflydelse på hvad opvarmningsbehovet samt ventilationstabet for det samlede referencehus er. I figur 5.10 er temperaturstigningen af tilluften samt de tre nævnte parametre afbilledet. Figurerne illustrerer jævndøgn og solhverv som det også var tilfældet i figur 5.9.

Tendensen for indflydelsen af solindstrålingen for opvarmningen af ventilationsluften på årsbasis ses derfor gentaget på døgnbasis. Selv en på solrig dag som 21. juni ses der ingen reel påvirkning af ventilationsluftens temperatur. Denne dag er soltilskuddet gennem ét vindue knap 300 watt, når det er på sit højeste. Den maksimale værdi der forekommer på året er godt 400 watt.

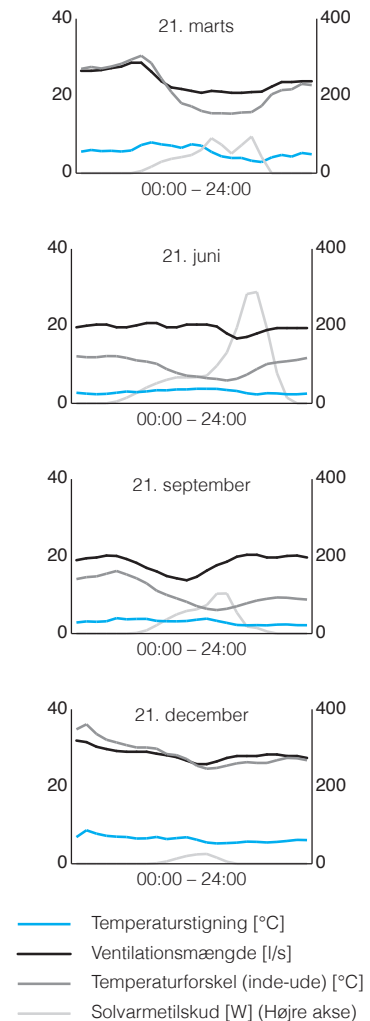
Som teorien for den effektive U-værdi beskriver, bør en øget ventilationsmængde og temperaturforskel mellem inde og ude give anledning til en større energioverførsel til ventilationsluften. Det er dog vigtigt at bemærke at dette ikke fører til en højere temperaturstigning af ventilationsluften. Dette skyldes at den tilførte energimængde fordeles på større en luftmængde. Derfor vil en reduceret luftmængde føre til øget temperaturstigning af ventilationsluften og en reduceret temperaturforskel føre til reduceret temperaturstigning. På grafen for 21. marts ses at det at der i løbet af formiddagen sker et fald i ventilationsmængden og temperaturforskellen mellem inde og ude. Da disse to parametre modarbejder hinanden holdes temperaturstigningen mere eller mindre konstant. Ved middagstid stopper faldet af ventilationsmængden, mens temperaturstigningen stadig mindskes, hvilket fører til en reduktion af temperaturstigningen. Tendensen ses også for 21. september.

For perioden omkring klokken 12, den 21. juni ses svage tendenser på det modsatte. Ventilationsmængden er konstant, temperaturforskellen faldende og temperaturstigningen svagt stigende. Dette kan være solstrålingens effekt der giver sig til udtryk netop her om sommeren.

5.4 Service

Ventilationsvinduet der er benyttet i undersøgelserne er drevet på to forskellige måder. Første metode er baseret på en konstant tilført luftmængde gennem ventilationsvinduerne grundet et styret mekanisk undertryk. Anden metode er udelukkende drevet af vindsuget på skorstenen, der benyttes som udsugningskanal, samt den naturlige opdrift i bygningen.

Traditionelle vinduer med friskluftsventil og konstant luftmængde svarer til det tilfælde, som er beskrevet i afsnit 2.2 med Be10 beregninger for et efterisoleret og tætnet hus, kaldet fuld klimaskærmsrenovering. Benyttes en ventilator til at opretholde denne konstante ventilationsmængde, bruger denne selvfølgelig noget strøm. Dette ekstra energiforbrug medregnes ikke her, men vurderes sidenhen på årsbasis.



Figur 5.10: Døgnvariationer af temperaturstigning af ventilationsluft, ventilationsmængde, temperaturforskel mellem inde og ude og solvarmetilskud. Solvarmetilskuddet aflæses på akse til højre.

Som tidligere omtalt er volumenstrømmen generelt lavere for den variable luftmængde, hvilket resulterer i et lavere opvarmningsbehov. Grafen viser forskellen i energiforbruget med variabel luftmængde kontra fast luftmængde, ved brug af friskluftventiler i nye vinduer (figur 5.11). Den sparede energi vil være på bekostning af indeklimaet, og det kan derfor ikke anbefales at dette gøres uden en nærmere analyse af indeklimakonsekvensen ved den nedsatte luftmængde.

I figur 5.12 ses den samlede besparelse ved brug af ventilationsvinduer i stedet almindelige vinduer, når den faste luftmængde benyttes. Energiforbruget til mekanisk udsugning er ikke medregnet.

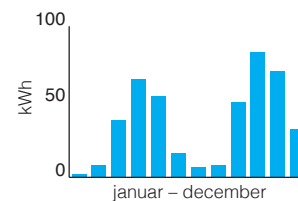
Det ses af grafen at energibesparelserne er størst især i forårs- og efterårsmånederne. Selve opvarmningen af ventilationsluften er størst om vinteren, men det er også i de kolde vintermåneder at effekten af de bedre isolerende traditionelle vinduer kommer til udtryk. For netop den benyttede luftmængde er besparelse ved opvarmning af ventilationsluften næsten det samme som det forøgede transmissions-tab. I forårs- og eftersårsmånederne er der derimod en god effekt af luftopvarmningen, og den generelt lavere U-værdi for det traditionelle vindue har ikke længere så stor indflydelse. Hvis det var muligt at konstruere ventilationsvinduet med en lige så god U-værdi som for referencevinduet, ville besparelse teoretisk have været størst om vinteren. Ventilationsvinduet har desuden en bedre reel g-værdi og udnytter derfor den samlede solvarme bedre.

I figur 5.13 ses den tilsvarende besparelse for ventilationssystemet med varierende luftmængde. Denne bør især sammenholdes med den sæsonmæssige variation i volumenstrømmen i figur 5.8.

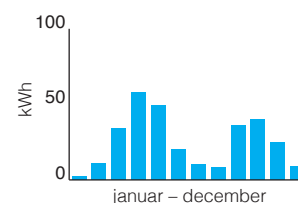
Ved ændrede og især nedsatte volumenstrømme bliver effekten af ventilationsvinduet større, og det ses at der er store besparelser at hente også om vinteren. Sammenhængen ses også allerede af datagrundlaget fra Thermal Performance of Air Flow Windows (Raffnsøe 2007) og resultaterne viser tydeligt potentialet ved at tilpasse ventilationsmængden til især de sæsonmæssige klimatiske variationer. Opvarmningen vil derved blive klart forbedret om vinteren hvis det kun er små mængder luft der passerer igennem vinduet og dermed får en højere temperaturstigning. Omvendt ses det for maj måned at besparelserne er mindre end ved konstant luftstrøm. Luftstrømmen er derfor her for lav til at det fulde besparelspotentiale udnyttes.

I perioden fra april til august er besparelserne mere eller mindre identiske, hvorimod energibesparelserne i månederne omkring opvarmningssæsonen er markant lavere for ventilationsvinduerne med konstant luftstrøm. Ser man nærmere på årets første tre måneder, findes årsagen i den mindre ventilationsmængden på 25 l/s, hvor den konstante ventilationsmængde er 30 l/s. Kombineret med periodens lave temperaturer – og derved lave indblæsningstemperaturer – giver dette forskellen på energibesparelserne. I de varmere perioder hvor indblæsningstemperaturen er højere, giver forskellen i ventilationsmængderne ikke det store udslag.

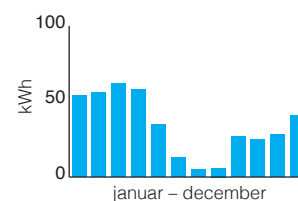
For den særligt varme sommerperiode vil et ventilationsvindue i praksis kunne ventilere luftspalten, for på den måde at øge varme-



Figur 5.11: Forskel i energiforbrug ved friskluftventiler med variabel luftmængde kontra fast luftmængde.



Figur 5.12: Energibesparelse ved ventilationsvinduer med konstant luftmængde kontra friskluftventiler med konstant luftmængde.



Figur 5.13: Energibesparelse ved ventilationsvinduer med variabel luftmængde kontra friskluftventiler med variabel luftmængde.

transmissionen ud gennem vinduet. Denne funktion er ikke implementeret i simuleringsmodellen. Dette betyder at energibesparelsen i de varmeste perioder ikke er en reel besparelse, da ventilationsvinduerne blot vil give anledning til overophedning. I figur 5.14 ses andelen af timer i de pågældende måned, hvor der er opvarmningsbehov og indetemperaturer på mere end 26 grader. For at give en billede af energibesparelserne på årsbasis, er det med baggrund i figur 5.14, valgt at ekskludere besparelserne i månederne juni, juli og august. Disse tre måneder er der et minimalt opvarmningsbehov samtidig med at temperaturene i mere en 30 % af tiden ligger over 26 grader.

Det skal igen understreges at resultaterne for den variable og konstante luftmængde i tabel 5.1, dels er forårsaget af forskellen i opvarmning af ventilationsluften og dels på grund af forskellen i ventilationsmængden.

Besparelse v. ventilationsvindue med:	kWh/år	kWh/m ² år
Variabel luftmængde	990	6,6
Konstant luftmængde	740	4,9

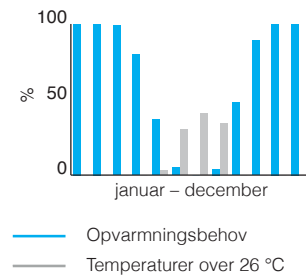
Energimæssigt kan forskellen ved at se på hvor meget de to strategier hver især bidrager til opvarmningen pr. luftvolumen. Denne effekt (kJ/m³) bestemmes som vist i formel 5.1:

$$\text{Ventilationseffekt} = \frac{\frac{\text{Årlig besparelse}}{8760 \text{ timer}}}{\text{Gennemsnitlig luftmængde}} \quad (5.1)$$

Ved udregning af ventilationseffekten for variabel og konstant luftmængde ses at effekten for variabel luftmængde er godt 90 % højere end for konstant. Effekten for de to er henholdsvis 5,4 og 2,8 kJ/m³. Forskellen skyldes som omtalt hovedsagligt at der er tale om forskellige ventilationsmængder. Den hensigtsmæssige løsning, hvis der ikke ønskes samlede lavere luftmængder og dermed et muligt forringet indeklima, er at man har et passende antal vinduer i huset til at varetage ventilationsmængden. Havde et større antal vinduer være anvendt i denne undersøgelse og dermed en lavere volumenstrøm pr. vindue, så ville besparelsen have været større især for den konstante luftstrøm.

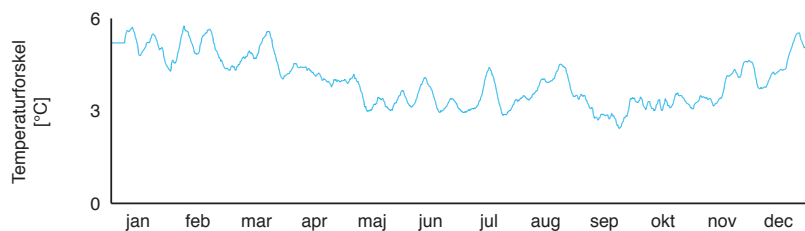
5.5 Space Plan

Under dette afsnit vil de komfortmæssige parametre blive behandlet. Hovedpointerne ved brug af ventilationsvinduer er, at reducere energiforbruget til opvarmning, samt øge komforten ved naturlig ventilation. Af denne grund er der foretaget en analyse af trækgenerne samt det ekstra opvarmningsbehov, der vil være på grund af disse. I figur 5.15 kan forskellen mellem temperaturen af indblæsningsluften fra ventilationsvinduer og udeluften ses for året. Værdierne er beregnede løbende gennemsnit for en uge.



Figur 5.14: Andel af måned med opvarmningsbehov og temperaturer over 26 °C

Tabel 5.1: Energimæssig besparelse (ekskl. energiforbrug til mekanisk udsug ved konstant luftmængde) ved brug af ventilationsvinduer i forhold til almindelige vinduer og friskluftsventiler



Figur 5.15: Løbende ugentligt gennemsnit af temperaturforkel mellem ventilationsluft og udeluft.

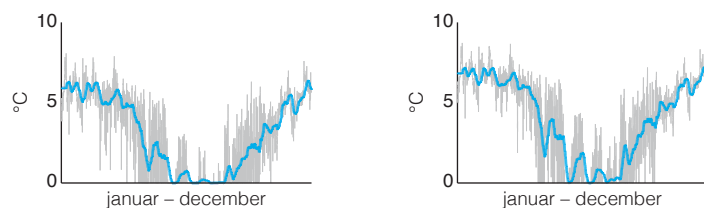
Med en variation på grafen mellem 2, 4 og 5, 6 grader og et snit på 4,0 grader mellem ude- og indblæsningsluften stemmer dette godt overens med undersøgelsen fra Hansen Group (DesignGroup 2002).

For at vurdere hvad denne temperaturstigning har af betydning for boligens energiforbrug, er risikoen for træk over året undersøgt. Den mængde varme, der yderligere kræves for at opnå ligeværdige komfortforhold – i forhold til træk – mellem henholdsvis ventilationsvinduer og friskluftsventiler er ligeledes bestemt. I figur 5.16 ses den supplerende temperaturstigning, for opnåelse en trækrisikoen på 25 %. Dette svarer til hvad der maksimalt accepteres i indeklimaklasse III og er et udtryk for hvor mange der statistisk set vil føle ubehag ved dette indeklimaforhold. Det svarer til at man justerer indeklimaforholdene til at hver fjerde person - men ikke flere - føler ubehag. Antagelsen er en rimelig konservativ vurdering af det ekstra energiforbrug, det for mange mennesker bruges for at de kan have deres acceptable indeklima.

Temperaturstigningen af rumtemperaturen der kræves for at opnå en acceptabel risiko for træk, er bestemt ud fra formel 5.2 (Awbi 2003).

$$DR = (34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62}(3,14 + 0,37 \cdot v \cdot TU) \quad (5.2)$$

Risikoen for træk er bestemt ud fra lufthastigheden, v , og rumtemperaturen, t_a . Lufthastigheden er bestemt ud fra densiteten af indblæsningsluften. Rumtemperaturen i punktet hvor trækrisikoen bestemmes er ikke direkte påvirket af indblæsningstemperaturen. Luftstrømmens temperatur antages derfor at være ens med rumtemperaturen når denne rammer punktet, der undersøges.



Figur 5.16: Nødvendig rumtemperaturstigning (løbende ugentligt gennemsnit og timeværdier) for at opnå en trækrisiko der ikke overstiger 25 % for hhv. variabel og konstant luftmængde.

Figur 5.16 viser timeværdierne samt det løbende gennemsnit for en uge over de nødvendige supplerende temperaturstigninger. I tilfælde hvor timeværdierne for den nødvendige temperaturstigning er nul, er trækrisikoen mindre end 25 %. Graferne gælder for henholdsvis ventilationsvinduer og friskluftsventiler.

Ved en optælling af antallet af timer, hvor der ikke behøves supplerende rumopvarmning for at sænke trækrisikoen, kan fordelene

ved ventilationsvinduer ses. Tabel 5.2 viser at andelen af året hvor sandsynligheden for trækproblemer er mindre end 25 % tydeligvis er til ventilationsvinduets fordel.

Ventilationsvinduer	Friskluftsventiler
2522 timer	1585 timer
29 %	18 %

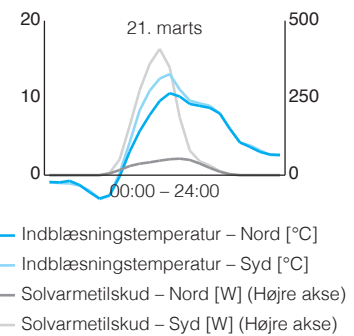
Tabel 5.2: Andel af året med trækrisiko på mindre end 25 %

Over året er forskellen mellem den nødvendige temperaturstigning for friskluftsventiler og ventilationsvinduer beregnet til én grad. Denne forskel er relativt stabil for forskellige trækrisici, altså om vurderingskriteriet havde været f.eks. indeklimaklasse II i stedet for III. Som tommelfingerregel kan en temperaturreduktion på én grad skabe en besparelse på rumopvarmningsbehovet på 6 %, hvilket svarer til 372 kWh/år for referencehuset i Komponistkvarteret (Bosch Termoteknik 2013). Denne besparelse er dog kun hæftet på hvad der spares for at minimere risikoen for træk. Besparelsen på det resterende opvarmningsbehov, beskrevet i afsnit 5.4, er ikke inkluderet i værdien.

Det er ligeledes undersøgt hvorvidt rummets orientering har indflydelse på opvarmning af ventilationsluften. Figur 5.17 viser grafen for indblæsningsluftens temperaturer for et nordvendt og sydvendt rum med tilhørende soltilskud.

Grafen er for 21. marts, som er en af de mest solrige forårsdage og dermed tidspunktet hvor maksimal solenergi rammer vinduerne mod syd i forhold til nord. Dette forhold gør forskellen på de to indblæsningstemperaturer interessant. Mens hovedparten af stigningen sker fordi udetemperaturen generelt stiger i løbet af dagen, så er der alligevel en temperaturforskel på op mod 3 grader for indblæsningstemperaturen i sydrummet som i nordrummet. Det kunne under Site konkluderes at orienteringen ikke havde stor betydning i samlet årlig energimæssig sammenhæng. Samtidig kunne det konkluderes hvorvidt den bymæssige kontekst reducerer soltilskuddet ej heller har så stor indflydelse på virkningen af ventilationsvinduerne. Det kan derfor sammenfattes at et kraftigst soltilskud har en indflydelse på temperaturstigningen i de enkelte rum, men aldrig af betydning som får indflydelse på det samlede energiregnskab. Der vil dog på solrige dage kunne mærkes forskel på ventilationsluften hvis man opholder sig i det solbeskinne rum i stedet for et rum i skygge. Dette er vigtigt fordi mange ventilationsvinduer ikke blot vurderes på rumniveau, men komponentniveau. Hvis ventilationsvinduer ikke indsættes i den fulde sammenhæng med hele bygningen, så kan solparameterens indflydelse let blive overvurderet.

Forskellen optræder hovedsageligt midt på dagen og der vil derfor ikke altid være beboere tilstede til at opleve denne forskel.



Figur 5.17: Døgnvariation af indblæsningstemperatur og solstråling på rumniveau til hhv. nord og syd.

6

Diskussion og konklusion af ventilationsvinduet

6.1 Implementering og virkning

I det følgende vurderes og perspektiveres hvorledes de opnåede resultater er troværdige og hvad dette betyder for boligernes generelle potentialer for energibesparelser.

6.1.1 Sammenligning med referencelitteratur

Opbygningen af ventilationsvinduet i IES VE er sket med baggrund i datakurver fra tidligere omtalte kandidatspecialerapport (Raffnsøe 2007). Der i den rapport også resultatkurver for ventilationsvinduet's virkning på opvarmningen i luften, hvilket er udarbejdet med software langt bedre egnet hertil end IES VE. Tilgængæld kan denne software sjældent i samme grad spille sammen med det øvrige indeklima, hvilket er en af årsagerne til hvorfor implementeringen i dynamisk simulering er vigtig.

Der er i rapporten (Raffnsøe 2007) opstillet værdier for opvarmningen af ventilationsluften som funktion af luftstrømmen og soltilskuddet. For en luftmængde på 2,3 l/s per vindue kan der aflæses temperaturstigninger på henholdsvis 4, 12 og 17 grader for 0 W, 300 W og 500 W solindfald på vinduet. På en dag som 21. marts (se evt. figur 5.17 under afsnit 5.5) ses lignende solindfald. I løbet af dagen kan observeres forskellige stigninger som 5 og 3 grader (for 0 W), 8 og 5 grader (for 300 W) og omkring 8 grader for 500-600 W. Forskellen skyldes at udetemperaturen stiger i løbet af den solrige dag, hvorved temperaturstigningen i ventilationsluften bliver væsentlig mindre end under stationære forhold, som det forventes benyttet i rapporten af Lau Raffnsøe. De store angivne temperaturstigninger er derfor mulige under bestemte klimaforhold, som f.eks 0 grader ude, 20 grader inde og et solindfald på 500 W/vindue, men disse er forhold som ikke reelt forekommer.

Sagsrapport SR-05-01 ved BYG DTU (Tommerup 2005) beskæftiger sig også med energibesparelser ved ventilationsvinduer, nærmere bestemt det tidligere produkt fra P.C. Vinduer og Døre. Rapporten er i høj grad relevant, da producenter ofte refererer til denne undersøgelse, når de omtaler ventilationsvinduers energimæssige egenskaber. Den mest anvendte værdi er besparelsen ved variabel luftstrøm gennem

vinduet. Den variable luftstrøm fungerer efter en funktion, der øger luftstrømmen lineært fra 2,21/s pr. vindue til 6,91/s når den opnåelige indblæsningstemperatur er over 13,5 °C.

Den herværende undersøgelse viser blandt andet at denne indblæsningstemperatur ikke opnås i en stor del af opvarmningssæsonen. Idet der ved brug af referencevinduet i (Tommerup 2005) ventileres med 5,61/s pr. vinduer antages det at rummet tilknyttet det analyserede ventilationsvindue ofte er underventileret. Dette har en stor andel i den påståede energibesparelse. Det stemmer samtidig overens med konklusionerne fra denne rapport om at energibesparelserne er langt højere, hvis det er muligt at ventilere med langt mindre luftstrømme gennem hvert vindue end hvad man normalt burde.

For en konstant luftstrøm på 5,61/s opnås der ifølge (Tommerup 2005) en energibesparelse på mellem 77 og 87 kWh/m² vindue i forhold til et lignende vindue med friskluftsventiler. I den herværende undersøgelse er der anvendt en konstant luftstrøm på 3,31/s, men der er desuden inkluderet infiltration i ventilationen af bygningen. Opgjort per vindue er den samlede luftstrøm derfor 5,01/s og undersøgelserne er derfor sammenlignelige. For den konstante luftmængde er der beregnet en besparelse på 82 kWh/m² vindue (i alt 1115 KWh for hele bygningen).

En vurdering af energibesparelserne for ventilationvinduet gives i det følgende. Det bemærkes at valget af referencer i høj grad har betydning for hvilke energibesparelser, undersøgelserne resulterer i. Der er netop af den grund fra Teknologisk Institut afkrævet et såkaldt referencevindue af alle vinduesproducenter. Ventilationsvinduet skal dog også vurderes på sit bidrag til ventilationstabet i bygningen og ikke kunne til denne årlige varmebalance som referencevinduet beskæftiger sig med. Der bør derfor vælges en fælles konsensus om hvordan dette kan blive en del af vurderingen, hvis ventilationsvinduet skal kunne vurderes som andre vinduer.

6.1.2 *Potentialer for energibesparelse*

Gennem analysen af ventilationsvinduerne i Komponistkvarteret er der lagt vægt på energibesparelser og komfort, baseret på detaljerede dynamiske simuleringer i IES VE. I afsnit 5.4 er den årlige energibesparelse til opvarmning beskrevet og analyseret. At vurdere besparelserne fra IES VE i forhold til de indledende Be₁₀ beregninger er ikke nødvendigvis retvisende, da beregningsmetoderne adskiller sig fundamentalt fra hindanden. For alligevel at få en idé om hvor meget besparelsen af ventilationsvinduerne udgør at boligens beregnede energiforbrug, må sammenligningen ske på ligeværdige betingelser.

Beregningen af ventilationstabet i Be₁₀ sker på baggrund af en konstant luftmængde, typisk svarende til BR₁₀-kravene. Besparelserne ved brugen af ventilationsvinduer bør derfor vurderes ud fra resultaterne med konstant luftmængde. Energiforbruget til rumopvarmning i Be₁₀ er bestemt ud fra en fastsat temperatur, og tager ikke hensyn til eventuelle trækproblemer, eller andet der kan medvirke til,

at opvarmningsbehovet øges. Herunder tages der dog også hensyn til dette, for at synliggøre potentialet.

Varmebehovet i referencehuset med fuld klimaskærmsrenovering er i Be₁₀ beregnet til 10 240 kWh/år eller 68 kWh/m² år, hvoraf 4045 kWh/år går til varmt brugsvand og 6195 kWh/år til rumopvarmning. Ved etablering af ventilationsvinduer og konstant udsug i stedet for almindelige vinduer og friskluftsventiler vil besparelsen ligge på knap 12 %. Dertil kommer den besparelse, der vil være på grund af mindre trækgener ved ventilationsvinduerne som beskrevet i afsnit 5.5. Besparelsen ved dette ligger på omtrent 6 % af rumopvarmningen. Når der medtages det ekstra varmebehov for at reducere trækgener sammen med den beregnede besparelse fra Be₁₀, vil den samlede besparelse på energiforbruget til rumopvarmning være omkring 18 %. Dette svarer til en årlig reduktion af varmekonsumet på 1115 kWh. I tillæg hertil er det beregnede elforbrug til en konstant kørende udsugningsventilator ca. 51 kWh/år. Denne værdi vil dog reduceres betydeligt, hvis ventilatoren kun anvendes som supplement til de naturlige drivkræfter for ventilationssystemet, forventeligt til omkring 13 kWh/år. Alternativt kan udsuget på skorstenen optimeres som det kort er nævnt i afsnittet Structures, hvilket bør kunne øge ventilationsmængden så årsgennemsnittet ligger på linje med BR10 kravene.

Ventilationssystem	Beregnet energiforbrug [kWh/m ² år]	Beregnet energibesparelse inkl. eltillæg [kWh/år]	Energibesparelse i % på rumopvarmning
Energivinduer med ventiler (reference)	68	–	–
Ventilationsvinduer	60	1077	18
Mekanisk ventilation	54	1823	33

Tabel 6.1: Energibesparelspotentialerne for ventilationsløsninger.

Besparelser ved installation af et moderne energieffektivt mekanisk ventilationsanlæg er som tidligere nævnt kun beregnet på niveau med den øvrige analyse af energirenoveringstiltag i Be₁₀, og ikke så detaljeret som for ventilationsvinduer. Anlægget forudsættes at have en SFP svarende til 2020-kravene i BR10 (800 J/m³ luft), da der allerede findes mulige løsninger for dette til boliger. Det ekstra elforbrug til drift af det mekaniske anlæg er beregnet til ca. 90 kWh/år, mens varmebesparelsen er på 2048 kWh/år, svarende til 33 % af rumopvarmningsbehovet. Energibesparelspotentialerne for ventilationsløsningerne ses af tabel 6.1.

6.2 *Alternativer og økonomi*

Selvom der er væsentlige energibesparelser og komfortforbedringer forbundet ved installere ventilationsvinduer, så vil et ventilationsvinduet ikke opnå de samme besparelser på varmeregningen som et mekanisk ventilationsanlæg. Det er dog bestemt også besværlig at installere et balanceret mekanisk system i de pågældende huse og der kan være betydelige ekstraudgifter samt kompromiser for den indvendige arealudnyttelse forbundet hermed. Hertil kommer tilvænning til at have et klimasystem i boligen, hvilket for nogle kan være helt umuligt med den larm og tekniske styring som følger med. Desuden kommer skift af filtre og anden vedligeholdelse.

Et ventilationsvindue skal også vedligeholdes, men dette foregår langt hen ad vejen på samme måde som for et traditionelt vindue. Desuden foregår klimaudvekslingen på en måde som er til at føle på og det er af den vej lettere at gøre sig bekendt med sit ventilationssystem og kontrollere det efter sit personlige behov. Det er dog et vigtigt element at ventilationsvinduer er dyrere end selv de mest moderne lavenergivinduer (Tommerup 2010).

6.2.1 *Udnyttelse af varmeenergien i ventilationsluften*

Den store varmebesparelse for et mekanisk ventilationsanlæg ligger som nævnt i den høje udnyttelse af varmeenergien i udsugningsluften. Denne udnyttes slet ikke i et normalt naturligt ventilationssystem, om det så inkluderer friskluftsventiler i forhold til ventilationsvinduer eller benytter naturlige drivkræfter i stedet for en ventilator. Det søges i nogle bygninger at udnytte denne varme ved at benytte den til opvarmning af brugsvand via en varmepumpe. Dette princip er velkendt og har været benyttet i årevis. Det er nemmere at installere end at skulle føre nye indblæsningskanaler som vil være nødvendigt for et almindelig varmegenvindingsanlæg. Varmepumpeinstallationen er dog en væsentlig udgift, som samtidig benytter elektricitet for at gennemføre opvarmningsprocessen. Den har samtidig ligesom mange andre tekniske installationer en levetid på omkring 15-20 år før den skal skiftes. Hvor der som i Komponistkvarteret er fjernvarme tilstede, som allerede er en del af en samlet varmeinstallation er denne løsning derfor hverken en energimæssig eller økonomisk rentabel løsning.

Et traditionelt balanceret mekanisk ventilationssystem vil for boliger som i Komponistkvarteret benytte et kompakt aggregat med modstrømsveksler og der findes mange gode, moderne løsninger til dette. Aggregatet vil kunne placeres på spidsloftet eller i kælderen. Trapperummet vil være oplagt at benytte som ventilationsskakt, men kanalføring vil her tage en del af pladsen. Desuden vil kanalføring ind til rummene selv næsten nødvendigvis være synlig, da boligerne ikke har nedhængte lofter. Kanalføring vil også kunne foregå i gulv, men dette vil kun give mening hvis en gulvudskiftning alligevel er planlagt. Det er også vigtigt se på rumdistributionen af indblæsningsluften, hvis dette skal kunne foregå uden komfortgener. Mange boliganlæg

har ikke eftervarmefflade, hvilket gør at indblæsningsluften i nogle perioder er koldere end hvad de fleste ønsker sig. Samtidig kan ophold tæt på indblæsningsarmaturerne give træk. Der findes adskillelige eksempler på at dette negligeres, hvilket kan gøre installationen af ventilationsanlægget både en dyr og generende affære.

Det mest energiøkonomiske alternativ for boliger er ofte en kombination af mekanisk varmegenvinding i kolde perioder og naturlig ventilation i perioder, hvor udeluften ikke er så meget koldere end den ønskede indetemperatur. Denne såkaldte hybridventilationsløsning vil fungere både for vinduer med friskluftsventiler og ventilationsvinduer. Ventilationsvinduer vil kunne forlænge sæsonen med naturlig ventilation, men da en hvis del af energibesparelserne som vist i 5.4 ligger om vinteren, vil der ikke være en del af den energimæssig gevinst ved at benytte ventilationsvinduer frem for almindelige vinduer blive udlynet.

Der er udført flere forsøg med varmegenvinding på naturlig ventilation. Problemet er hovedsageligt konstruktionen af selve varmeveksleren, som ikke må tilføre noget synderligt tryktab, hvis de naturlige kræfter fortsat skal kunne drive systemet. Dernæst er problemet at den genvundne varme skal kunne transporteres til friskluftsindtagene, hvilket er et problem når disse som her er en masse vinduer. Hvis varmevekslingen foregår som luft til luft, så kan der opnås en høj grad af varmeoverførsel, men transporten er både energimæssigt og pladsmæssigt krævende. Benyttes vand eller en anden væske som medium kan ofte kun en mindre del af varmen overføres, men transporten kan til gengæld foregå langt mere effektivt.

Hvis der anvendes en ventilator til at sikre drivtrykkene i det naturlige ventilationssystem er en yderligere energioptimering bedst mulig med en væskekoblet varmeveksler. Denne vil virke både for systemet med friskluftventiler og ventilationsvinduer, men da ventilationsluften allerede til et vist niveau forvarmes i ventilationsvinduerne vil dette energimæssigt være et bedre alternativ. Det vil dog være et eksperimentelt system, hvor virkningen ikke på forhånd kan bestemmes.

Ventilationssystemer, der involvere ventilationsvinduer er ikke et reelt energiøkonomisk alternativ til et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding, men har potentiale til gennem optimering og kombination at være den bedste naturlige drevne løsning.

6.2.2 Nuværdibetragtninger for ventilationsløsninger

Nuværdibetragtning er en af mulighederne for økonomisk vurdering af et energitiltags rentabilitet. Dette gøres ved at opstille totalomkostningerne og sammenligne størrelsen med en referenceløsnings totalomkostninger. Metoden kan benyttes til at vurdere både rentabilitet af alternative enkelttiltag og rentabilitet af samlede løsninger. (Energirigtigtbyggeri.dk 2007)

I dette tilfælde vurderes energibesparelse ved etablering af de to alternative ventilationsløsninger naturlig ventilation med ventilationsvinduer og mekanisk ventilation med varmegenvinding. Referencen

for disse to er moderne energiruder med friskluftsventiler. Som tidligere beskrevet er fokus på ventilationsløsningen først fornuftigt det øjeblik at boligerne er tilstrækkelig tætte til at de ikke som nu mest af alt ventileres ukontrollérbart gennem utætheder. Tætningsarbejdet forbindes hovedsageligt med en klimaskærmsrenovering, hvor man samtidig efterisolerer og skifter vinduer. Investeringsbehovet er derfor i denne beregning merudgiften til ventilationsvinduer i forhold til referencens lavenergivinduer samt udgiften til etablering af et fuldt mekanisk ventilationsanlæg. I mange af boligernes nuværende form vil der derfor indledende skulle investeres i efterisolering, tætning og nye vinduer (af den ene eller anden slags) før rentabilitetsbetragtningen her kommer i spil.

Det er muligt at opnå en tæt bolig uden efterisolering, men blot ved tætningsarbejde og udskiftning af vinduer som anslået tidligere. Det vurderes at nuværdibetragtninger også vil være retvisende for dette tilfælde. Utæthederne i de ældre vinduerne skyldes mest af alt utætte lister og mange i disse kan kommes til livs ved fagligt kvalificeret arbejde med kun dette element. Det er et muligt scenarie at tætte boligen og udskifte glaslister (uden at skifte vinduer) samt etablere mekanisk ventilation med varmegenvinding for derved at spare på energien. Dette scenarie vil ændre investeringsbehovet for referencen og derved have stor indflydelse på resultatet af nuværdibetragtningerne.

Nuværdifaktoren af energitiltagene beregnes ud fra formel 6.1.

$$f(n, r) = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (6.1)$$

Hvor n er levetiden og r realrenten fratrukket energiprisudviklingen. Begge forklares i det følgende.

Til brug for nuværdiberegningen er referencens og de to alternativer udgifter til energiforbrug brugt som driftsomkostninger. Der vil som tidligere nævnt være yderligere driftsomkostninger, som dog ikke medtages i betragtningen. Til varmeudgiften er anvendt HOFORs energipris 2013 svarende til 0,70 kr/kWh. Til eludgiften for ventilationsanlægget er der brugt Dong Energys pris for privatkunder 2013 0,43 kr/kWh i elpris og 1,62 kr/kWh i transportafgift, altså samlet 2,05 kr/kWh. Udgifterne fremgår af tabel 6.2.

Nuværdien af energibesparelsen vurderes over 30 år, ($n = 30$) da dette er normal økonomisk levetid for de fleste lån, der optages i boliger. Vinduer har normalt en teknisk levetid på 30 år, så dette svarer til den økonomiske levetid. Ventilationsanlægget har dog kun en teknisk levetid på 20 år og der oprindelige investering i dette bliver 50 % større over 30 år. Nuværdien af energiudgiften fremskrives og tillægges investeringsbehovet, hvorved den samlede pris efter 30 år findes, hvilket ses i tabel 6.2. Til prisudvikling i energipriser er EU's standardscenarie anvendt. Anlægsudgifterne er anslået ud fra (Tommerup 2010).

Ventilationssystem	Nuværdifaktor [-]	Årligt energiudgift [kr]	Invistering [kr]	Nuværdi [kr]	Besparelse over 30 år si[kr]
Energivinduer med ventiler (reference)	24,4	7168	0	174611	0
Ventilationsvinduer	24,4	6425	23205	179708	-5097
Mekanisk ventilation	24,4	5919	75000	219183	-44572

Tabel 6.2: Nuværdibetragtning af forskellige ventilationsløsninger.

Realrenten, r , som anvendes til beregning af nuværdifaktoren, er et udtryk for det endelige afkast ved at sætte sine penge i banken frem for at investere dem. Denne har siden 1990 i Danmark ligget mellem 2 og 3 % (Energirigtigtbyggeri.dk, 2007). Omregnes rentabilitetskravet i BR10 til en tilsvarende realrente ligger denne på 2,9 % og denne rente er anvendt i ovenstående beregning.

De sidste fire år har vi i Danmark dog haft en decideret negativ realrente, hvilket skyldes den økonomiske krise og at nominelle rente er enormt lav. Realrenten ligger i øjeblikket mellem -1,5 og -2 %. Dette gør det særdeles økonomisk attraktivt at investere og især i energirenovering, da dette netop giver økonomiske besparelser. For at illustrere effekten er Nuværdierne af de pågældende tiltag beregnet med en lidt konservativ realrente på -1 % i tabel 6.3.

Ventilationssystem	Nuværdifaktor [-]	Årligt energiudgift [kr]	Investering [kr]	Nuværdi [kr]	Besparelse over 30 år si[kr]
Energivinduer med ventiler (reference)	45,5	7168	0	326081	0
Ventilationsvinduer	45,5	6425	23205	315470	10611
Mekanisk ventilation	45,5	5919	75000	344258	-18177

Tabel 6.3: Nuværdibetragtning af forskellige ventilationsløsninger.

De totaløkonomiske betragtninger afhænger i nogen grad af betragtningsmetoden og der findes andre måder at anskue forholdet på end ved nuværdimetoden, f.eks. ved simpel tilbagebetalingstid eller energisparepris. Betragtningerne afhænger dog i endnu højere grad af de økonomisk fastsatte faktorer til beregning af rentabilitet og en af disse, den vigtige kalkulationsrente, forventes f.eks. ændret inden længe (Rothenborg 2013). Dette forventes umiddelbart at give bedre forhold for grønne og energirigtige investeringer i fremtiden.

Det ses af tabel 6.2 og 6.3 at der økonomisk set er tale om relativt små årlige energibesparelser både for ventilationsvinduer og for mekaniske ventilationsanlæg. Ved en almindelig nuværdibetragtning står

besparelserne i de mere energieffektive ventilationssystemer ikke mål med investeringsudgifterne. Med de nuværende økonomiske forhold er der derimod stort incitament for investering i tiltag, der sparer energi og det ses at merinvesteringen i ventilationsvinduer over 30 år derfor vil give afkast. Det bemærkes desuden at break-even punktet for investeringen er 22 år.

Det er ikke en del af denne opgave at spørge om udvikling i renten over de næste mange år, men det bemærkes hvor stor en indflydelse dette har på vores normale betragtninger af hvad der er rentabelt i forhold til energirenovering. Det er dog et faktum at penge investeret i en energibesparelse som her vil give et sikkert afkast og man bør i vores nuværende samfundsøkonomiske situation benytte sig af de gunstige forhold. Det ser ud til at merinvestering i ventilationsvinduer i stedet for almindelige lavenergivinduer under de rette økonomiske forhold er et rentabelt tiltag.

Den her benyttede økonomiske model har som udgangspunkt at man har optaget et lån og nu skal vælge hvor pengene skal investeres. Det bør derfor ofte yderligere vurderes hvorledes merinvesteringen har indflydelse på den mulige renteudgift man har hvis man til energirenovering optager et lån i boligen. De ekstra renteudgifter vil have væsentlig indflydelse på om det for den enkelte boligejer er rentabelt eller ej at investere i ventilationsvinduer.

6.3 Konklusion

Fra den indledende parameterundersøgelse blev vist, at der er potentialer for en lang række energibesparelser for bygningerne i Komponistkvarteret. Boligerne er i landsdækkende sammenhæng ikke i de kritiske energiklasser, men det vigtig at fokus lægges på korrekt energirenovering af blandt andet denne type boliger, så de kan blive ved med at være en del af vores kulturarv fremover. Følsomhedsanalysen viste, at der var store besparelser at hente på især udskiftning af vinduer og efterisolering, men lokalplansbestemmelser og byggetekniske begrænsninger kan sætte en stopper for disse tiltag, hvis de strider imod det arkitektoniske udtryk. Det er vigtigt at man fortsat har fokus på disse tiltag og søger muliggøre denne form for energirenovering.

Nærværende undersøgelse har lagt fokus på, hvorledes ventilationsvinduer kan blive en del af de mulige energitiltag for boliger som i Komponistkvarteret. Herved er der foreslået en mulig implementering i det dynamiske simuleringsprogram IES VE for at fastslå virkning af og besparelserne ved denne type vinduer. Resultaterne har vist sig at stemme overens med teorien samt påpege forhold der ikke tidligere er belyst i litteraturen.

Ventilationsvinduerne udnytter i høj grad temperaturforskellen mellem inde og ude, hvilket giver store besparelsepotentialer om vinteren, hvis luftstrømmen gennem det enkelte vindue kan holdes lav. Kan den ikke det, så sker forvarmningen af luften hovedsagligt via et forøget varmetab, og giver derfor ikke anledning til nogen decideret besparelse. De klimatiske forhold om foråret bidrager bedst

til ventilationsvinduet virkning fordi det har en forbedret g-værdi i forhold til almindelige vinduer. Samlet set sparer ventilationsvinduet en væsentlig mængde energi og har potentiale til mere hvis både konstruktion og ventilationsstrategi optimeres.

Der er desuden observeret generelt pæne temperaturstigninger i ventilationsluften, hvilket vil bidrage til et forbedret indeklima – især med hensyn til træk. For at kvantificere dette forhold, er der bestemt en samlet energibesparelse på 6 % af opvarmningsbehovet på baggrund af de reducerede trækgener. Indeklimaforholdene vil kunne analyseres langt bedre ved brug af mere avanceret software. Det har vist sig at den resulterende indblæsningstemperatur på især solrige dage godt kan variere med op til 3 grader fra rum til rum på grund af ventilationsvindues virkemåde.

Det har været muligt at indsætte ventilationsvinduet i det dynamisk samspil, som vil fungere for et fuldt naturligt drevet ventilations-system. Dette ventilationssystem har vist sig en smule utilstrækkeligt i forhold til at opnå de foreskrevne ventilationsmængder på trods af at bygningsgeometrien har gode forhold til at opretholde et fornuftigt drivtryk. Eksperimentelle forsøg med indbygning af systemet i en konkret bolig ville kunne bidrage væsentligt til at fastslå virkningen ved ventilationsvinduer i denne ventilationssammenhæng.

Ventilationsvinduer er blevet økonomisk analyseret i sammenhæng med mekaniske ventilation som alternativ. Ventilationsvinduer har ikke de samme energisparepotentialer som et mekanisk anlæg med varmegenvinding. De er til gengæld ikke en væsentlig meromkostning hvis en vinduesudskiftning alligevel er forestående og det naturligt drevne system vil langt nemmere kunne etableres, uden at der skal anlægges en masse ventilationskanaler i boligerne. Den lave meromkostning gør også det ventilationsvinduerne til et mere totaløkonomiske rentabelt tiltag end et mekanisk ventilationsanlæg vist ved nuværdiberegninger. Tiltaget er dog ikke i sig selv rentabelt medmindre de rette økonomiske samfundsforhold er til stede.

Det konkluderes slutteligt at selvom implementering af ventilationsvinduer i bygningssimulering har været mulig så er metoden langt fra simpel og kræver en dybdegående analyse af forholdene på alle skala niveauer. Det anbefales at der i forbindelse med yderligere eller fortsat implementering, indledende foretages en kvalificeret vurdering af om ventilationsvinduerne har potentiale i det pågældende byggeri før simuleringsarbejde påbegyndes. Resultaterne af denne undersøgelse er nemlig kun fuldt valide for boligerne i Komponistkvarteret.

7

Litteratur

Awbi, H. (2003). *Ventilation of buildings*. Spoon Press - Taylor and Francis Group, 2nd edition.

Bosch Termoteknik (2013). 7 Energitips.

Building Supply (2008). P.C. Vinduer og Døre A/S konkurs.

Bygge- og Teknikforvaltningen (1993). Lokalplan nr. 221. Technical Report 221, Københavns kommune planorientering, København.

Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, New York, 4 edition.

Danmarks Meteorologiske Institut (1999). Observeret vindhastighed og -retning i Danmark - med klimanormaler 1961-90. Technical report, DMI, København.

DesignGroup (2002). 3 Generations Vinduer – Rapport om Erfaringer med 2 Prototyper Opsat i Store Strandstræde, December 2002. Technical report.

Dong Energy (2013). Distributionspriser fra 1. april 2013.

Energirigtigtbyggeri.dk (2007). Økonomiske begreber.

Energistyrelsen (2008). *Håndbog for energikonsulenter 2008*. 3. edition.

Energistyrelsen (2013). Bygningsreglementet 2010. Technical report, København.

Hansen Group (2011). *Hansen på Lavenergi*. Hansen Group.

HOFOR (2013). Prisen på fjernvarme 2013.

Petersen, B. H. (2008). Komfortventilation. Technical report, DTU BYG.

Politiken (2013). Regeringen vil opfylde grønt løfte.

Raffnsøe, L. M. (2007). *Thermal Performance of Air Flow Windows*. PhD thesis, Danmarks Tekniske Universitet.

Reinholdt, L. (2008). Vinduet fra Vinterpaladset.

Strandvejskvarteret (2006). *Håndbog for husejere i Strandvejskvarteret*.

Strandvejskvarteret (2013). Strandvejskvarteret.

Tommerup, H. (2005). Energibesparelse for "Ventilationsvinduet".
Technical report, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby.

Tommerup, H. (2010). Energirenoveringstiltag - Katalog. Technical
report, DTU.

Winvent (2013). Sådan Virker Winvent.