



## Reduktion af risiko for overtemperatur i etageboliger i forbindelse med facaderenovering: Afsluttende rapport

Kolarik, Jakub; Zukowska-Tejsen, Daria; Sarey Khanie, Mandana; Nielsen, Toke Rammer

*Publication date:*  
2019

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Kolarik, J., Zukowska-Tejsen, D., Sarey Khanie, M., & Nielsen, T. R. (2019). *Reduktion af risiko for overtemperatur i etageboliger i forbindelse med facaderenovering: Afsluttende rapport*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

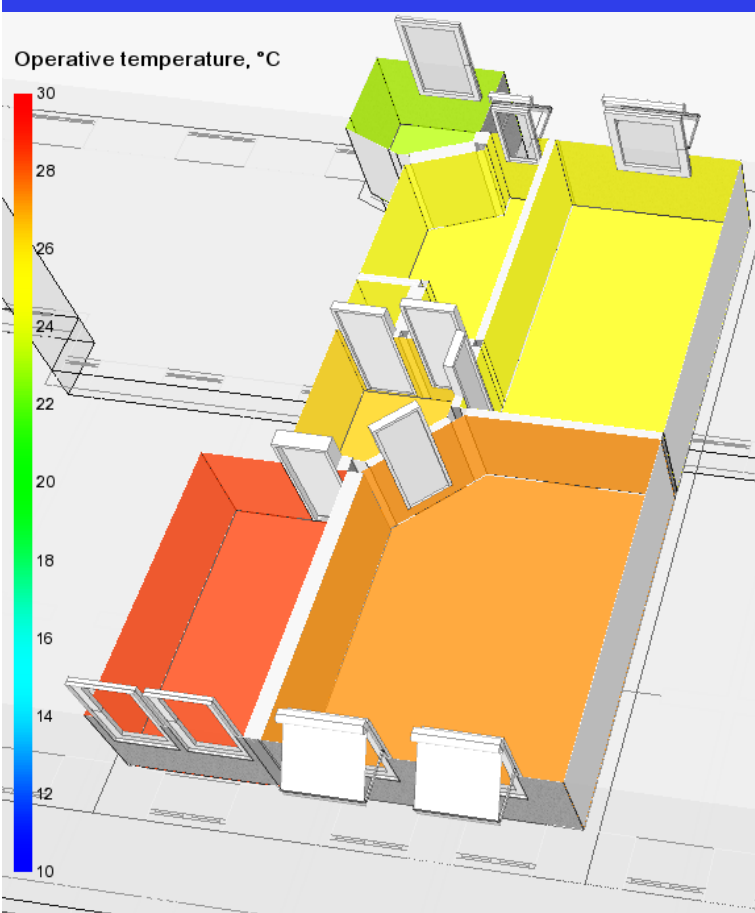
---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



**BYG R-412, 2019**

## Reduktion af risiko for overtemperatur i etageboliger i forbindelse med facaderenovering

**Forfattere:**

Jakub Kolarik

Daria Zukowska

Mandana Sarey Khanie

Toke Rammer Nielsen





# **Reduktion af risiko for overtemperatur i etageboliger i forbindelse med facaderenovering**

Afsluttende rapport

november 2019

Rapport 412  
2019

Jakub Kolarik, Daria Zukowska, Mandana Sarey Khanie, Toke Rammer Nielsen

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne publikation er tilladt med kildeangivelse  
Forsidefoto: DTU Byg  
Udgivet af: Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet  
Rekvireres: [www.dtu.dk](http://www.dtu.dk)  
ISSN: [0000-0000] (elektronisk udgave)  
ISBN: 87-7877-510-8 (elektronisk udgave)

# Forord

Denne afsluttende rapport opsummerer arbejdet på forskningsprojektet ”Reduktion af risiko for overtemperatur i etageboliger i forbindelse med facaderenovering”. Projektet blev gennemført ved Sektion for Energi og Installationer, Institut for Byggeri og Anlæg ved Danmarks Tekniske Universitet i perioden 1. januar 2016 - 31. december 2018. Det samlede budget for projektet var 1.98 mio. kr. Grundejernes Investeringsfond støttede projektet med 990.000 kr.

Formålet med projektet var at evaluere potentialet for forskellige solafskærmninger kombineret med typiske ventilationsløsninger for at reducere overophedning efter energirenovering af danske etageboligbyggerier fra 1850-1970 under hensyntagen til dagslysets mængde og kvalitet.

Rapporten opsummerer de vigtigste resultater fra projektet og er målrettet byggebranchen, bygningsejere samt beboere. Med rapporten medfølger ”Resultatbrowser” – en MS Excel baseret database med projektets resultater. ”Resultatbrowseren” muliggør visualisering af projektets resultater, der demonstrerer, hvordan forskellige renoveringstiltag påvirker det termiske indeklima og energiforbrug. Forskningsgruppen håber, at denne rapport samt ”Resultatbrowseren” bidrager til øget opmærksomhed vedrørende brug af solafskærmning og ventilation ved energirenovering.

Forfatterne af denne rapport vil gerne takke alle studerende, der har arbejdet på projektet for deres bidrag.

Toke Rammer Nielsen  
*Projektleder*

# Indhold

1.	Overophedning – er det et problem i danske etageboliger?.....	6
2.	Findes der løsninger?.....	6
3.	Projektets formål .....	7
4.	Hovedresultater .....	7
5.	Detaljerede resultater .....	10
5.1	Bygningens placering, orientering og renovering .....	10
5.2	Ventilationsstrategi .....	12
5.3	Solafskærmninger .....	13
6.	Metoder .....	15
6.1	Undersøgte bygningstyper .....	15
6.2	Omgivelser og orientering .....	18
6.3	Vinduer .....	18
6.4	Solafskærmning .....	19
6.5	Simuleringer - tekniske detaljer .....	20
7.	Analyse .....	21
7.1	Energiforbrug .....	21
7.2	Termisk indeklimate .....	21
8.	”Resultatbrowser” .....	21

# Resumé

Bygningsreglementet stiller skarpe krav til øget energieffektivitet og reduktion af CO<sub>2</sub>-udledning både for nye og renoverede boliger. Ved renovering af eksisterende boliger medfører dette som regel efterisolering og tætning af klimaskærm samt udskiftning af vinduer. Disse tiltag sænker bygningens energiforbrug, men samtidig øges risikoen for overophedning, især i løbet af forår og sommer. Problemet bliver endnu større, da antallet af personer, der arbejder hjemmefra, øges og de eksterne temperaturer stiger som følge af klimaændringer. Mange undersøgelser har vist, at en for høj indendørstemperatur påvirker sundhed, trivsel og produktivitet negativt. Det er derfor vigtigt, at overophedningsproblemet i danske boliger får større opmærksomhed. En løsning på problemet er effektiv ventilation samt at begrænse solens bidrag gennem vinduer i facaden, som kan være et betydeligt bidrag i boliger.

Formålet med projektet var at evaluere potentialet for forskellige solafskærmninger kombineret med typiske ventilationsløsninger for at reducere overophedning efter energirenovering af danske etageboligbyggerier fra 1850-1970 under hensyntagen til dagslysets mængde og kvalitet.

Studiet blev udført ved brug af dynamiske bygningssimuleringer med fokus på tre typer danske etageboliger fra perioden 1850-1970 baseret på bygningstopologi defineret af Engelmark (Engelmark, J. 2013. Dansk Byggeskik, Etagebyggeriet gennem 150 år, ISBN: 978-87-993249-6-5). Derudover blev dagslyskvalitet og distribution studeret ved brug af avancerede dagslyssimuleringer.

Studiet viste, at energirenovering reducerer energiforbruget i gennemsnit med 64 %, men resulterer i et stigende antal timer med overophedning (rum temperatur højere end 27 °C). I tilfælde af energirenovering, hvor der ikke implementeres mekanisk ventilation, stiger antallet af timer med overophedning i gennemsnit fra 51 timer før renovering til 106 timer efter renovering. Bygningsreglementet tillader maksimum 100 overophedningstimer om året. Det maksimale antal overophedningstimer for bygninger uden mekanisk ventilation i det nuværende studie var 154 timer. Ved implementering af mekanisk ventilation kan antallet af overophedningstimer i gennemsnit reduceres med 40 %.

Studiets største fokus var anvendelse af solafskærmning. I boligbyggeri bruges mest indvendig solafskærmning som gardiner, indvendige persiener eller rullegardiner. Resultaterne viser, at indvendig solafskærmning i kombination med mekanisk ventilation effektivt kan reducere overophedningstimer under grænseværdien på 100 timer om året. Hvis overophedning skal elimineres, er udnyttelse af udvendig solafskærmning nødvendig.

Projektets resultater viser, at solafskærmning altid bør overvejes i forbindelse med energirenovering, hvis overophedning skal minimeres.



# 1. Overophedning – er det et problem i danske etageboliger?

Bygningsreglementet [1] stiller større og større krav til øget energieffektivitet og reduktion af CO<sub>2</sub>-udledning både for nye og renoverede boliger. Dette medfører grundig efterisolering af klimaskærmen samt udskiftning af vinduer. De fleste energirenoveringstiltag forsøger også at øge bygningens lufttæthed. Disse tiltag øger risikoen for overophedning i forbindelse med energirenovering, især om foråret og sommeren. Bygningsreglementet [1] definerer overophedning som antallet af timer med rumtemperatur over 27 °C, med en tolerancegrænse på maksimum 100 overophedningstimer om året. Risikoen for overophedning kan forventes endnu større i fremtiden på grund af den generelle tendens til stigende udetemperaturer forårsaget af den globale opvarmning.

Selv om der vil gå mange år, før klimaforandringer påvirker det forholdsvis høje klimakølepotentiale i Skandinavien [2], findes der allerede nu eksempler på lavenergibyggeri med stigende tendens til overophedningsproblemer [3]. Det er derfor ikke tilfredsstillende, at overophedning, i dansk sammenhæng, ikke modtager større opmærksomhed sammenlignet med andre europæiske lande. For eksempel i Storbritannien er den generelle bevidsthed og omfanget af forskning i forbindelse med overophedning væsentligt højere [4,5]. En nylig rapport fra "Department of Communities and Local Government" [6] viser, at hvis der ikke gennemføres særlige tiltag, kan de varmerelaterede dødsfald i Storbritannien stige til omkring 5.000 om året i 2080'erne. Det er sandsynligt, at der også kan forventes lignende tendenser i Danmark.

Eksposering for overophedning i boliger kan også forventes at stige, fordi folk bruger mere og mere tid indendørs. I sammenhæng med udbredelsen af højhastighedsinternet stiger antallet af mennesker, der arbejder hjemmefra. Mange undersøgelser har vist, at en for høj indendørstemperatur påvirker sundhed, trivsel og produktivitet negativt [7]. For størstedelen af befolkningen er kortvarige perioder med høje temperaturer et spørgsmål om termisk ubehag og lavere produktivitet, men hvis det er en længerevarende tilstand, kan det føre til sundhedsmæssige problemer og udvikle sig til alvorlige sygdomme, endda død. For visse sårbare grupper såsom spædbørn, børn, ældre, overvægtige og folk med kroniske sygdomme, kan overophedning i selv kortere perioder have betydelige sundhedsmæssige konsekvenser [4]. Derudover resulterer høje nattemperaturer i manglende mulighed for at restituere efter varrestress i dagtimerne [8] på grund af forringet søvnkvalitet [9,10].

## 2. Findes der løsninger?

Overophedning i boliger er forårsaget af interne varmekilder (beboere, beboeraktiviteter, elektriske apparater, osv.) samt eksterne varmekilder hovedsageligt i form af solindfald. En lufttæt og højisoleret bygning har svært ved at komme af med varmen. Bygningsreglementet [1] kræver ventilation i både nye og renoverede boliger for at sikre tilstrækkelig luftkvalitet og undgå fugtrelaterede problemer som kondens og vækst af skimmelsvamp, men ventilationen i danske

boliger er ikke designet til at køle. Bygningsreglementet forventer, at beboerne bruger vinduer til udluftning og derved kan sænke temperaturen i varme perioder. Dog er det ikke altid hensigtsmæssigt at køle ved at åbne vinduer, og det har en begrænset effekt. I travle byer resulterer vinduesåbning i uønsket støj og eksponering til luftforurening kommende udefra. Derudover giver åbne vinduer øget risiko for indbrud, specielt i nattetimerne. Generelt anvender europæerne i stigende grad klimaanlæg for at holde deres boliger komfortable, men denne løsning øger energiforbruget og kan derfor være en kostbar løsning for boligejeren. Selv om det er sandsynligt, at klimaanlæg i den nærmeste fremtid muligvis også finder vej til danske boliger, er det vigtigt at undersøge andre, mere bæredygtige og prisbillige løsninger.

En løsning på problemet er at begrænse solens bidrag gennem vinduer i facaden, som kan være et betydeligt bidrag i boliger [11]. Effektiv intern eller ekstern solafskærmning eller vinduer med solafskærmende glas kan bruges effektivt til at holde boliger køligere i solrige perioder og reducere, eller måske endda eliminere behovet for klimaanlæg. Studiet "ES-SO 2014 - Cost Efficient Solar Shading Solutions in High Performance Buildings" [12] viser, at dynamisk solafskærmning kan føre til energibesparelser i forbindelse med køling på op til 62 % for sydvestvendte facader for kontorbygninger beliggende i Stockholm.

Effekten af forskellige tilgængelige solafskærmende løsninger på dagslysets niveau, distribution og kvalitet i boliger skal dog undersøges nøje for at undgå visuelt ubehag for beboerne. Gode dagslysforhold i boliger nedsætter behov for elektrisk belysning, hvilket leder til energibesparelser og reduktion i CO<sub>2</sub>-udledning. Lys, især dagslys, styrer det biologiske ur og er derfor en vigtig regulator for den menneskelige fysiologi og ydeevne [13]. Utilstrækkelige dagslysniveauer kan forårsage dårligere koncentrationsevne, nedsat produktivitet og trivsel, søvnforstyrrelser og tendenser til vinterdepression. Korrekt dagslys øger den visuelle opfattelse og giver en bedre farveopfattelse end de fleste elektriske lyskilder. Visuel kontakt til omverdenen gennem vinduer påvirker menneskers sindstilstand, og det er bevist, at det øger produktiviteten, og at folk føler sig gladere og mindre stresset [14].

### 3. Projektets formål

Formålet med projektet var at evaluere potentialet for forskellige solafskærmninger kombineret med typiske ventilationsløsninger for at reducere overophedning efter energirenovering af danske etageboligbyggerier fra 1850-1970.

### 4. Hovedresultater

Studiet er foretaget ved brug af dynamisk bygningssimulering med fokus på tre typer danske etageboliger fra perioden 1850-1970 baseret på topologi udarbejdet af Engelmark [15]. Tabel 1 præsenterer en oversigt over projektresultaterne vedrørende overophedningsrisikoen efter

renovering. Studiet viste, at energirenovering reducerer energiforbruget i gennemsnit med 64 %, men resulterer i et stigende antal timer med overophedning. I tilfælde af renovering, hvor der ikke implementeres mekanisk ventilation, stiger antallet af timer med overophedning i gennemsnit fra 51 timer før renovering til 106 timer efter renovering. Det maksimale antal overophedningstimer for bygninger uden mekanisk ventilation i det nuværende studie var 154 timer. Dette er 54 timer over grænsen defineret i Bygningsreglementet [1]. I dag kommer der flere og flere renoveringsprojekter, hvor der implementeres mekanisk ventilation med varmegenvinding. Med hensyn til mekanisk ventilation viste studiet, at antallet af overophedningstimer i gennemsnit reduceres med 40 % i forhold til, når der ikke er mekanisk ventilation.

Studiets største fokus var på anvendelse af solafskærmning ved renoveringen. I gamle bygninger bruges mest indvendig solafskærmning som gardiner, indvendige persiener eller rullegardiner. Resultaterne viser, at indvendig solafskærmning i kombination med mekanisk ventilation kunne reducere antallet af overophedningstimer til under 100 timer om året (se tabel 1). Udnyttelse af ekstern solafskærmning er nødvendig for at eliminere overophedning i de undersøgte bygninger. Brug af solafskærmende glas kan eliminere overophedning i de ældste bygninger (bygningstype 1, byggeperiode 1850-1890), som har det mindste glasareal i forhold til facadearealet. I bygningstyperne 3 og 4 (byggeperioderne 1920-1940 og 1940-1970) førte anvendelse af solafskærmende glas til reduktion af overophedning til under 100 timer om året, men den blev ikke helt elimineret.

**Tabel 1.** Projektets resultater med hensyn til overophedningsrisiko efter renovering (efterisolering og lufttætning af facaden); cases med og uden solafskærmning blev undersøgt med 2-lags energiglas; farvelegende: grøn - ingen timer med temperatur >27°C/ år, rød - > 100 timer med temperatur >27°C/ år.

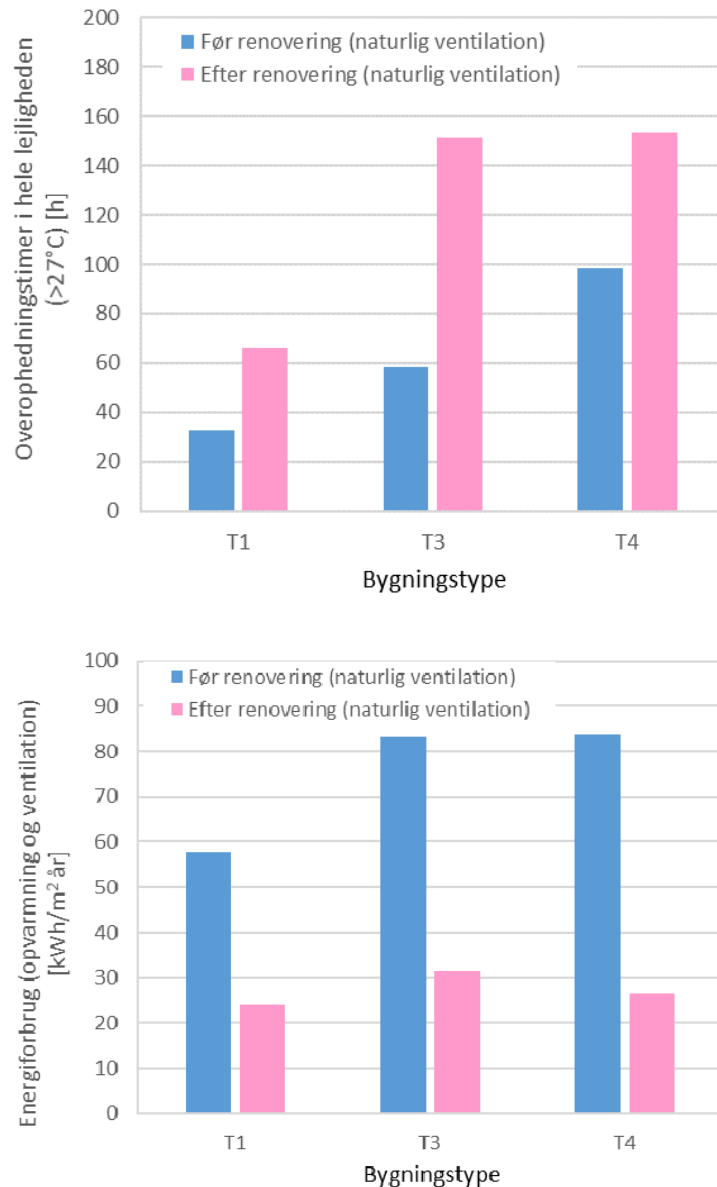
Solafskærmning	Ventilation	Bygningstype 1			Bygningstype 3			Bygningstype 4		
		Vest	Øst	Syd	Vest	Øst	Syd	Vest	Øst	Syd
Ingen solafskærmning	Naturlig ventilation	66	35	50	151	129	117	154	145	105
	Variabel luftstrøm med fugtstyring	52	22	42	103	74	81	127	116	86
	Konstant luftstrøm ventilation	51	21	39	79	57	65	115	100	81
Indvendig solafskærmning	Naturlig ventilation	46	22	32	106	76	79	83	70	52
	Variabel luftstrøm med fugtstyring	37	13	24	65	33	57	64	58	43
	Konstant luftstrøm ventilation	34	13	22	57	27	45	61	54	39
Udvendig solafskærmning	Naturlig ventilation	4	5	5	18	19	14	0	0	0
	Variabel luftstrøm med fugtstyring	0	4	0	6	0	9	0	0	0
	Konstant luftstrøm ventilation	0	4	0	0	0	7	0	0	0
Solafskærmende glas	Naturlig ventilation	20	9	6	41	26	29	48	44	36
	Variabel luftstrøm med fugtstyring	10	4	7	22	11	14	39	32	25
	Konstant luftstrøm ventilation	10	4	6	18	8	11	37	30	22
3-lags energiglas	Naturlig ventilation	35	19	30	97	73	73	89	85	66
	Variabel luftstrøm med fugtstyring	29	13	19	55	31	48	68	65	55
	Konstant luftstrøm ventilation	28	12	17	47	26	38	66	59	50

## 5. Detaljerede resultater

### 5.1 Bygningens placering, orientering og renovering

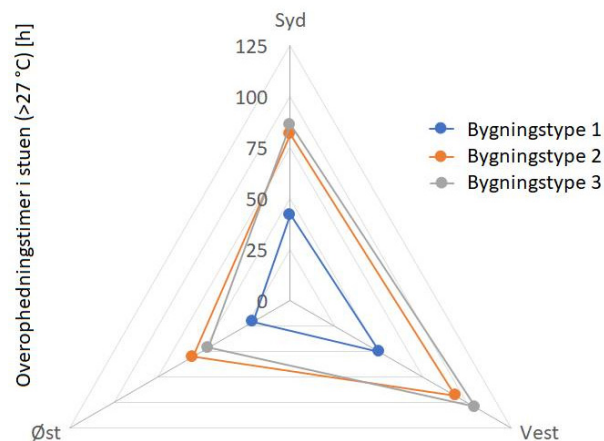
Placering af bygning i tæt bebygget område påvirker selvfølgelig både det termiske indeklima og dagslysforhold i bygningen. Bygningstype 1 undersøgt i dette studie repræsenterer bygninger som tit befinder sig i centrum af store byer. Derfor blev denne bygningstype simuleret med og uden omkringstående bygninger. Det samlede energiforbrug i en bygning placeret i tæt bebygget område var i gennemsnit 4 kWh/m<sup>2</sup> per år højere end energiforbruget i en bygning uden omkringliggende bygninger. Dette skyldes øget varmebehov på grund af mindre solindfald om vinteren. Til gengæld var bygninger uden omkringliggende bygninger mere følsom for overophedning. Antallet af timer med indetemperatur over 27 °C var op til 57 timer om året i en bygning efter renovering uden mekanisk ventilation. Den samme bygning placeret i tæt bebygget område havde kun 5 overophedningstimer per år. Antallet af overophedningstimer er selvfølgelig afhængig af højden og afstand af omkringstående bygninger samt etageplacering af hver enkelt lejlighed. Yderligere analyser viste, at brug af solafskærmning havde potentiale til at reducere overophedning trods bygningens placering.

De undersøgte energirenoveringstiltag (efterisolering og tætning af facaden) uden mekanisk ventilation reducerede det samlede energiforbrug med ca. 60-70 % for alle bygningstyper. Figur 1 (højre) viser et eksempel på reduktion i energiforbrug opnået ved renovering af bygningstype 1. Forbedring af bygningens isoleringsevne medførte desværre en stigning af overophedningstimer, se figur 1 (venstre). Renovering førte til det største antal overophedningstimer i bygningstype 4, men tendensen var klar for alle undersøgte bygningstyper.



**Figur 1.** Overophedningstimer (øverst) og energiforbrug (nederst) for bygningstype 1 - vest orientering før og efter energirenovering. Der antages naturlig ventilation i begge tilfælde; vinduer med 2-lags energiruder både før og efter renovering.

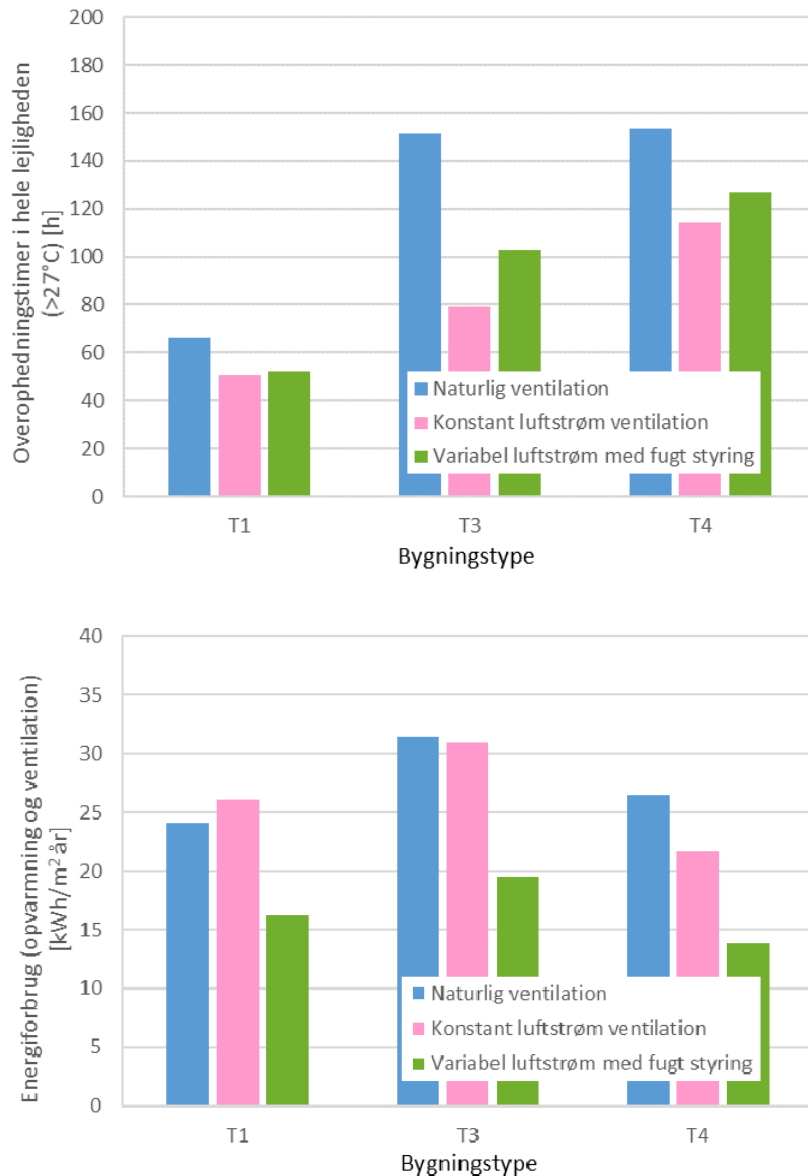
Bygningens orientering spillede kun en mindre rolle med hensyn til energiforbrug. Forskellen i energiforbrug som resultat af bygningens orientering var i gennemsnit 3 kWh/m<sup>2</sup> per år efter renovering gældende for alle bygningstyper. Bygninger med stuen orienteret mod syd havde det mindste energiforbrug. Orienteringen påvirkede dog overophedning i alle simulerede bygninger. Antallet af timer med temperatur over 27 °C var højest for den vestlige orientering og mindst for den østlige orientering. I gennemsnit var forskellen mellem vest og øst 36 overophedningstimer. Figur 2 giver et eksempel på forskellen i overophedningstimer som resultat af orientering af referencebygningerne med fugtstyret mekanisk ventilation uden solafskærmning.



**Figur 2.** Overophedningstimer i stuen som funktion af orientering af referencebygninger med fugt styret mekanisk ventilation, ingen solafskærmning.

## 5.2 Ventilationsstrategi

Med mindre der er blevet søgt dispensation, skal der ifølge Bygningsreglementet [1] installeres et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding ved renovering af etageboligbyggeri. Et mekanisk ventilationsanlæg sikrer, at der ikke opstår fugtskader, samt at tilstrækkeligt luftkvalitet opnås med mindst muligt energitab. Der findes mange ventilationsløsninger på markedet som tilbyder forskellige typer af regulering samt systemtopologi. I dette projekt blev der undersøgt to typer af ventilationsanlæg, som kan betragtes som de hyppigste i renoverede danske etageejendomme. Ventilation med konstant luftstrøm eller med variabel luftstrøm ventilation styret efter den relative luftfugtighed i afkastluften. Implementering af et mekanisk ventilationssystem bidrager til reduktion af overophedning. Figur 3 viser et eksempel for orientering mod vest, hvor overophedningsbelastning er højest. Ventilation med konstant luftstrøm reducerer overophedning mest, men som det er tydeligt fra figur 3 (højre), er denne ventilationsstrategi forbundet med øget energiforbrug. Fugtstyret ventilation medførte en mindre reduktion af overophedning, men førte til et betydeligt mindre energiforbrug.



**Figur 3.** Overophedningstimer (øverst) og energiforbrug (nederst) for tre undersøgte typer af ventilation; bygninger er orienteret mod vest og uden solafskærmning.

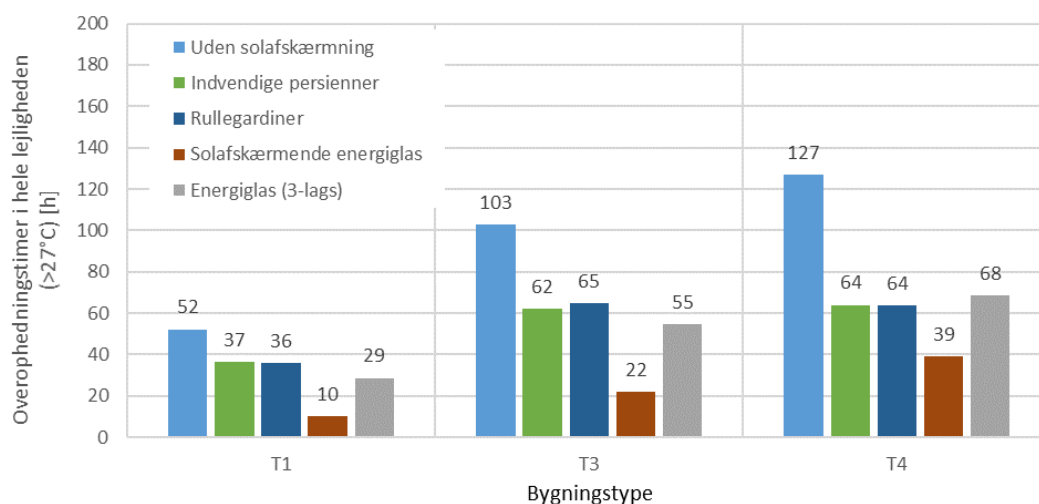
### 5.3 Solafskærmninger

Virksomheden af henholdsvis indvendig og udvendig solafskærmning illustreres i figur 4 og figur 5. Eksemplet i figurene repræsenterer bygninger med mekanisk ventilation orienteret mod vest. Resultaterne viser, at intern solafskærmning kun har begrænset potentiale til at reducere overophedning. Solafskærmningens indvendige placering betyder, at solstråler passerer ruden, og kun en begrænset mængde af denne energi reflekteres tilbage til omgivelserne. Brug af 3-lags energiglas medfører tilsvarende effekt på overophedningen, mens brug af solafskærmende glas reducerer overophedningen markant. Denne reduktion i overtemperatur medfører samtidig et reduceret niveau af dagslys. Figur 5 viser, at installation af udvendig solafskærmning kraftigt

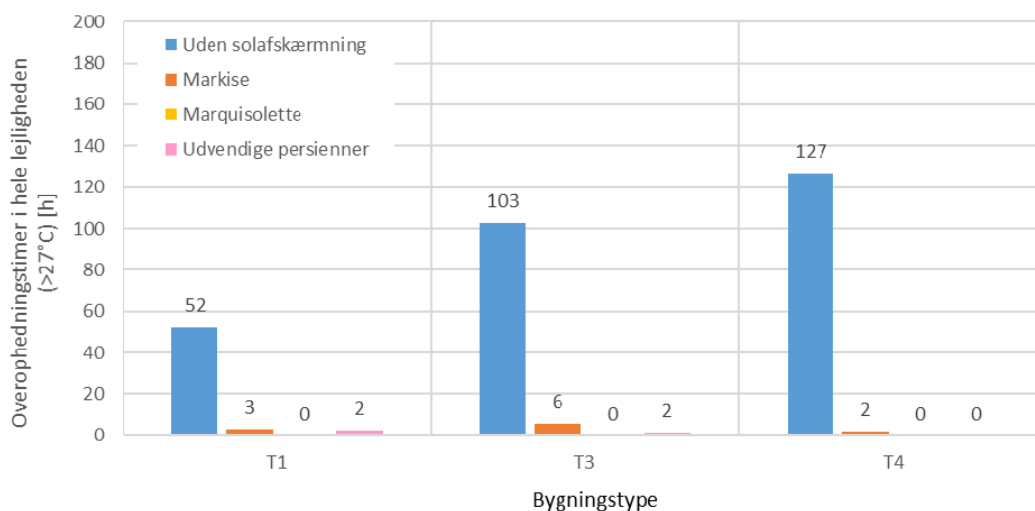


reducerer overophedning i alle bygningstyper. Resultaterne viser også, at der kun var en lille forskel mellem de tre undersøgte typer af udvendig solafskærmning.

Samlet set bekræfter projektets resultater, at indvendig solafskærmning, som er mest udbredt i danske boliger, kun i begrænset omfang kan bruges til at modvirke overophedning. Modellering af tre forskellige bygningstyper viser også, at den endelige opnåede effekt er afhængig af bygningens konstruktion og disposition. Selv om det ikke altid er muligt at implementere udvendig solafskærmning ved energirenovering af etageboligbyggeri, viser projektets resultater, at denne løsning er den mest effektive til at reducere problemer med overophedning.

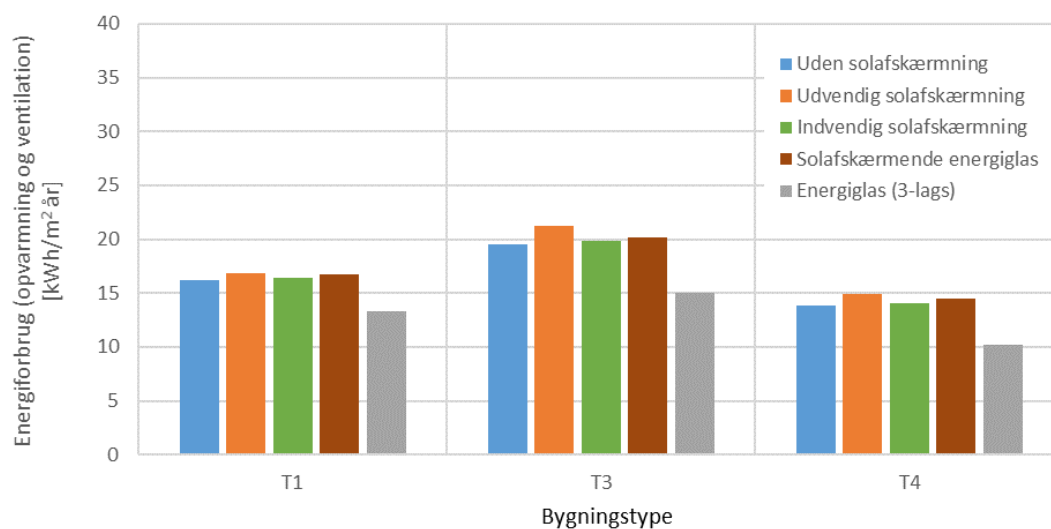


**Figur 4.** Overophedningstimer ved brug af forskellige typer af indvendig solafskærmning, solafskærmende glas og 3-lags energiglas i bygninger med fugtstyret mekanisk ventilation orienteret mod vest.



**Figur 5.** Overophedningstimer ved brug af forskellige typer af udvendig solafskærmning i bygninger med fugtstyret mekanisk ventilation orienteret mod vest.

Figur 6 viser en sammenligning af energiforbruget til opvarmning og ventilation ved anvendelse af udvendig og indvendig solafskærmning samt solafskærmende og almindelig 3-lags energiglas. Det er tydeligt, at solafskærmning generelt kun havde en lille effekt på energiforbruget. I sammenligning med effekten af selve energirenoeringen (efterisolering) og installationen af mekanisk ventilation er solafskærmningens effekt ubetydelig. Brug af 3-lags energiruder reducerer energiforbruget betydeligt, men 3-lags rudens overophedningsreduktion potentiale er sammenlignelig med potentialet for indvendig solafskærmning og dermed lavt.



**Figur 6.** Sammenligning af energiforbrug til opvarmning og ventilation for forskellige typer solafskærmning samt ruder, bygninger efter renovering med fugt styret mekanisk ventilation orienteret mod vest.

## 6. Metoder

### 6.1 Undersøgte bygningstyper

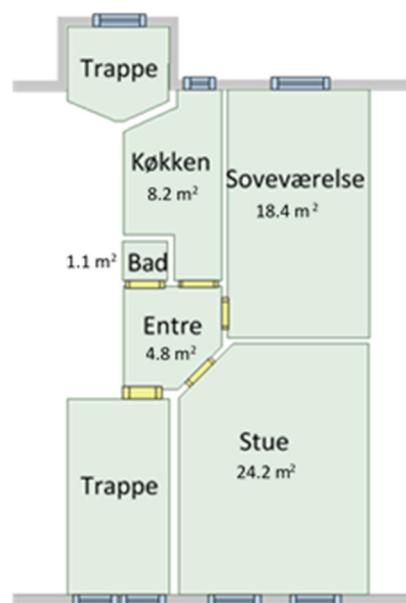
Studiet fokuserede på tre typer af danske etageboligbyggerier fra perioden 1850-1970. Bygningstopologi var defineret af Engelmark [15] og i dette studie blev bygningstyperne 1, 3 og 4 undersøgt. Bygningstype 2 blev ikke undersøgt, eftersom både konstruktion og udseende ligner bygningstype 1 meget. Til hver udvalgt bygningstypologi blev der identificeret en eksisterende bygning (reference) i København og omegn, som dannede grundlag til udarbejdelsen af en simuleringsmodel. I hver referencebygning blev der simuleret en typisk lejlighed placeret i midten af bygningen.

#### *Bygningstype 1*

Bygningstype 1 repræsenterer et historisk 5-etagers boligbyggeri bygget i perioden 1850-1890. Denne bygningstype er meget almindelig i danske byer (figur 7). Ydervæggene er typisk af massivt murværk. De indvendige vægge er hovedsageligt lavet af træ eller mursten. Gulve og

trapper er lavet af træ. Tagmaterialet er teglsten, skifer eller metal båret af en trækonstruktion. Vinduerne er de klassiske dannebrogsvinduer. Referencebygningen for bygningstype 1 er placeret på Ahornsgade på Nørrebro i København. Den simulerede lejlighed havde et opvarmet areal på 56,6 m<sup>2</sup> (figur 7).

Energirenovering af bygningstype 1 omfattede efterisolering (95 mm indvendigt;  $U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) og begrænset infiltration. Løsningen med intern isolering blev valgt på grund af facadernes arkitektoniske værdi i denne type bygninger.



**Figur 7.** Referencebygning for bygningstypologi 1 (venstre); typisk lejlighed (højre).

### Bygningstype 3

Bygningstype 3 repræsenterer boligbyggeri fra byggeperioden 1920-1940 med ydervægge i massivt murværk og indvendige vægge af dobbelt mursten (figur 8). Karnapper, hjørnevinduer og balkoner er almindelige i disse bygninger. Jernbjælker er brugt i etageadskillelser i stedet for træbjælker. Tagpap og cementbaserede plader er anvendt som tagmateriale, stadig på en trækonstruktion, men normalt med en lavere taghældning. Referencebygningen for bygningstype 3 er placeret på Offenbachsvej, Sydhavn, i den sydlige del af København. Den simulerede lejlighed havde et opvarmet areal på 56,1 m<sup>2</sup>.

Energirenoveringen af bygningstype 3 omfattede efterisolering (125 mm ekstern isolering samt yderligere udvendig mursten;  $U = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) og tætning af facaden.



**Figur 8.** Referencebygning for bygningstypologi 3 (venstre); typisk lejlighed (højre).

#### Bygningstype 4

Bygningstype 4 (byggeperiode 1940-1960) har meget til fælles med bygningstype 3, hvor hovedforskellen er etageadskillelse lavet af beton. De ydre vægge er massive mursten med store vinduer. Reference bygningstype 4 er beliggende i Herlev (figur 9). Den simulerede lejlighed havde et opvarmet areal på 65,5 m<sup>2</sup>.

Energirenoeringen af bygningstype 4 omfattede efterisolering (125 mm ekstern isolering med ekstra udvendig mursten;  $U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) og tætning af facaden.



**Figur 9.** Referencebygning for bygningstypologi 4 (venstre); typisk lejlighed (højre).

## 6.2 Omgivelser og orientering

Omgivelser spiller en stor rolle, når dagslysforhold samt overophedning i bygninger skal vurderes. Omkringliggende bygninger kan give skygge og dermed begrænse overophedning, men dette vil også resultere i ringere dagslysforhold. Referencebygningernes reelle omgivelser er vist i figur 10. Bygningstype 1 findes i indre by af København med kort afstand (8,8 m) til omkringliggende bygninger. Bygningstyper 3 og 4 har nabobygninger i en afstand på henholdsvis 18 m og 28 m. I simuleringerne blev bygningstype 1 undersøgt både med og uden omkringstående bygninger. De resterende bygningstyper blev kun undersøgt uden omkringstående bygninger. Imidlertid blev det samlede bygningskompleks omkring en gård altid simuleret for bygningstype 1 og 3.

Hver referencebygning blev simuleret i tre forskellige orienteringer - med stuen mod syd, øst og vest.



**Figur 10.** Reelle omgivelser for referencebygninger: bygningstype 1 (venstre), bygningstype 3 (midten) og bygningstype 4 (højre).

## 6.3 Vinduer

Bygningernes vinduer blev simuleret med forskellige glaskombinationer. Glaskombinationernes egenskaber blev baseret på "Glasfakta" [16]. En klar termorude Pilkington Optifloat Clear (4-12-4) samt en energirude med blød belægning Pilkington Optitherm S3 (4-12Ar-S(3)4) blev anvendt i bygningerne før energirenovering. Bygninger blev undersøgt efter renovering med to typer af energiglas med blød belægning: Pilkington Optitherm S3 (4-12Ar-S(3)4) og Pilkington Optitherm S3 (4S(3)-16Ar-4-16Ar-S(3)4). Detaljer kan ses i tabel 2. Derudover blev alle vinduer også simuleret med belagt solafskærmende energiglas Pilkington Suncool 70/40 (6C(74)-15Ar-4)).

**Tabel 2.** Tekniske egenskaber af vinduer.

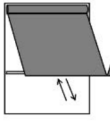
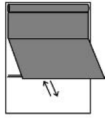
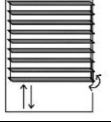
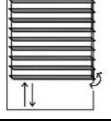
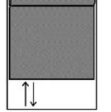
Glaskombination	Forkortelse	$U_g$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	g %	$T_{UV}$ %	$T_{lys}$ %	$U_r$ W/(m <sup>2</sup> ·K)
Pilkington Optifloat Clear (4-12-4)	G0	2,8	79	76	82	2,0
Pilkington Optitherm S3 (4-12Ar-S(3)4)	G1	1,3	65	57	82	1,3
Pilkington Optitherm S3 (4S(3)-16Ar-4-16Ar-S(3)4)	G2	0,6	53	45	74	1,3
Pilkington Suncool 70/40 (6C(74)-15Ar-4)	SCG	1,1	43	40	72	1,3

$U_g$  – transmissionskoefficient af glas, g – solvarmetransmittans,  $U_r$  – transmissionskoefficient af ramme,  $T_{UV}$  – direkte soltransmittans,  $T_{lys}$  – lysttransmittans

## 6.4 Solafskærmning

Fem forskellige solafskærmninger blev evalueret i projektet. Bygningerne efter renovering blev simuleret med disse solafskærmninger samt uden solafskærmning i kombinationer med tre ventilationsstrategier (6.5 Simuleringer – tekniske detaljer). Tabel 3 giver et overblik over de analyserede solafskærmninger: markise, marquisolette, udvendige og indvendige persienner samt rullegardiner. Lamelhældningen for persienner blev fastsat til 45°. Solafskærmningerne blev testet i kombination med vinduer med Pilkington Optitherm S3 (4-12Ar-S(3)4) energiglas, tabel 2.

**Tabel 3.** Undersøgte typer af solafskærmning.

Placering	Solafskærmning (forkortelse)	Farve	$T_{vis}$ %	R %
Udvendig	Markise (S1) 	Grey- Beige	0	13
	Marquisolette (S2) 	Grey- Beige	0	13
	Persienner (S3) 	Hvid	0	74
Indvendig	Persienner (S4) 	Hvid	0	78
	Rullegardin (S5) 	Hvid	5	50

$T_{vis}$  – transmittans, R – reflektans

I boliger er solafskærmningens regulering relateret til beboernes adfærd og præference. Simulering af disse reguleringsmønstre er en meget kompleks opgave. I projektet blev det antaget, at solafskærmning er styret i forhold til dagslyset. Sådant en antagelse bruges tit ved projektering baseret på simuleringer. Proportional regulering med indstilling af belysningsstyrken fra dagslys svarende til 500 lux blev anvendt i alle simuleringer. Denne strategi repræsenterer brugeradfærd, hvor beboerne bruger solafskærmning til at eliminere blænding, men prioriterer dagslys.

## 6.5 Simuleringer - tekniske detaljer

Simuleringer blev foretaget i computerprogrammet IDA ICE [17]. Vejrdata fra det danske referencesår [18] blev anvendt. Det blev antaget, at hver lejlighed var beboet af to voksne med standard arbejdstid i løbet af ugen. En samlet intern varmbelastning på  $5 \text{ W/m}^2$  blev anvendt, som angivet i SBI-anvisning 213 [19]. Fugtproduktionen fra typiske aktiviteter i badeværelset og i køkkenet blev antaget som rapporteret af Smith og Svendsen [20]. Den danske energirammeberegning [19] antager udluftning i perioder, hvor rumtemperaturen overstiger  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , og samme fremgangsmåde blev anvendt i den foreliggende undersøgelse. To yderligere betingelser for udluftning var, at udetemperaturen var mindst  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  lavere end indendørstemperaturen, og mindst en af beboerne var til stede i lejligheden. Det effektive åbningsareal for vinduer blev antaget til 60 % (dog 15 % i nattetimer) ifølge Branchevejledning for indeklimaberegninger [21].

Det blev antaget, at bygninger før energirenovering var naturligt ventileret med en fast infiltration på  $0,5 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ . Efter energirenovering blev bygningerne simuleret med tre typiske ventilationsløsninger: naturlig ventilation - fast infiltration på  $0,3 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$  og to typer af mekanisk ventilation, henholdsvis konstant luftstrøm (CAV) og variabel luftstrøm med fugt styring (VAV). Ved CAV var lejligheden ventileret med i alt 35 l/s. Luftstrømmen ved udsugning fra badeværelse og køkken var henholdsvis 15 og 20 l/s. En tilsvarende indblæsningsluftstrøm blev leveret i beboelsesrummene. VAV repræsenterede en decentraliseret ventilationsløsning med fugtregulering - proportional regulering mellem 30 og 70 % relativ luftfugtighed. Den minimale luftstrøm i beboelsesrummene svarede til  $0,3 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ , mens den maksimale luftstrøm opfyldte krav til udsugning fra badeværelse og køkken – 35 l/s. Bygninger med mekanisk ventilation havde en lufttæthed på  $1 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$  ved 50 Pa. Ventilationsaggregatet opfyldte krav til varmegenvinding (temperaturvirkningsgrad på 0,85) samt et specifikt elforbrug på højst  $1000 \text{ J/m}^3$  til lufttransport, hvor aggregat og kanalsystem kun betjener én beboelse [1].

Minimumtemperaturen i lejlighederne blev indstillet til  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Det blev antaget, at alle bygninger er opvarmet med fjernvarme. Opvarmningssæsonen var fra 1. oktober til 30. april.

## 7. Analyse

### 7.1 Energiforbrug

Energiforbrug til opvarmning og ventilation er evalueret i simuleringerne. Energifaktorer på 0,85 for opvarmning med fjernvarme og 1.9 for elektricitet (mekanisk ventilation) blev medregnet [1]. Energiforbrug til varmt brugsvand blev ikke inkluderet. Alt energiforbrug er relateret til referencelejlighedens opvarmede etageareal.

### 7.2 Termisk indeklima

Ifølge Bygningsreglementet [1] må den operative temperatur i boliger ikke overstige 27 °C i flere end 100 timer om året og 28 °C i flere end 25 timer om året. Derfor definerede nuværende projekt alle timer med operativ temperatur over 27 °C som overophedningstimer. Grænsen på 100 timer bruges som en maksimal tolerabel overskridelsesgrænse. Når overophedning analyseres for hele lejligheden, lægges overophedningstimer for alle rum i lejligheden sammen.

## 8. "Resultatbrowser"

Et MS Excel baseret værktøj blev udviklet for at give brugeren en mulighed for gennemgang af projektets resultater. Værktøjet kaldes "Resultatbrowser" og indeholder en database af resultater fra projektets mere en 400 simuleringer. Det er muligt at sammenligne forskellige renoveringsløsninger, der vælges ved brug af rullemenuer, der repræsenterer følgende parametre: *Bygningstype*, *Rum* – resultater vedrørende overophedning skal visualiseres for et bestemt rum eller samlet, *Orientering*, *Vindue*, *Solafskærmning*, *Omgivelser* – for bygningstype 1, som ofte findes i tæt bebyggede byområder blev der foretaget simuleringer, der tager hensyn til skygge fra omkringstående bygninger. Værktøjet viser resultater i form af overophedningstimer og energiforbrug for de undersøgte ventilationsscenerier: *naturlig ventilation- før og efter renovering*, *mekanisk ventilation- med konstant luftmængde og med variable luftmængde styret af den relative luftfugtighed i afkastluften*. Resultaterne præsenteres både grafisk og i tabelform. Resultater kan udskrives ved at bruge "print" funktionen i MS Excel.



# Referencer

- [1] Trafik- og Byggestyrelsen 2018. Bygningsreglementet 2018 (BR18), <http://bygningsreglementet.dk/> (tilgået november 2018)
- [2] Artmann, N., Gyalistras, D., Manz, H., Heiselberg, P. 2008. Impact of Climate Warming on Passive Night Cooling Potential. *Building Research and Information*, 36, 111-128
- [3] Larsen, T.S., Brunsgaard, C. 2010. Comfort houses: development of a passive house concept in Danish context. In T.S. Larsen, & S. Pedersen (red.), *Towards 2020–Sustainable Cities and Buildings: 3rd Nordic Passive House Conference 7-8 October 2010 Aalborg, Denmark*
- [4] NHBC Foundation 2012. *Overheating in new homes – A review of the evidence*. HIS BRE Press
- [5] Taylor, M. 2014. *Preventing overheating*. Good Homes Alliance, London, United Kingdom
- [6] Department for Communities and Local Government 2012. AECOM “Investigation of overheating in homes”, ISBN 978-1-4098-3592-9
- [7] REHVA 2010. REHVA Guidebook no. 12. *Solar shading – How to integrate solar shading in sustainable buildings*. W. Beck, D. Dolmans, G. Dutoo, A. Hall, O. Seppänen (eds.), Federation of European Heating and Air-conditioning Associations (REHVA), Brussels, Belgium
- [8] Danmarks Statistik 2010. *Flere arbejder hjemme*, <https://www.dst.dk/da/Statistik/bagtal/2010/2010-02-24-Hjemmearbejde> (tilgået november 2018)
- [9] CIBSE 2005. *Climate Change and the Indoor Environment: Impacts and Adaptation*. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), London, United Kingdom
- [10] IEA EBC 2018. IEA EBC Annex 62 – Venticool, The international platform for ventilative cooling, <https://venticool.eu/annex-62-home/> (tilgået november 2018)
- [11] Hutchins, M. 2015. *High performance dynamic shading solutions for energy efficiency and comfort in buildings*, Final Report of the research project “Cost Efficient Solar Shading Solutions in High Performance Buildings”, European Solar Shading Organization
- [12] Veitch, J.A., Galasiu, A.D. 2012. *The physiological and psychological effects of windows, daylight and view at home: Review and research agenda*. NRC-IRC Research Reports RR-325, National Research Council of Canada
- [13] Duffy, J.F., Wright K.P. 2005. Entrainment of the human circadian system by light, *Journal of Biological Rhythms*, 20(4), 326-38
- [14] O’Connor J., Lee E., Rubinstein F. og Selkowitz S. 1998. *Tips for daylighting with windows – The integrated approach*. Lawrence Berkeley National Laboratory report LBNL-39945
- [15] Engelmark, J. 2013. *Dansk Byggeskik, Etagebyggeriet gennem 150 år*, Scanprint, ISBN: 978-87-993249-6-5
- [16] NSG Group, 2018. *Pilkinton glasfakta, Et praktisk hjælpemiddel for valg af bygningsglas*, [https://www.pilkington.com/~/\\_media/Pilkington/Site%20Content/Denmark/Glasfakta/0893\\_Glasfakta2017\\_DK\\_1004\\_komplett.pdf](https://www.pilkington.com/~/_media/Pilkington/Site%20Content/Denmark/Glasfakta/0893_Glasfakta2017_DK_1004_komplett.pdf) (besøgt maj 2019)
- [17] Equa 2019. *IDA Indoor Climate and Energy 4.8.SP1, Dynamic multi-zone simulation application*, EQUA Simulation AB, Stockholm, Sweden
- [18] Wang, P.G., Scharling, M., Wittchen, K.B., Kern-Hansen, C. 2013. *Danish Design Reference Year. Technical Report 13-18*, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark

- [19] Aggerholm, S., Grau, K. 2018. SBI-anvisning 213, Bygningers energibehov, Statens Byggeforskningsinstitut, København, Danmark
- [20] Smith, K.M., Svendsen, S. 2016. The effect of a rotary heat exchanger in room-based ventilation on indoor humidity in existing apartments in temperate climates, *Energy and Buildings*, 116, 349-361
- [21] Vorre, M.H., Wagner, M.H., Maagaard, S.E., Noyé, P., Lyng, N.L., Mortensen, L.H. 2017. Branchevejledning for indeklimaberegninger, Statens Byggeforskningsinstitut, København, Danmark



**DTU Byg**  
Institut for Byggeri og Anlæg

Brovej, Bygning 118  
2800 Kgs. Lyngby  
[www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk)