



Dagslyskvalitet som sundheds- mæssig driver for energirenovering: **2-lags vinduer vs. 3-lags vinduer**

Dagslyskvalitet som sundhedsmæssig driver for energirenovering: **2-lags vinduer vs. 3-lags vinduer**

Forfattere:

Carlo Volf, Region H, NID. Projektleder
Klaus Martiny, Region H, NID
Jakob Markvart, SBI, Aalborg Universitet København
Kjeld Johnsen, SBI, Aalborg Universitet København
Paul Michael Petersen DTU Fotonik
Anders Thorseth, DTU Fotonik
Signe Dunker Svendsen, Region H, NID

Øvrige deltagere og underrådgivere:

Stefan Vestergaard, Rambøll A/S, Bygherrerådgiver
Haderslev Almene Boligselskab, HAB, Bygherre

Fotos og illustrationer:

Forfatterne

Filmformidling:

Volapyk

Grafisk layout:

Grethe Bruun

Forsknings- og udviklingsprojektet er støttet af Elforsk, Dansk Energi, projektnummer 348-018.



Indhold

Forord	4
Resumé af resultater	6
Metode	9
HAB 72 Boliger	14
Resultater	15
Demografi	15
Dagslys	15
Laboratoriemålinger: Lyskvalitet og døgnrytme	20
Laboratoriemålinger: Lyskvalitet og dannelse af D-vitamin	20
Beboernes sundhed	23
Beboernes tilfredshed	24
Indeklima og luft	27
Energiforbrug opvarmning	27
Konklusion – sundhedsmæssig, energimæssig og økonomisk betragtning ...	29

Forord

Projektet tager udgangspunkt i energirenovring af boligbyggeri og ser nærmere på hvordan dagslyskvalitet kan indgå som en sundhedsmæssig driver når det gælder optimering af energiforbrug ved vinduesudskiftning. Målet om at Danmark skal være uafhængigt af fossile brændstoffer i 2050 har skabt fokus på energieffektivisering af byggeriet og det estimeres, at varmemeforbruget i vores bygninger bør reduceres med ca. 40 % frem mod 2050, hvis den grønne omstilling skal ske så omkostningseffektivt som muligt. Især helårsbeboelse opført før 1985 rummer i den forbindelse et stort potentiale, dels fordi disse bygninger udgør knap 67 % af det samlede bygningsareal, og dels fordi de er opført før egentlige krav til bygningers energiforbrug blev indført.

Projektets formål er at se nærmere på hvordan man bedst muligt kan energirenovere sådan en helårsbeboelse fra før 1985. Det sker med henblik på, at kvalificere beslutningstagere, bygherrer og rådgivende parter i valget af vinduer ud fra en samlet helhedsvurdering, hvori også sundhedsmæssige faktorer indgår. Projektet søger på den måde at bidrage med viden til hvordan en helhedsorienteret tilgang kan fremme og forbedre fremtidige energirenovringer, hvor dagslyskvalitet, velvære og sundhed også tilgodeses og indgår i beslutningsprocessen.

Fra de første egentlige energikrav trådte i kraft i 1961 og frem til i dag, er kravene til energiforbrug skærpet markant. Fra krav svarende til ca. 400 W/m² pr. år, til krav på 41 W/m² pr. år i Bygningsreglement 2015/2018. Det svarer til en samlet reduktion på ca. 90 %. Hvis samme høje procentvise besparelse skulle gennemføres igen i dag, ville det kun give en yderligere besparelse på 9 % af den oprindelige besparelse på ca. 360 W/m² pr. år, som Bygningsreglement allerede har skabt. I bestræbelserne på at reducere energiforbruget, vil yderligere besparelser i fremtiden i højere grad drives af andre afledte faktorer end energibesparelser, f.eks. sundhed, indeklima og bæredygtighed, som alle ligger indenfor rammerne af dette projekt.

I de senere år har forskning frembragt ny viden om dagslysets betydning for menneskets velvære og helbred, ligesom der er stigende bevidsthed om dette hos almenbefolkningen. I gennemsnit bruger vi ca. 90 % af tiden i det indendørs miljø. De indendørs omgivelser spiller derfor en vigtig rolle for vores generelle trivsel og sundhed, helt specifikt fordi vores døgnrytme, søvn, humør, samt niveau af D-vitamin, alle stimuleres af naturligt dagslys.

I gennem de senere år har der været fokus på at optimere vinduer og klimaskærm ud fra et ønske om, at reducere energiforbruget. Projektet her fokuserer på dagslyskvaliteten og ser på de udfordringer, som energivinduer kan være med til at skabe når det gælder dagslys og sundhed. I den forbindelse undersøger og synliggør projektet andre parametre som også påvirkes af en vinduesudskiftning.

Samfundsmæssigt er projektet relevant og aktuelt fordi Danmark indenfor de kommende årtier står overfor fornyelse og energirenovierung af en stor del af den samlede boligmasse. Langt den største del af byggeriet vil i fremtiden udgøres af energirenovierungen, primært i form af forbedringer af klimaskærm, facade- og vinduer. I den planlagte renovering af ca. 350.000 boliger i Danmark, vil effektiv energirenovierung i høj grad handle om, at bidrage til en samlet helhedsorienteret besparelse, hvori andre gevinster også inddrages – gevinster som på sigt kan overstige potentielle energimæssige besparelser, også rent økonomisk.

Projektet er det første af sin art der undersøger den sundhedsmæssige effekt ved to almindelige vinduestyper i dag, nemlig vinduer med 2-lag glas og vinduer med 3-lag glas. Med udgangspunkt i renoveringen af et konkret byggeri, Haderslev Almene Boligselskab, bidrager projektet med viden når det gælder valg af vinduestyper og glastyper, samt betydningen af 2- og 3-lags glas i form af Non Energy Benefits (NEB). Projektet henvender sig til alle beslutningstagere, planlæggere og bygherrer der arbejder med fremtidig energirenovierung af boligbyggeri i Danmark.

På projektgruppens vegne ønsker vi at udtrykke en tak til beboerne i Haderslev Almene Boligforening HAB for deres store gæstfrihed. Også en tak til Rambøll, til chefkonsulent Stefan Vestergaard, hvis interesse og engagement i, at samle viden indenfor byggeriet, har været en vigtig forudsætning for projektet. Tak til hovedbestyrelsen i HAB for deres velvilje og opbakning til projektet. Tak til fagfolk indenfor glas- og vinduesbranchen, til Knud-Erik Moselund. Tak til Haderslev Fjernvarme. Og sidst men ikke mindst tak til Elforsk og Jørn Borup og Dorte Lindholm for deres støtte til projektet.

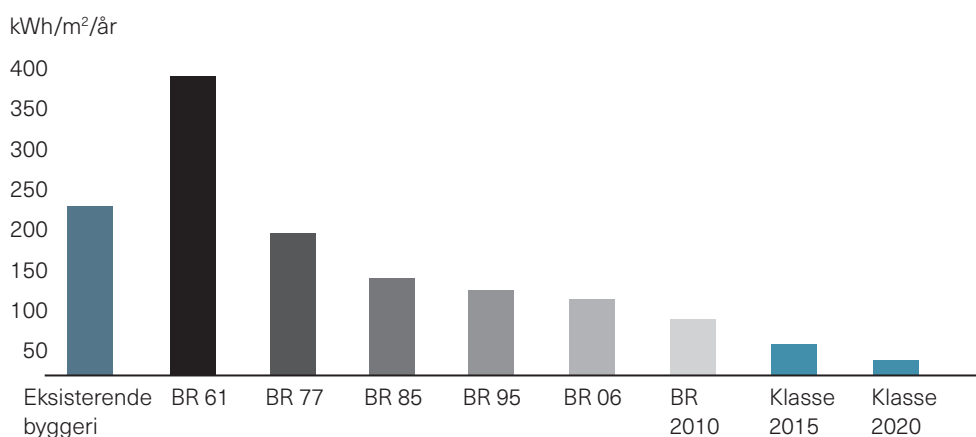


Fig 1. Udvikling i energikrav i perioden 1961 - 2020. Energi + Arkitektur, Solar City

Resumé af resultater

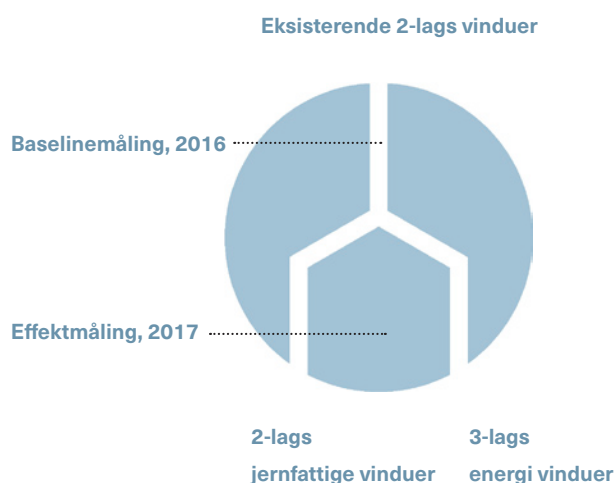
Projektet tager udgangspunkt i HAB, Afd. 20. Ejendommen er opført i 1959 og består af to helt identiske etageejendomme; Kløvervej 66 – 92 og Kløvervej 116 – 142. Energirenoveringen foretages januar – april 2017. Indsamling af data foretages henholdsvis før renoveringen, i perioden september 2016 – januar 2017 (baseline) og efter renoveringen, i september 2017 – januar 2018 (effektmåling).

Igennem to forskellige vinduesløsninger, undersøges hvilke sundhedsmæssige og energimæssige effekter 2-lags og 3-lags glas har og hvilken vinduesløsning – 2-lags eller 3-lags glas – der giver mest værdi set ud fra en samlet helhedsmæssig betragtning.

Projektet undersøger hvordan de to vinduesløsninger påvirker dagslyset og hvordan beboernes tilfredshed og sundhed efterfølgende påvirkes. Andre indeklimamæssige faktorer, såsom CO₂, temperaturer og luftfugtighed undersøges, og endelig undersøger projektet hvordan renoveringen påvirker energiforbruget til opvarmning i de to sammenlignelige etageejendomme.

I projekteringsfasen sker følgende to hovedgreb.

1. Projektet udskifter alle vinduer og døre¹. Alle lejligheder har som udgangspunkt det samme vinduesareal før og efter udskiftningen. Undtagen de store vinduespartier i de SV-vendte facader, som reduceres således, at glasareal/gulvareal reduceres fra 25,5 % til 23,8 % i de største rum i forhold til boliger før renoveringen.
2. Projektet implementerer to forskellige vinduesglastyper i de to identiske etageejendomme og udfører en baselinemåling og en effektmåling, henholdsvis før og efter renoveringen. Se diagram nedenfor.



¹ Undtagen alle hoveddøre

Resultater

Projektets enkelte resultater er kort resumeret i det følgende.

Sociodemografi

- Der er statistisk signifikant forskel når det gælder alder på beboerne i de to etageejendomme. Gennemsnitsalder for beboerne i etageejendom med 3-lags vinduer er 70.5 år, imens den er 57.2 år hos beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer.
- Der er statistisk signifikant forskel når det gælder tilknytning til arbejdsmarkedet. I alt 90 % af beboerne er udenfor arbejdsmarkedet i etageejendom med 3-lags vinduer, imens 55 % af beboerne er udenfor arbejdsmarkedet i etageejendom med 2-lags vinduer.

Lysmålinger

- Dagslysisintensiteten i lejligheder med 2-lags jernfattige vinduer er efter renoveringen signifikant højere (>15 %) målt i forhold til lejligheder med 3-lags vinduer. 2-lags jernfattige vinduer transmitterer UVB-lys imens 3-lags energi glas med to energibelægninger fuldstændigt blokerer for UVB-lyset. Selv 3-lags vinduer med jernfattigt glas transmitterer stort set intet UVB-lys (<0,5 %).
- Målinger viser at 2-lags jernfattige vinduer transmitterer signifikant mere kortbølget lys end 3-lags energiglas (> 20 % mere lys indenfor spektralområdet 460 - 480 nm)

Sundhed

- Resultaterne viser en statistisk signifikant forringelse af søvnkvaliteten hos beboerne i etageejendommen med 3-lags glas. Imens beboere i etageejendommen med 2-lags jernfattigt glas angiver en overordnet numerisk bedre søvnkvalitet.
- Resultaterne viser endvidere en statistisk signifikant udvikling i fordelingen af kronotyper. Beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattigt glas vågner tidligere efter renoveringen og bliver signifikant mere morgentyper end beboerne i ejendommen med 3-lags glas.
- Resultaterne viser at beboere i boliger med 2-lags jernfattigt glas oplever numerisk bedre selvrapporteret humør (WHO-1), vågenhed (daytime alertness), samt indsovningstid (sleep onset latency), imens beboere i boliger med 3-lags energiruder ikke oplever nogen forskel.
- Lysfølsomhed hos beboerne øges i etageejendommen med 3-lags vinduer i forhold til beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer efter renoveringen.

Tilfredshed

- Tilfredsheden med dagslyset og dagslyskvaliteten stiger statistisk signifikant i etageejendom med 3-lags vinduer efter renoveringen, imens tilfredsheden stiger numerisk i etageejendom med 2-lags jernfattige vinduer. Tilfredsheden i etageejendommen med 3-lags vinduer stiger signifikant når det gælder dagslysets karakteristika; klarhed, hudfarve og farver på genstande.
- Beboerne i begge etageejendomme oplever færre dage hvor det er koldt. Især beboerne i etageejendom med 3-lags vinduer, som oplever statistisk signifikant færre dage hvor det er koldt.
- Baseret på resultater af IC-mettermålinger forringes det samlede indeklima i begge etageejendomme efter vinduesudskiftningen. Især faktorer som påvirkes af øget tæthed, som f.eks. luftfugtighed og CO₂, bliver signifikant højere efter vinduesudskiftningen.

Energi

- 3-lags energivinduer giver ingen reduktion i det registrerede energiforbrug til opvarmning i forhold til 2-lags jernfattige vinduer. Energiforbruget til opvarmning i er ens for de to etageejendomme og vinduesglasløsninger.

Andre forhold

- Beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer opholder sig statistisk signifikant flere timer udenfor til hverdag i forhold til beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattige vinduer efter renoveringen. Beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer opholder sig statistisk signifikant flere timer udenfor i weekenden efter renoveringen i forhold til beboerne i etageejendom med 3-lags vinduer. Når det gælder adfærd, opholder beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer sig statistisk signifikant flere timer indendørs på hverdage efter renoveringen i forhold til beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer.
- Resultaterne viser at beboernes tilfredshed med luften i etageejendommen med 3-lags vinduer er uændret efter renoveringen, imens den falder signifikant i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer efter renoveringen
- Beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer rapporterer at de når statistisk signifikant mindre på grund af deres fysiske helbred efter renoveringen og, at de oplever at fysisk helbred eller følelsesmæssige problemer i højere grad vanskeliggør arbejdet og det at se andre mennesker efter renoveringen.

Metode

Metodisk er projektet et kohorte-studie, hvor to forskellige enheder undersøges og sammenlignes, dels før renoveringen (baseline) og dels efter renoveringen (effektmåling). Projektet er bygget op som et eksemplarisk casestudie, baseret på en energirenovering af HAB Afdeling 20 på Kløvervej 66 - 92 og 116 - 142 i Haderslev. Ejendommen er valgt fordi den er repræsentativ for et stort antal ejendomme i Danmark, som i de kommende år skal energirenoveres. Energi-renoveringen udføres i perioden januar 2017 - april 2017 som en udskiftning af eksisterende vinduer (fra 1995). Projektet udskifter vinduerne på to forskellige måder.

Antal	Glas
36 lejligheder	Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas
36 lejligheder	Vinduer med 3-lags standard energiglas

Efterfølgende undersøger projektet igennem dataindsamling hvordan energiforbrug, dagslyskvalitet, samt beboernes tilfredshed og sundhed påvirkes af energirenoveringen. Resultater indsamles dels via målinger og registreringer af dagslys og indeklima on site og i laboratorier, og dels ved hjælp af et særligt udarbejdet spørgeskema, som inkluderer data om demografi, søvnkvalitet, humør, samt tilfredshed med dagslys og indeklima. Forskningsprojektet er godkendt af Datatilsynet.

Beboerne bliver mundtligt og skriftligt informeret om renoveringen. Dels igennem beboermøde og dels igennem arrangerede spørgecafeer før og efter vinduesudskiftningen. På møderne og spørgecafeerne informerer projektgruppen om forskningsprojektet og om, at projektet vil se nærmere på dagslyskvaliteten og dagslysets betydning for beboernes overordnede tilfredshed og sundhed. Beboerne bliver gjort opmærksom på at de vil modtage spørgeskemaer med spørgsmål omkring deres sundhed, og tilfredshed, etc før og efter vinduesudskiftningen. Alle besvarelser indsamles digitalt via surveyxact, og analogt ved uddeling og indsamling spørgeskemaer, suppleret af telefonisk rundspørge hos enkelte beboere. Besvarelserne analyseres efterfølgende med henblik på, at sammenligne effekten af de to vinduesløsninger (effektmåling) i forhold til tidligere eksisterende vinduesløsning (baselinemåling).

En detaljeret registrering af dagslysforhold foretages i fire udvalgte sammenlignelige og repræsentative lejligheder. Alle lysregistreringer foretages ved jævndøgn, henholdsvis d. 20 september 2016 (før vinduesudskiftningen) og d. 20. september 2017 (efter vinduesudskiftningen). Projektgruppen får adgang til de fire testlejligheder igennem formanden for beboerforeningen, efter godkendelse fra hovedbestyrelsen i Haderslev Almene Boligselskab, HAB. Dataindsamling i testlejlighederne sker igennem registrering af dagslyskvalitet (belysningsstyrke og spektralfordeling) samt indeklima (temperatur, relativ luftfugtighed og CO2). Data indsamles henholdsvis før og efter udskiftningen.

Energiforbrug til opvarmning registreres før og efter vinduesudskiftningen, baseret på tabeller over varmekonsum fra Haderslev Fjernvarme. Ud fra dataindsamlingen sammenligner projektet det generelle energiforbrug, dagslysforhold, samt beboernes generelle sundhed og tilfredshed, henholdsvis før og efter energirenoeringen.

Dagslysplanlægning – en ny metode

Planlægningen af dagslys i lejlighederne er baseret på Ph.D.-afhandlingen "Lys, arkitektur og sundhed – en metode", Arkitektskolen Aarhus (Volf C, 2013). Planlægningen tager udgangspunkt i at balancere vinduesåbninger i forhold til sollyset med henblik på, at optimere dagslysets sundhedsmæssige effekter uden at gå på kompromis med de energimæssige krav til byggeriet. Metoden er udviklet og anvendt indenfor hospitalsbyggeri, og tidligere anvendt på Ny Herlev Hospital og Ny Psykiatrisk Center Ballerup, men i dette projekt udvides og testes metoden til også, at kunne anvendes indenfor energirenoering af alment boligbyggeri på helt almindelige økonomiske markedsvilkår.

Etablering af vinduesareal

I projekteringen af lejlighederne ændres åbningsgraden af de store vinduespartier mod SV. De store SV-vendte vinduespartier bliver samtidigt ført tilbage til den oprindelige deling med et stort, tophængt midterparti og to sidehængte sidepartier, men som noget nyt bliver alle vinduesfag inddelt horisontalt med mindre vinduesfag øverst (til naturlig ventilation) og det ene sideparti bliver blændet med et blændparti i cortenstål. På den måde reduceres glasarealerne i alle SV-vendte rum, i det største rum på 22 m² svarer reduktionen til, at glasareal i forhold til gulvareal bliver reduceret fra 25,5 % og til 23,8 %. En reduktion på i alt 0,38 m²; fra 5,61 m² til 5,23 m². Det overholder stadigvæk dagslyskraverne i Bygningsklasse 2015, men reduktionen betyder at vinduespartierne fra, at være meget store, bliver bedre balanceret i forhold til rummernes størrelse og i forhold til den eksterne varmelast fra solen.

I valg af karm-ramme-konstruktion vælger bygherre vinduesudbud ud fra to krav; 1) billigst i udbud 2) leverance af både 2-lags og 3-lagsvinduer med samme karm-ramme-konstruktion. På disse udbudsbetingelser bliver resultatet en vinduestype med en glasandel, F_g på 0,71. Det er noget mindre end den oprindelige F_g på 0,8 som projektgruppen ønskede fra starten i udbudsmaterialet. For at kompensere for den dårligere F_g -værdi vælges, at reducere afskærmning (sidepartiet) i vinduespartiet fra $A = 1,22$ m² til $A = 0,79$ m². På den måde lykkedes det, at bibeholde samme dagslysmængde, men til en billigere økonomi, baseret på en kraftigere og billigere karmramme-konstruktion end oprindeligt planlagt. Haderslev Almene Boligforening får med andre ord, den samme mængde dagslys, men med lavere omkostninger.

v test vintersolhverv kl. 15.45



v kontrol vintersolhverv kl. 15.45



Fig 2. Store SV-vendte vinduespartier planlægges ud fra Ph.D.-afhandlingen "Lys, arkitektur og sundhed – en metode", Arkitektskolen Aarhus 2013.



Fig 3. Rudetyper. 2-lags energirude med jernfattigt glas (tv) og 3-lags standard energirude (th) i midten 3-lags energirude med jernfattigt glas som supplerende reference i laboratiormålinger



Fig 4. Rudetyper. 2-lags energirude med jernfattigt glas (th) og 3-lags standard energirude i midten. 3-lags energirude med jernfattigt glas som supplerende reference i laboratiormålinger (tv)

I boligerne projekteres følgende to specifikke rudetyper:

Rudetype	Glas 1	Gas	Glas 2	Gas	Glas 3	Lt	G	U	RA
1.Climaplus	4 mm diamant	16 mm Ar 90%	Planitherm 4 mm diamant	-	-	0,82	0,75	1,20	99
2.Climatop	4 mm Planiclear Planitherm xn	16 mm Ar 90%	4 mm Planiclear	18 mm Ar 90%	Planitherm xn 4 mm Planiclear	0,74	0,56	0,53	97

Måling af spektralfordeling og lysintensitet

I alle udvalgte testlejligheder måles lysintensitet og spektralfordeling (horisontalt) ved 0m, 1m, 2 m og 3m ud fra vinduespartiet i lejlighedens største rum. Målinger foretages med to ens instrumenter af typen Mettler Inc SIM-2 Plus Spectral Irradiance Meter (Hayward, CA 94545, USA). Alle målinger foretages samtidigt for hver afstand i to sammenlignelige lejligheder i henholdsvis den sydligt og nordligt beliggende etageejendom. Målingerne af dagslys foregår manuelt ved hjælp af målepunkter i 0.8 m højde i alle testlejlighederne. Referencemåling foretages udenfor i de grønne områder mellem de to etageejendomme. Alle udemålinger foretages med Giga-Hertz Optik BTS256 spektrometer. Alle målinger foretages ved efterårsjævnendøgn og kunstlyset er slukket ved alle målinger.

IC-metre

Indeklimamålinger sker ved hjælp af IC-metre. IC-metrene fastmonteres på væg i det største rum, svarende til en SV-vendt stue i alle testlejligheder. IC-metre placeres i stikkontakt og registrerer temperaturer, CO₂, relativ luftfugtighed samt støj. Dataindsamling sker online med fem minutters interval igennem fyringssæsonen, både før og efter renovering. Data for en repræsentativ uge udtages og analyseres henholdsvis før og efter renovering. Alle målinger foretages med IC-meter enheder af typen: GSM version 4.2.

Surveyxact

Beboernes demografi, sundhed, samt tilfredshed med dagslys og indeklima registreres ved hjælp af et særligt udarbejdet digitalt og analogt spørgeskema. Spørgeskemaet uddeles til alle boliger. Besvarelserne af spørgeskemaer indsamles ved hjælp af databehandlingsprogrammet surveyxact, udviklet af Rambøll A/S. Spørgeskema kan ses på www.psykiatri-regionh.dk/nid-group

Registrering af energiforbrug

Registrering af varmekonsumet sker i samarbejde med Haderslev Fjernvarme. Energiforbruget til opvarmning i kWh/m² udarbejdes for hver af de to etageejendomme, henholdsvis 5 år før renoveringen og året efter renoveringen. I registreringen af energiforbruget indgår kun varmekonsum. Projektet ser ikke på strømforbrug til kunstlys. Igennem fotografiske optagelser af hver etageejendom registreres hvornår kunstlyset tændes i de enkelte lejligheder før og efter renovering v. jævnendøgn (20./21. september) j.f. filmen "Dagslyskvalitet som sundhedsmæssig driver for energirenovering", men denne registrering kan dog ikke bruges til at sige noget konkret om ændringer i elforbruget til kunstlys før og efter renoveringen.

Måleplan

Dagslysregistrering synkroniseres ved alle on site målinger ved hjælp af mobil kontakt. Målemetoden muliggør helt præcis registrering af dagslyset i de enkelte lejligheder, i forhold til lyset udenfor, både før og efter vinduesudskiftningen. Lejligheder med 2-lags vinduer kan på den måde sammenlignes med lejligheder med 3-lags vinduer ud fra de eksisterende dagslysforhold.

Målinger	Samtidige målinger	Rækkefølge, afstand fra vindue, m	Tidspunkt i forhold til renovering
Lysintensitet måles vandret H = 0.8 m i største rum, m. samtidig ekstern lysmåling	Ja	0, 1, 2, 3	Før/efter
Indeklima måles med IC meter H = 1.2 m i største rum	Ja	Løbende	Før/efter
Surveyxact	-	Løbende	Før/efter
Årligt energiforbrug	-	Til sidst	5 år før/efter

Laboratoriemålinger

Glaskvalitet og spektral lystransmittans måles uafhængigt i kontrollerede omgivelser i et lyslaboratorium på DTU Fotonik. Alle laboratoriemålinger foretages med Cary 50 spektrofotometer fra Agilent Technologies.

Statistisk analyse

Data gennemgås og analyseres systematisk for de beboere der har boet i etageejendommene både før og efter renoveringen. Det drejer sig om i alt 34 beboere, fordelt på 17 beboere i henholdsvist etageejendom med 3-lags vinduer og 17 beboere i etageejendom med 2-lags vinduer. Sociodemografiske variable analyseres i en uparret t-test eller non-parametrisk test, alt afhængigt af om data er normalfordelte. Alle sammenligninger imellem etageejendomme er baseret på en nominal, logistisk regressionsanalyse med baseline kontrol.

HAB 72 boliger

Afdeling 20 i HAB består af to identiske 3-etages ejendomme opført i 1959, på hver etage er 12 lejligheder. De i alt 72 lejligheder udgør et samlet brutto-areal på 5.580 m² fordelt på følgende måde.

Antal	Antal rum	Areal	Forbrug (aconto)	Boligtype
24 stk.	2	70 m ²	400 DKK	Familiebolig
12 stk.	2	71 m ²	347 DKK	Familiebolig
12 stk.	3	84 m ²	456 DKK	Familiebolig
13 stk.	3	85 m ²	500 DKK	Familiebolig
11 stk.	4	85 m ²	500 DKK	Familiebolig

Projektering og renovering planlægges af forskningsgruppen i tæt samarbejde med Rambøll A/S. Ud af 72 boliger, renoveres 36 boliger med 2-lags jernfattede vinduer, imens 36 boliger renoveres med 3-lags energi-vinduer. Alle afdelingens 72 lejligheder indgår i projektet.

Resultater

Demografi

Demografiske analyser foretaget før og efter renoveringen viser, at der er signifikant forskel i gennemsnitsalder imellem beboerne i de to etageejendomme. Gennemsnitsalder i etageejendom med 3-lags glas er 70.5 år (Std Dev = 19.7) og 57.2 år (Std Dev = 21.6) i etageejendom med 2-lags glas ($P = 0,02/\chi^2 = 5.9$). Tilknytningen til arbejdsmarkedet er også signifikant forskellig for de to etageejendomme. I etageejendom med 3-lags energiglas er 9.1 % af beboerne tilknyttet arbejdsmarkedet, imens 45.5 % af beboerne er tilknyttet arbejdsmarkedet i etageejendommen med 2-lags jernfattede glas ($P = 0,002/\chi^2 = 11.0$). Analyserne viser ellers ingen statistisk signifikante, demografiske forskelle imellem de to etageejendomme.

Dagslys

Resultaterne af målingerne i testlejligheder efter energirenoveringen (Fig 7) viser at der er signifikant højere dagslysintensitet ($>15\%$) i lejlighederne i etageejendommen med 2-lags jernfattede glas end i etageejendom med 3-lags energiglas. Også når der korrigeres for forskelle i mellem de to etage ejendomme i baselinemålingen. Udskiftning fra eksisterende vinduer u. energibelægning (1995) til 3-lags energivinduer giver en markant reduktion i dagslysmængde. Udskiftning til 2-lags jernfattede vinduer med energibelægning giver en anelse højere dagslysintensitet. Omend kravet om energibelægning reducerer lystransmittansen generelt og betyder, at jernfattede 2-lags glas med energibelægning stort set svarer til eksisterende 2-lags glas uden energibelægning. Reduktionen sker primært i det kortbølgede og langbølgede område med mindst reduktion i det synlige område. Der er afvigelser i enkelte lysmålinger især for målinger foretaget efter renoveringen. Det skyldes at det ikke var et jævnt skydække (overskyet CIE himmel) og derfor ikke ideelle lysforhold til at foretage dagslysmålinger.

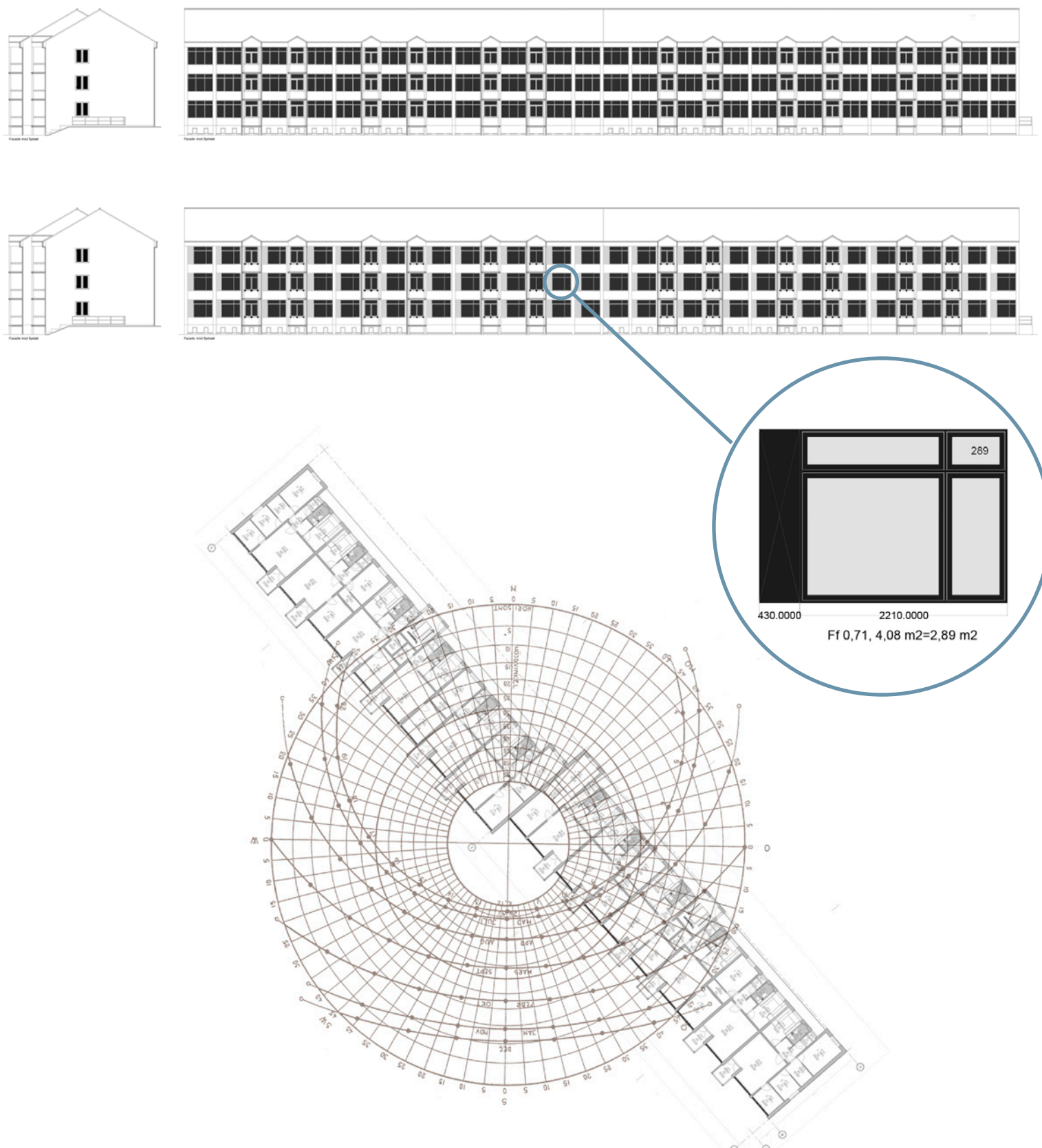


Fig 5. Oprindelig opstalt af Afdeling 20 som er opført i 1959 (ø) og siden renoveret i forskningsprojektet her i 2017 (m). Skitser på reduktion af glasareal i de store SV-vendte vinduespartier (n)

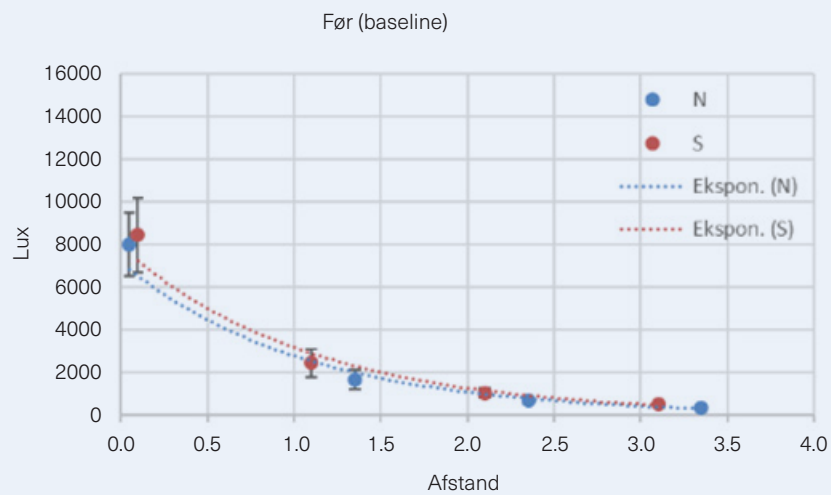


Fig 6. Lysregistrering, baseline d. 20.09.2016. Hvert punkt er gennemsnit med tilhørende standard afvigelser af målingerne fra fire testlejligheder. Alle målinger er foretaget i to sammenlignelige testlejligheder i henholdsvis etageejendom N og S (eksisterende 2-lags glas)

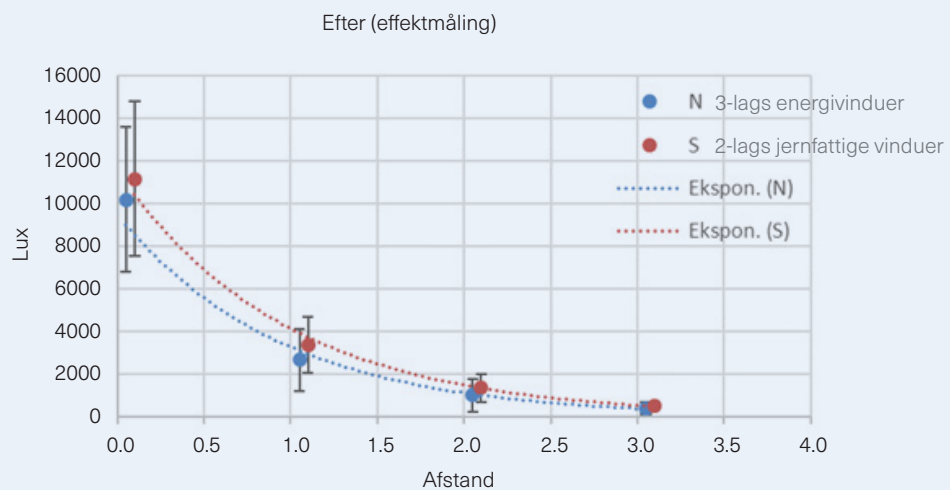


Fig 7. Lysregistrering, effektmåling d. 20.09.2017. Hvert punkt er gennemsnit med tilhørende standard afvigelser af målingerne fra fire testlejligheder. Alle målinger er foretaget i to sammenlignelige testlejligheder i henholdsvis etageejendom N (3-lags energiglas) og S (2-lags jernfattigt glas)



Fig 8. Fordeling af dagslysfaktorer i 3-vær lejlighed på 70 m². Øverst: Eksisterende 2-lagsvinduer (baseline). Midterst: 2-lags jernfattige vinduer. Nederst: 3-lags energivinduer

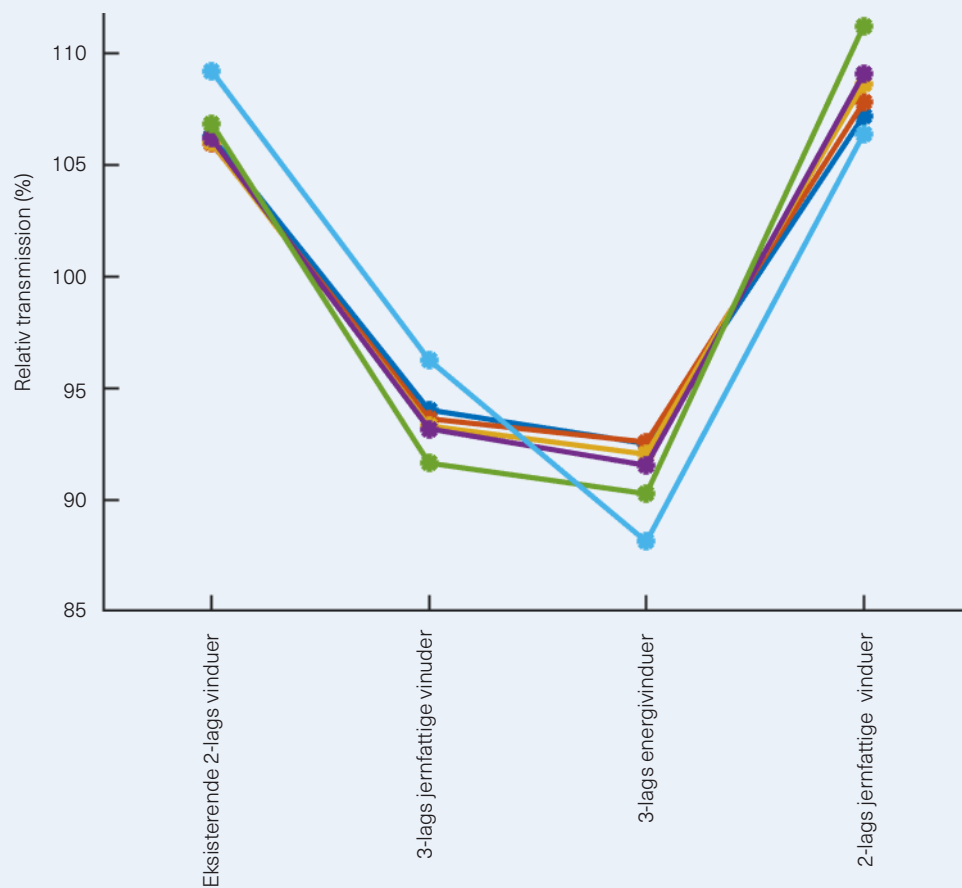
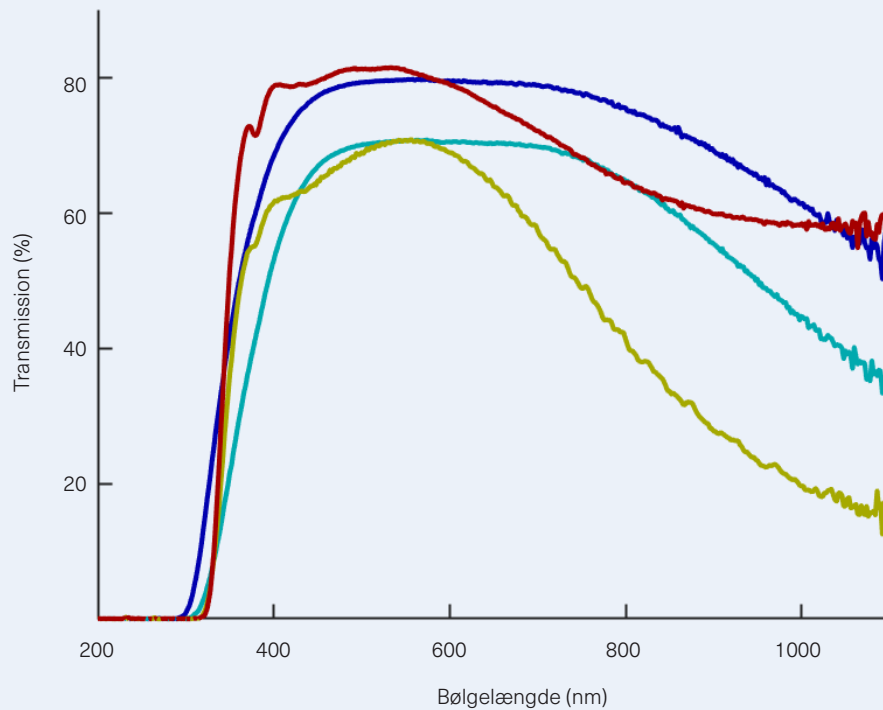


Fig. 9. Øverst: Samlet lystransmittans for henholdsvis 2-lags jernfattigt glas (blå), 3-lags energiglas (gul) 3-lags jernfattigt glas (grøn), eksisterende glas (rød). Nederst: Vægtet lystransmittans i forhold til optimal lysfølsomhed for de fem forskellige retinale celler. Målt for henholdsvis eksisterende glas, 3-lags jernfattigt glas, 3-lags energiglas, samt 2-lags jernfattigt glas. Melanoptisk receptor (lilla), cyanoptisk receptor (grøn), kloroptisk receptor (rød), erytropisk receptor (blå) samt rodoptisk receptor (gul)

Laboratoriemålinger: Lyskvalitet og døgnrytme

I laboratoriemålingerne måles de melanoptiske værdier i henhold til artiklen *Measuring and Using Light in the Melanopsian Age*². I målingerne benyttes de nye fotometriske enheder svarende til a-opisk lux. Disse enheder er tilvejebragt for at hjælpe med, at placere målingerne i en kontekst, der er mest anvendt af biologiske forskere, nemlig som vægtede Lux-værdier for hver af de 5 fotopigmenter i det menneskelige øje. Det resulterer i fem værdier svarende til de enkelte retinale foto-receptorer: Cyanopisk S kegle 419,0 sc Nsc. Melanopisk Melanopsin 480,0 z Nz. Rhodopisk Rod 496,3 r Nr. Kloropisk M kegle 530,8 Nmc. Erythropic L kegle 558,4 lc Nlc.

Målingerne viser at mængden af kortbølget lys reduceres signifikant ved 3-lags vinduesløsningen. Resultaterne viser at 2-lags jernfattige vinduer transmitterer mest kortbølget dagslys, ca. 20 % mere kortbølget dagslys end 3-lags energivinduer, ligesom 2-lags jernfattige vinduer også transmitterer mere dagslys end de eksisterende vinduer.

Laboratoriemålinger: Lyskvalitet og dannelse af D-vitamin

I lyslaboratoriet analyseres glastransmittans i UVB-området (290 - 315 nm), som er det aktive spektralområde når det gælder dannelse af D-vitamin. Efterfølgende estimeres en median for sommerperioden (april-oktober) for at lave en sammenligning i forhold til Standard Erythemat Dose (SED)³.

Resultaterne af laboratoriemålingerne viser følgende:

- 2-lags vinduer med jernfattigt glas transmitterer ca. 5 % UVB-lys fra 300 nm - 315 nm.
- 3-lags vinduer med jernfattigt glas transmitterer <0.5 % UVB-lys.
- 3-lags vinduer med energiglas transmitterer 0 % UVB lys.

Ud fra disse resultater blokerer 3-lags energiglas altså for UVB-lyset (300 nm – 315 nm). Selv 3-lags ruder med jernfattigt glas blokerer overraskende langt hovedparten af UVB-lyset, så kun <0.5 % transmitteres, samtidigt med at dagslyskvaliteten reduceres (Fig. 9). Resultaterne viser at 3-lags glas, uanset kvaliteten, har en overraskende negativ effekt på den naturlige dagslyskvalitet og virker som en effektiv barriere imellem UVA- og UVB-lys, alene på grund af det 3. lag glas. Overraskende betyder dette at ikke kun glaskvalitet – men også antal lag glas – i teorien kan betyde forskellen på hvorvidt vi kan komme til at lide af D-vitaminmangel eller ej.

En beboer der opholder sig i en lejlighed med 2-lags jernfattige vinduer eksponeres for UVB-lys i spektralområdet 300 - 315 nm, som svarer til ca. halvdelen af UVB-lysets fulde spektrum, der ligger indenfor 285 - 315 nm. Det vurderes derfor at ca. 5 % gange med 50 % svarende til 2.5 % af det D-vitamin producerende lys transmitteres igennem et 2-lags jernfattige vindue.

² Measuring in the Melanopsian Age. Robert J Lucas¹, Stuart N Peirson^{†2}, David Berson³, Timothy Brown¹, Howard Cooper⁴, Charles A Czeisler⁵, Mariana G Figueiro⁶, Paul D Gamlin⁷, Steven W Lockley⁵, John B O'Hagan⁸, Luke L A Price^{†8}, Ignacio Provencio⁹, Debra J Skene¹⁰, George Brainard¹¹. 2016

³ Standard Erythemat Dose (SED, J.m-2) svarer til udsættelse for 100 J.m-2 i området 290 - 315 nm

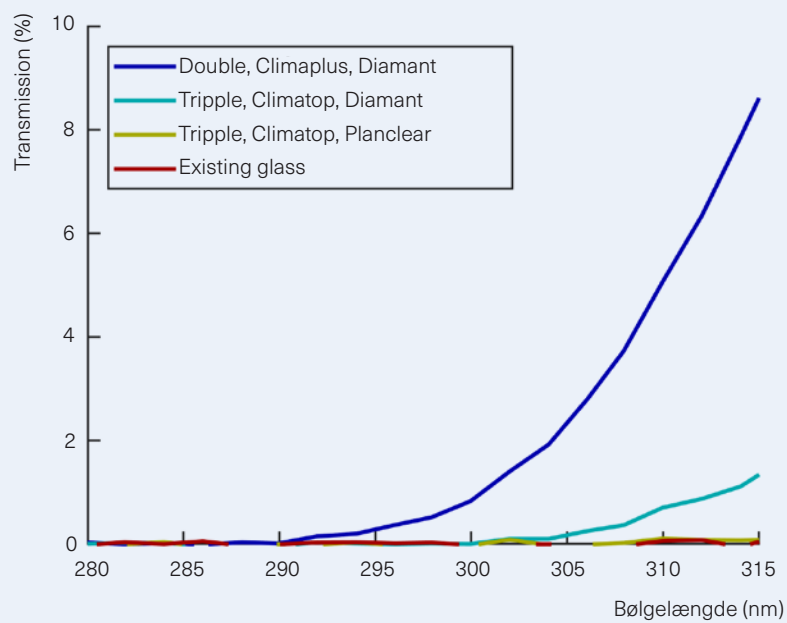
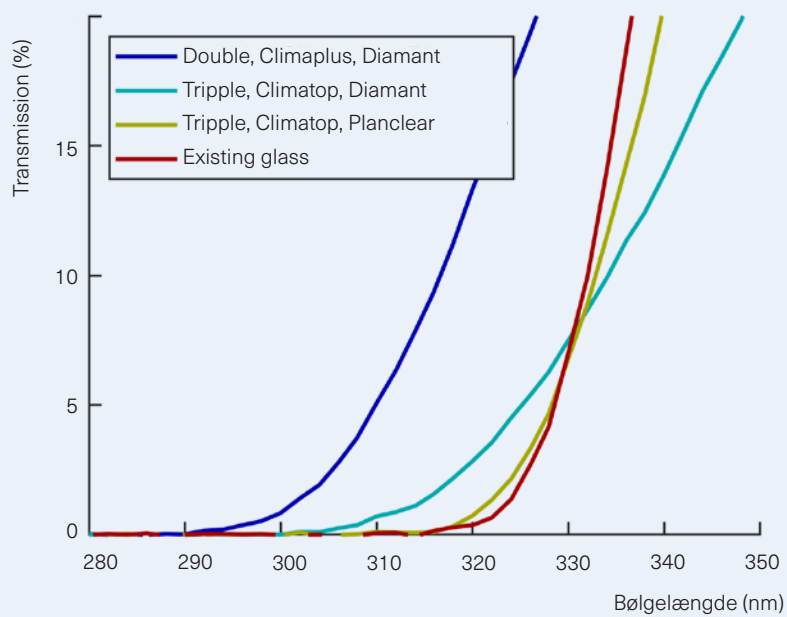


Fig 10. Lystransmittans for tre glastyper som funktion af bølgelængden for hele det spektrale UVB-området 280 – 315 nm, som stimulerer D-vitamin produktion. Målt for henholdsvis 2-lags jernfattigt vindue (blå), 3-lags jernfattigt vindue (orange) og 3-lags energivindue (grå). Lystransmittans for tidligere 2-lags-vindue (gul)

I sommerperioden er UVB intensiteten i Danmark på en typisk dag $0,5 \text{ W/m}^2$. Derfor vil intensiteten igennem et 2-lags jernfattigt vindue være ca. $0,5 \text{ W/m}^2 \times 0,025 = 0,0125 \text{ W/m}^2$. I løbet af en time vil dosis igennem vinduet være $D = 0,0125 \text{ W/m}^2 \times 3600 \text{ s} = 45 \text{ J/m}^2 = 0,45 \text{ SED}$. Bøgh et al. viser, at 1 SED pr. 14 dag ved bestråling af 88% af kroppen vil give den nødvendige D-vitamin for sommerhalvåret. Derfor skal en person som sidder bag ved vinduet og som får bestrålet 20% af kroppen, sidde i $1/0,45 \times 4,4 \times 1 \text{ timer} = \text{ca. } 10 \text{ timer}$ hver 14 dag. Det svarer til omkring 1 time pr dag for at få dækket D-vitamin behovet. I praksis vil 2-3 timer være mere realistisk fordi intensiteten af UVB lyset vil aftage hvis personen ikke sidder tæt på vinduet.

Den gængse anbefaling for D-vitamin lyder på 50 nanogram per milliliter blod og som absolut minimum 25 ng/ml. En tommelfingerregel siger, at en dansker mister ca. ét nanogram om ugen igennem vinter-perioden. Lægger man ud med en koncentration på 50 i blodet i september måned, vil man derfor efter ca. 31 uger – i slutningen af april – typisk have et underskud sidst på vinteren, svarende til 19 ng/ml D-vitamin. Men hvis en person udsættes for mere UVB-lys i løbet af sommer/efterårsperioden og i stedet starter fra f.eks. 75 ng/ml i sommerperioden, vil de i stedet have 56 ng/ml sidst på vinteren og altså ikke lide af D-vitamin-mangel.

Beboernes sundhed

Resultaterne viser, at der er signifikant forskel i søvnkvaliteten hos beboerne i etageejendommen med 3-lags glas i forhold til beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattigt glas: Beboere i etageejendommen med 3-lags energivinduer angiver en statistisk signifikant dårligere overordnet søvnkvalitet efter renoveringen. Imens beboere i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer angiver en numerisk, men ikke statistisk signifikant forbedring af deres overordnede søvnkvalitet.

Søvnkvalitet (score 0-3 med 3 = meget god)	Før	SD	Efter	SD	P = 0.005 $\chi^2 = 7.9$
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	1.59	0.62	1.69	0.70	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	2.21	0.80	1.64	0.93	

Resultaterne viser signifikant forskel i fordelingen af kronotyper før og efter renovering. Beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattige vinduer oplever at de vågner tidligere og er signifikant tidligere morgentyper ("morgenmennesker") efter renoveringen, imens beboere med 3-lags energivinduer ikke oplever en signifikant ændring.

Morgentyper (score 0-3 med 3 = aftenmenneske)	Før	SD	Efter	SD	P = 0.03 $\chi^2 = 5.0$
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	1.41	1.12	0.81	0.98	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	1.06	0.88	1.00	0.78	

Resultaterne viser en numerisk ikke-signifikant forskel i selvrapporteret humør (WHO-1). Beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer oplever bedre humør, imens beboerne i etageejendommen med 3-lags energivinduer oplever dårligere humør.

WHO-1 (score 0 – 5 med 5 = hele tiden)	Før	SD	Efter	SD	Non-signifikant
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	3.76	1.21	3.82	0.95	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	4.00	0.88	3.75	1.0	

Beboerne i etageejendommen med 2-lags jernfattige vinduer angiver at de er mere vågne i dagtimerne, om end dette ikke er statistisk signifikant.

Daytime Sleepiness (score 0 – 3 med 3 = flere gange)	Før	SD	Efter	SD	Non-signifikant
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	0.47	0.62	0.38	0.81	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	0.08	0.28	0.08	0.28	

Beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattige vinduer angiver at de falder ca. 8 minutter hurtigere i søvn efter renoveringen (sleep onset latency), imens beboerne i etageejendom med 3-lags glas falder lidt langsommere i søvn, men dette er ikke statistisk signifikant.

Sleep Onset Latency (i minutter)	Før	SD	Efter	SD	Non-signifikant
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	30.1	28.7	22.6	24.0	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	20.7	18.3	22.1	20.5	

Herudover viser resultaterne en numerisk, men ikke signifikant, forskel i antallet af sygedage indenfor de seneste 3 måneder. Beboerne i etageejendom med 2-lags glas har færre sygedage end beboerne i etageejendom med 3-lags energivinduer (12.8 dg før/11.9 dg efter vs 10 dg før/15.8 dg efter). Generelt viser resultaterne at livskvaliteten er høj i boligforeningen, med en samlet WHO-5 score > 70. Ud fra ovenstående ses et sammenfaldende mønster i data, der viser en påvirkning af søvn og døgnrytme. Af disse er det dog kun søvnkvaliteten og morgentype der er viser en statistisk signifikant forskel.

Beboernes tilfredshed

Resultaterne viser statistisk signifikante forskelle i beboernes tilfredshed med dagslyset. Tilfredsheden stiger signifikant hos beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer, imens tilfredsheden stiger numerisk hos beboerne med 2-lags jernfattige vinduer. Tilfredsheden med dagslysets karakteristika er signifikant højere hos beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer når det gælder klarhed, farver på genstande samt hudfarve.

Tilfredshed med dagslyset (score 0 - 5 med Før SD Efter SD P = 0.03 χ^2 = 4.9 5 = meget tilfreds)	Før	SD	Efter	SD	P = 0.03 χ^2 = 4.9
Vinduer med 2-lags jernfattigt energiglas	4.25	0.77	4.00	0.95	
Vinduer med 3-lags standard energiglas	3.86	0.66	4.44	0.63	

Når det gælder tilfredshed med indeklimaet viser resultaterne, at beboerne i begge etageejendomme oplever færre dage hvor det er koldt efter renoveringen. Især beboerne i etageejendom med 3-lags vinduer, som oplever statistisk signifikant færre dage hvor det er koldt. (Mean = 0.63/SD = 0.5, ud fra en score fra -1 til 1, med 1 = Jeg oplever færre dage hvor det er for koldt og -1 = Jeg oplever flere dage hvor det er for koldt) i forhold til beboerne i etageejendom med 2-lags glas (Mean = 0.13/SD = 0.5), (P = 0.01, χ^2 = 6.0).

Resultaterne viser statistisk signifikant forskel i beboernes tilfredshed med luften. Imens beboernes tilfredshed med luften i etageejendom med 3-lags vinduer er ens før og efter renoveringen, falder tilfredshed med luften i etageejendommen med 2-lags vinduer fra 3.6/SD = 1.21 til 2.8/SD = 1.61, score 0 - 5

med 5 = meget tilfreds ($P = 0.005$, $\chi^2 = 7.9$). Resultaterne viser endvidere at lysfølsomheden hos beboerne i etageejendom med 3-lags vinduer øges signifikant i forhold til beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattede vinduer efter renoveringen. Fra 0.40/SD = 0.51 til 0.57/SD = 0.51, score fra 0 til 1, med 1 = ja, jeg er specielt følsom over for stærkt lys. ($P = 0.03$, $\chi^2 = 4.5$)

Herudover viser resultaterne at beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattede vinduer ikke er mere generet af solvarme (ekstern varmelast) efter renoveringen end beboerne i etageejendom med 3-lags energi vinduer.

Reduceringen af vinduesåbningerne har ikke negativ effekt på den overordnede tilfredshed med dagslyset. I stedet viser resultaterne overraskende mere positiv tilfredshed med dagslyset og at flere beboere rent faktisk oplever at deres bolig er blevet lysere efter renoveringen. Der er en tendens til at beboerne i begge etageejendomme generelt rapporterer om øget tilfredshed med dagslys, temperatur og indeklimaforhold som følge af renoveringen.

Andre forhold

Resultaterne viser forskelle imellem beboerne i de to etageejendomme når det gælder beboernes adfærd efter renoveringen. Beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer opholder sig statistisk signifikant flere timer udenfor til hverdag efter renoveringen. Fra 2.9 timer/SD = 1.20 til 4.5 timer/SD = 2.64 ($P = 0.02$ og $\chi^2 = 5.9$), imens beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer opholder sig statistisk signifikant flere timer indendørs på hverdage efter renoveringen. Fra 4.3 timer/SD = 2.63 til 5.8 timer/SD = 3.26 ($P = 0.06$, $\chi^2 = 3.4$). I weekender opholder beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer sig statistisk signifikant flere timer udenfor efter renoveringen. Fra 5.3 timer/SD = 3.26 til 5.6 timer/SD = 3.83 ($P = 0.0001$, $\chi^2 = 19.9$).

Beboerne i etageejendommen med 2-lags vinduer rapporterer at de har nået mindre end de gerne ville på grund af deres fysiske helbred efter renoveringen. Fra -0.41/SD = 0.51 til -0.63/SD = 0.50, score -1 til 0 med -1 = jeg har nået mindre ($P = 0.005$, $\chi^2 = 7.8$). Beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer oplever at fysiske smerter i højere grad har vanskeliggjort deres daglige arbejde efter renovering. Fra -1.1/SD = 1.17 til -1.7/SD = 1.20, score -4 til 0 med -4 = virkelig meget ($P = 0.01$, $\chi^2 = 6.4$). Endelig rapporterer beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer at de har vanskeligere ved, at se andre mennesker på grund af deres fysiske helbred eller følelsesmæssige problemer efter renoveringen. Fra 0.8/SD = 1.35 til 1.0/SD = 0.89, score 0 - 4 med 4 = hele tiden ($P = 0.03$, $\chi^2 = 4.5$).

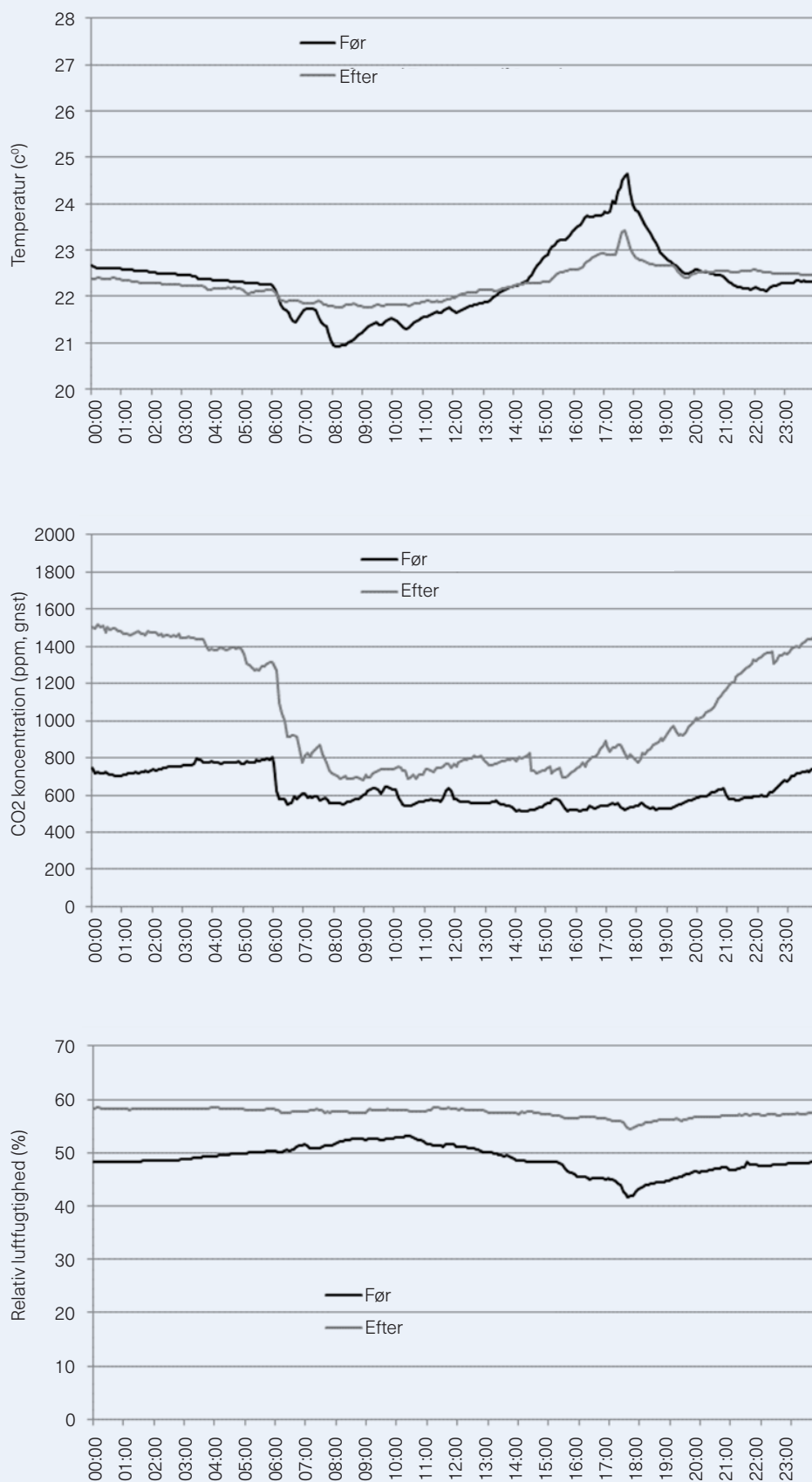


Fig 11. Målinger af temperaturer, fugt og CO2 i testlejligheder henholdsvis før og efter renoveringen af begge etageejendomme

Indeklima og luft

Baseret på IC-metermålinger af temperatur, relativ luftfugtighed og CO₂, må det konstateres, at det samlede indeklima forringes på flere punkter efter vinduesudskiftningen i begge etageejendomme. Især når det gælder faktorer som forårsages af øget lufttæthed; relativ luftfugtighed og CO₂, der begge bliver signifikant højere efter vinduesudskiftningen. Problemet skyldes, at de nye vinduer, ligesom indbygningsfuger, etc, er mere tætte for at overholde de skærpede tæthedskrav. De nye vinduer reducerer derfor den samlede luftinfiltration betydeligt. Hverken øgede muligheder for naturlig ventilation (ved indtræk fra sidehængte vinduespartier og aftræk under dørparti ved toiletter) eller mikroventilation (i testlejlighed) ser ud til at afhjælpe problemet. Dette er måske ikke så overraskende, men rent sundhedsmæssigt er det yderst problematisk, og indikerer, at vinduesudskiftninger skal følges op af informationsmateriale til beboerne om, at der vil være større behov for udluftning, og at alle udeluftventiler bør holdes åbne.

Energiforbrug opvarmning

Ændringer i energiforbruget til opvarmning i de to etageejendomme som følge af renoveringen er kortlagt hos Haderslev Fjernvarme. Sammenlignes varmemeforbruget efter energirenoveringen med forbruget i de seneste 4 år, kan det ses, at forbruget reduceres med ca. 20 MWh/år i begge etageejendomme. Vinduer med 3-lags energiruder og vinduer med 2-lags jernfattige energiruder giver altså overraskende nok samme reduktion i det registrerede energiforbrug til opvarmning. Resultaterne peger på at ældre bygninger ikke får den beregnede energimæssige gevinst ved 3-lags ruder. Figur 12 viser varmemeforbruget (opvarmning og varmt brugsvand) for de seneste 5 opvarmningssæsoner (juli - juni). I forhold til de foregående 4 sæsoner falder varmemeforbruget i etageejendommen med 3-lags energiglas med 8,6 %, mens det i etageejendommen med 2-lag jernfattigt glas falder med 6,5 %. Sammenlignes sæsonen 2017-18 med sæson 2016-17, er reduktionerne henholdsvis 9,4 % og 11,0 %, og altså størst i etageejendommen med 2-lags jernfattigt glas. Selv ved en relativt høj glasareal/gulvareal ratio som her (>25 %) giver 3-lags energiruder overraskende nok ingen forøget energibesparelse i forhold til 2-lags jernfattige energiruder. Den faktiske energibesparelse der direkte skyldes vinduesudskiftningen, er vanskelig at anslå, da en del af energireduktionen skyldes den forøgede tæthed, og altså sker på bekostning af luftkvaliteten (forøget CO₂ og forøget relativ luftfugtighed).

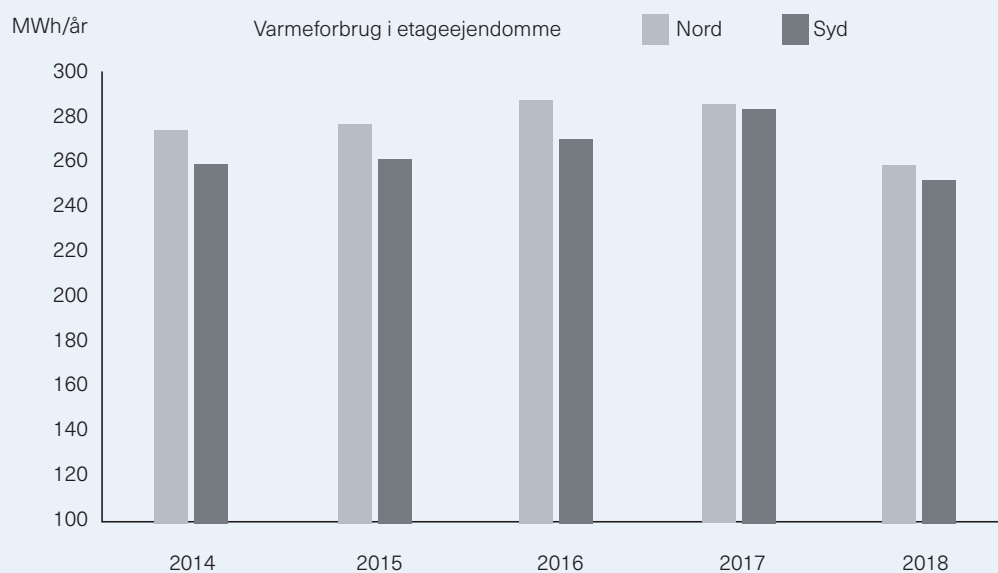
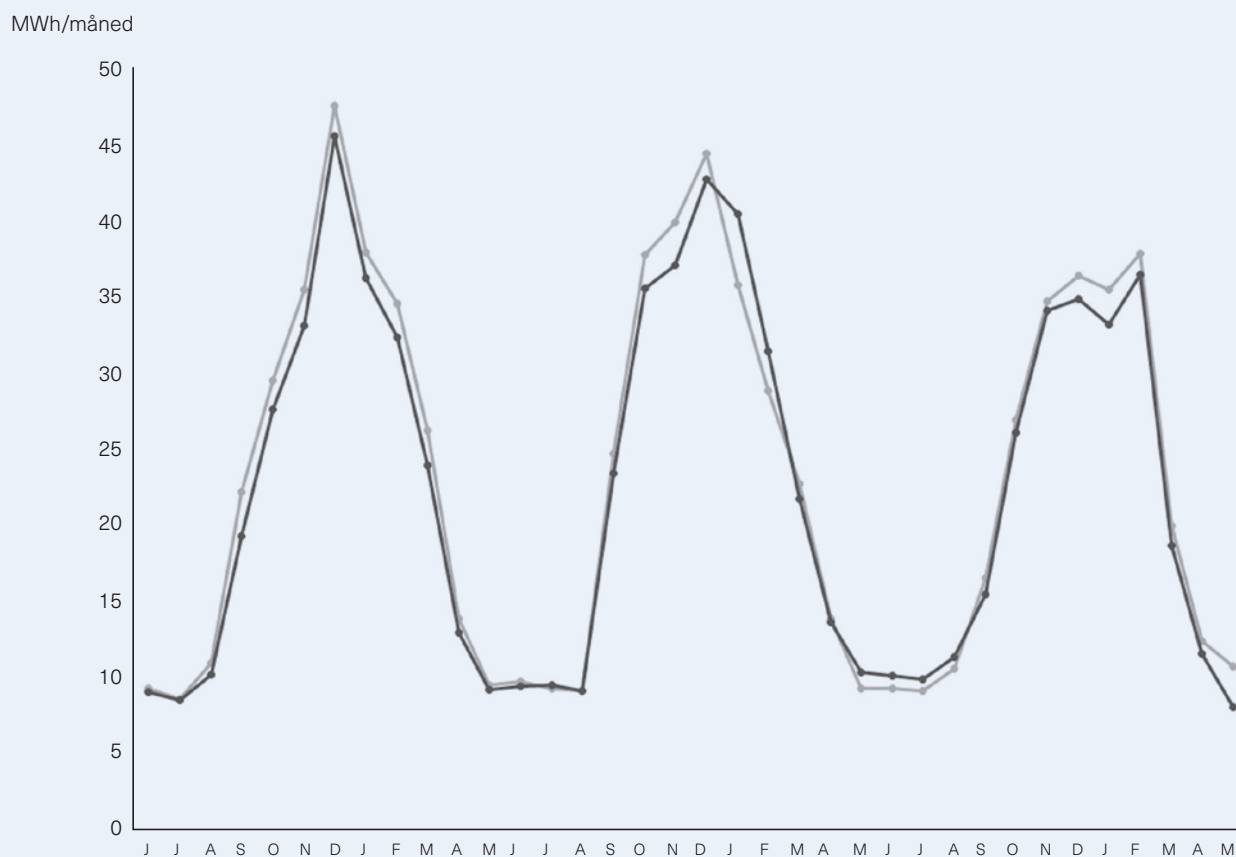


Fig 12. Øverst: Fordeling af varmerforbrug for de to etageejendomme per måned i perioden juni 2015 – maj 2018, svarende til det seneste år efter udskiftning af vinduer 01.05.2017 - 01.05.2018. Nederst: Fordeling af samlet, årligt varmerforbrug for de to etageejendomme i perioden 2014 - 2018

Konklusion – sundhedsmæssig, energimæssig og økonomisk betragtning

Rapporten vil ud fra en samlet sundhedsmæssig og energimæssig vurdering anbefale 2-lags jernfattigt glas fremfor 3-lags energiglas ved alle renoveringer af byggerier fra før 1985. Konklusionen på de forskellige outcomes peger i retning af, at 2-lags jernfattede vinduer alt i alt udgør en samlet merindtægt i forhold til 3-lags energivinduer når både lysmæssige og sundhedsmæssige gevinster tages med i betragtning. Hvis disse Non Energy Benefits (NEB) indgår i den samlede vurdering, vil 3-lags glas udgøre en samlet negativ merudgift – overraskende nok selv når de energimæssige resultater indgår i vurderingen, og selv i boliger med relativt store glaspartier (25 % af gulvareal).

Som tidligere nævnt udgør bygninger fra før 1985 langt over hovedparten af Danmarks samlede bygningsareal, svarende til ca. 67 %. Det har derfor en stor betydning, at energikrav til facade- og vinduesrenovering tilpasses bygningernes generelle tilstand således, at de ikke kompromitterer de sundhedsmæssige krav. Når rapporten her anbefaler 2-lags jernfattigt glas fremfor 3-lags energiglas hænger det i øvrigt i tråd med ambitionerne om, at reducere bygge- og anlægsbranchens affald, der i dag udgør ca. 33 % af alt det affald der produceres i Danmark. Glas udgør i dag en stor andel af facadearealet og hvis materialeforbruget til glas kan reduceres med 33 % vil det have en stor positiv effekt, ikke kun på reduktion i affaldsmængde, men også på den samlede CO₂-udledning, fordi glas er et relativt ressourcekrævende materiale at fremstille.

Søvn og humør

Når det gælder dagslyskvalitet og sundhedsfaktorer som søvn og humør, viser resultaterne en signifikant forskel til fordel for 2-lags glas. Resultaterne bekræfter at naturligt dagslys har en teoretisk positiv indvirkning på søvn og døgnrytme og efterviser også dette i praksis.

Resultaterne bekræfter at glaskvalitet i praksis har en statistisk signifikant positiv indvirkning på søvn og døgnrytme. Resultaterne viser at 3-lags vinduer forringer søvnkvaliteten statistisk signifikant. Resultaterne viser også en statistisk signifikant forskel hos beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattigt glas, deres døgnrytme faseforskydes fremad (phase-advance) i forhold til 3-lags energiglas. Andre resultater peger på, at beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattigt glas falder hurtigere i søvn, oplever mindre træthed i dagtimerne, samt bliver tidligere morgentyper, sammenlignet med beboerne i etageejendom med 3-lags glas. Alt i alt bekræfter de samlede sundhedsmæssige resultater, at 2-lags jernfattigt glas og naturlig dagslyskvalitet understøtter en god søvn og døgnrytme. At dette skyldes glaskvaliteten understøttes af, at resultaterne opnås på trods af en samlet reduktion af glasareal/gulvareal fra 25.5 % til 23.8 %.

Resultaterne af de teoretiske laboratoriemålinger viser, at glaskvaliteten rent teoretisk har en overraskende signifikant indvirkning på det kortbølgede lys, der stimulerer døgnrytmen. 2-lags jernfattigt glas øger mængden af kortbølget lys signifikant med op til ca. 20 % i forhold til 3-lags energiglas.

D-vitaminmangel og sundhed

Resultaterne bekræfter at glaskvalitet har en overraskende signifikant indvirkning på muligheden for dannelse af D-vitamin indendørs. Resultaterne bekræfter at 2-lags jernfattigt glas muliggør dannelse af D-vitamin indendørs, imens 3-lags glas uanset om det er jernfattigt eller energiglas omvendt blokerer for dannelse af D-vitamin indendørs.

Sollys er den primære og vigtigste kilde til omdannelse af D-vitamin. Men mennesker som opholder sig meget indendørs i Danmark får ikke nok sollys, for stort set alt glas - undtagen 2-lags jernfattigt glas - absorberer og reflekterer nemlig UVB lyset der er med til at omdanne 7-dehydro-cholesterol til aktivt 1,25(OH)₂D. Sundhedsstyrelsens anbefaling for D-vitamin lyder på 50 nanomol per liter blod og som absolut minimum 25 nmol/L. En tommelfingerregel siger, at en dansker mister ca. ét nanogram om ugen igennem vinterperioden. Lægger man ud med en koncentration på 50 i blodet i september måned, vil man derfor efter ca. 31 uger – i slutningen af april – typisk have et underskud sidst på vinteren, svarende til 19 ng/ml D-vitamin. Men hvis en person i stedet starter fra 75 ng/ml i sommerperioden, så slutter de i stedet med 56 ng/ml.

Dansk forskning offentliggjort i det lægevidenskabelige tidsskrift British Medical Journal viser, at folk med et lavt indhold af D-vitamin i blodet oftere rammes af sygdomme, som slår dem tidligere ihjel, end hvis blodet har mere D-vitamin. Ifølge overlæge Børge Nordestgaard viser forskningen, at en person der kun har 30 nanomol per liter, har en 40-procents forøget risiko for at dø af kræft og en øget dødelighed på samlet set 30 procent, i forhold til folk, som har det anbefalede niveau. Forskningen er baseret på årsagssammenhænge på 96.000 danskere fra den såkaldte Herlev-Østerbro-undersøgelse. Ud fra et overordnet sundhedsmæssigt skøn, vurderes de økonomiske udgifter, forbundet med almindelig D-vitamin mangel på sygdomme, såsom hjerte- karsygdomme, knoglesygdomme samt kræft, etc, at udgøre 15-16 % af de samlede sundhedsudgifter i Danmark. Det svarer til ca. 18 Mia. Kr. årligt, baseret på, at udgifterne til sundhedsvæsenet i dag udgør ca. 8,8 % af BNP, svarende til ca. 122 mia. kr årligt.

Når det gælder glaskvalitet og muligheden for at danne D-vitamin, kan resultaterne af dette projekt altså bekræfte, at glaskvalitet ikke kun har indvirkning på dagslyskvalitet og energiforbrug, men også på sundhedsmæssige forhold, der direkte påvirkes af glaskvaliteten. Valg af glastype bør derfor ikke kun bero på energimæssige hensyn, men også på glassets evne til, at transmittere det naturlige dagslys.

Glas, klimaskærm og energiforbrug

Sammenlignes varmekonsumet for de to etageejendomme efter renoveringen med forbruget i de sidste 4-5 år, reduceres forbruget med ca. 20 MWh/år i begge etageejendomme. Vinduer med 3-lags energiruder og vinduer med 2-lags jernfattige energiruder giver altså samme reduktion i det registrerede energiforbrug til opvarmning. Resultaterne peger overraskende på, at ældre bygninger ikke får den beregnede energimæssige gevinst ved 3-lags ruder. Rent energimæssigt viser resultaterne af projektet, at dette gør sig gældende selv i bygninger med relativt stort glasareal/gulvareal (25 %).

Tilfredshed

Der er statistisk signifikant forskel i tilfredshed med dagslyset hos beboerne. Beboerne i begge etageejendomme oplever generelt øget tilfredshed som følge af renoveringen, men resultaterne viser at tilfredsheden hos beboerne i etageejendommen med 3-lags energivinduer øges statistisk signifikant. Det samme er tilfældet når det gælder dagslysets karakteristika, såsom klarhed, farver på genstande samt hudfarve. Dette resultat virker umiddelbart overraskende, taget i betragtning, at målingsresultaterne viser, at 3-lags vinduer har en dårligere lystransmittans og giver mindre lysintensitet, med en grønlig toning af dagslyset, hvilket igen betyder mindre klar farve- og skyggetegning. En mulig forklaring på den øgede tilfredshed kan være, at 3-lags vinduer skaber en større forskel imellem før og efter renoveringen, hvorimod 2-lags jernfattede vinduer giver en mindre forskel imellem før og efter renoveringen. Det høje glasareal/gulvareal på 25 % og de høje dagslysfaktorer > 3 % i de største rum betyder, at lejlighederne ikke mangler dagslys, resultaterne tyder snarere tværtimod på at de måske får for meget dagslys.

Beboerne i etageejendommen med 3-lags vinduer oplever færre dage hvor det er for koldt, i forhold til beboerne i etageejendom med 2-lags vinduer. Det kan skyldes, at de store SV-vendte vinduespartier skaber kuldenedfald. Især mod SV, som er den fremherskende vindretning i Danmark. Her ser det ud til at 3-lags vinduer bidrager til, at beboerne oplever færre dage hvor det er for koldt i boligen.

Herudover viser resultaterne flere andre forskelle i tilfredshed på de enkelte spørgsmål om dagslyskvalitet. Når det gælder varme viser resultaterne, at beboerne i etageejendom med 2-lags jernfattede vinduer ikke er mere generet af solvarme (ekstern varmelast) end beboerne i etageejendom med 3-lags energiglas. Beboernes tilfredshed med luften i etageejendommen med 3-lags vinduer, er ens før og efter renoveringen, imens den falder i etageejendommen med 2-lags vinduer. Resultatet stemmer ikke overens med IC-meter-målingerne, der viser at luften forringes ens i både etageejendommen med 2-lags vinduer og etageejendommen med 3-lags vinduer. Reduceringen af vinduesåbningerne har ikke en negativ effekt på den overordnede tilfredshed med dagslyset. I stedet viser resultaterne overraskende at beboerne er mere tilfredse med dagslyset og rent faktisk oplever, at deres bolig er blevet lysere efter renoveringen.

Indeklima

Det samlede indeklima i begge etageejendomme forringes på flere punkter efter vinduesudskiftningen. Især når det gælder faktorer som forårsages af øget lufttæthed, såsom relativ luftfugtighed og CO₂, som begge øges signifikant efter vinduesudskiftningen. Detailkravet om tæthed for vinduer betyder at infiltrationen reduceres markant hvilket indebærer, at indeklimaet forringes, når naturlig eller mekanisk ventilation ikke indarbejdes og optimeres i forbindelse med en vinduesudskiftning. Projektet her reetablerede naturligt aftræk igennem toiletkernen, øgede udluftningsmuligheder og indtræk igennem karmventiler, men tilsyneladende uden signifikant effekt på det samlede indeklima efter renoveringen.

Økonomi - glas

Ud fra resultaterne af projekteringen og de indkomne tilbud baseret på udbudsmaterialet viser resultaterne, at jernfattede 2-lags vinduer rent faktisk er økonomisk billigere end 3-lags energivinduer.

I tilbudspris er 2-lags jernfattedt glas 30.736 DKK billigere end 3-lags energiglas. Svarende til en besparelse på 29.604 DKK til vinduer og 12.816 DKK til døre pr ejendom. For begge etageejendomme betyder det, at bedre dagslyskvalitet rent faktisk giver en økonomisk besparelse på i alt 84.840 DKK i de samlede byggeomkostninger. Prisforskellene skyldes udelukkende vinduesglasset, for vinduestype og montering m.m. er ens for 2- og 3-lags glas. Prisen på jernfattede ruder kan variere, alt afhængigt af leverandør, mængde, leveringstid, etc., men prisen er selvfølgelig en afgørende faktor når bygherre skal vælge vinduesløsning. I den følgende beregning af teoretiske, vejledende priser sammenlignes vejledende priser med de reelle udgifter på henholdsvis 2-lags jernfattede vinduer og 3-lags energivinduer. Prisen for jernfattedt glas (1-lag) estimeres til at være 30 % dyrere end almindeligt glas (1-lag). Herved fås følgende regnestykke med indeks = 1.0 for standard 3-lags vinduer med energiglas.

Forskel	Vinduer med 2-lags jernfattedt energiglas	Vinduer med 3-lags standard energiglas
1 Relativt glasforbrug. Indeks 3-lags glas	0.66	1.0 (Indeks)
2 Prisforskel, Indeks 3-lags glas	1.3	1.0 (Indeks)
3 Reel forskel i pris	0.858 (pkt 1. x pkt 2.)	1.0 (Indeks)
4 Afspejlet i tilbudspris	1.246.720 DKK	1.453.054 DKK
5 Faktuelt afgivet tilbudspris	1.484.321 DKK	1.515.057 DKK

Alt i alt giver det en estimeret prisforskel på 206.334 DKK imellem jernfattedt 2-lagsglas og 3-lagsglas. 2-lags jernfattedt glas er billigere end 3-lags energiglas, og det afspejles også i tilbudsprisen. Projektet viser altså i praksis, at 2-lags jernfattede vinduer er billigere end 3-lags energivinduer.

OBS. De 3-lags glas der er anvendt er standard for vinduesindustrien i dag. Der er dog en lille forskel nemlig, at energibelægningen er placeret på fase 3 og 5, hvor de som standard er placeret på fase 2 og 5. Det kan have en mindre indflydelse på g-værdi og U-værdi.

Bemærkninger

Udover pris kan andre forhold også have betydning når bygherre skal vælge imellem 2-lags glas og 3-lags glas. I det følgende kan nævnes:

- Forskel. I det samlede regnestykke indgår også forskel i vægt og materialeforbrug imellem 2-lags glas og 3-lags glas i de to etageejendomme: 3-lags vinduer (vinduesenhed 1400 x 1316 mm): 69 kg. 2-lags vinduer (vinduesenhed 1400 x 1316 mm): 57 kg.

- Forskel i antal timer med udvendig kondens. Udvendig kondens er et problem og kan reducere lystransmittans for glasset markant. Der er stor forskel imellem 2-lags glas og 3-lags glas når det gælder antal timer med udvendig kondens. For de to etageejendomme gælder følgende estimering: 3-lags vinduer (vinduesenhed 1400 x 1316 mm): ca. 1.500 h/år. 2-lags vinduer (vinduesenhed 1400 x 1316 mm): ca. 500 h/år. I valget af glas skal man overveje hvorvidt udsigten benyttes i morgentimerne/aftentimerne, for især på disse tidspunkter vil 3-lags glas reducere udsigt og lystransmittans i varierende grad, alt afhængigt af årstiden.
- Life Cycle Assessment (LCA). Glas er et tungt og ressourcekrævende materiale at fremstille, derfor bidrager 3-lags vinduer negativt i LCA analysen, særligt set i lyset af, at vinduets levetid er relativ kort og ikke forlænges ved det 3. lag glas.

Rapporten viser at det slet ikke udelukket at energioptimering og sundhedsoptimering kan gå hånd i hånd. Men det kræver flersidet og mere langsigtet fokus på sundhed, dagslys og energi i planlægningen af byggeriet. Resultaterne omkring D-vitamin kræver f.eks. forsøg af længere varighed for, at undersøge de specifikke sundhedsmæssige indvirkninger. Det vil være relevant at undersøge dette nærmere i fremtidige undersøgelser, når resultaterne tyder på, at glaskvaliteten har så stor og afgørende betydning. Ensidig fokusering på optimering af energiforbrug i Bygningsklasse 2018 og 2020 skaber ikke de sundeste – og i længden mest bæredygtige – byggerier i Danmark, og kan gøre det svært, at arbejde med en fælles målsætning om, at udnytte dagslysets sundhedsmæssige potentialer bedst muligt.

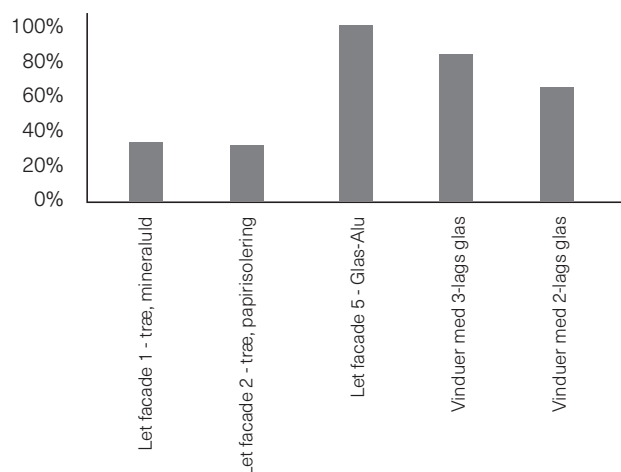


Fig 13. LCA livscyklusvurdering og sammenligning af bl.a. betydning af lukket facade, 3-lags vinduer og 2-lags vinduer

Denne rapport bekræfter flere resultater fra rapporten "Sundere dagslys og kunstlys – Nye veje mod lavenergiarkitektur 2020" og viser flere udfordringer og muligheder når det gælder sundhed. Men rapporten viser også at dynamiske faktorer gør det problematisk at beregne indeklimaet, og at vi mangler praktisk viden og erfaring med hvordan ekstern varmelast og naturlig ventilation håndteres i praksis. Resultaterne viser, at 2-lags jernfattige vinduer rent faktisk samlet set er billigere end 3-lags almindelige energivinduer.

Resultater	2-lags jernfattige energivinduer	3-lags energivinduer
1 Højeste dagslysintensitet	✓	
2 Forudsætning for dannelse af D-vitamin indendørs	✓	
3 Højeste intensitet af kortbølget lys der stimulerer døgnrytmen	✓	
4 Bedst søvn, humør og morgenfriskhed (tidlige morgentyper)	✓	
5 Højeste optimering af energiforbrug til opvarmning	✓	✓
6 Højeste tilfredshed med dagslyset		✓
7 Mindst gene fra solvarme	✓	✓
8 Forbedring af samlet indeklima		
9 Samlet merindtægt når alle lysmæssige og sundhedsmæssige gevinster, Non Energy Benefits (NEB), inddrages	✓	

Fig 14. 2-lags jernfattige energivinduer vs. 3-lags energivinduer. Komparativ analyse af samlede resultater. Positive resultater markeret med ✓