

Komforthusene

Målinger og Analyse af Indeklima og Energiforbrug i 8 Passivhuse 2008-2011

Larsen, Tine Steen; Jensen, Rasmus Lund; Daniels, Ole

Publication date:
2012

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Larsen, T. S., Jensen, R. L., & Daniels, O. (2012). *Komforthusene: Målinger og Analyse af Indeklima og Energiforbrug i 8 Passivhuse 2008-2011*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports Nr. 126

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 -

Take down policy

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

Komforthusene

- Målinger og analyse af indeklima og energiforbrug i 8 passivhuse 2008-2011

Tine Steen Larsen
Rasmus Lund Jensen
Ole Daniels



KOMFORT
HUSENE



Måleprogram For
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektion for Architectural Engineering

DCE Technical Report No. 126

Komforthusene
- Målinger og analyse af indeklima og energiforbrug i 8 passivhuse
2008-2011

Tine Steen Larsen
Rasmus Lund Jensen
Ole Daniels

Januar 2012

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2012 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-726X
DCE Technical Report No. 126

Forord

Denne rapport beskriver resultaterne fra måleprogrammet i Komforthusene gennemført af Aalborg Universitet i perioden 2008 til 2011. Resultaterne fra hvert enkelt hus i projektet er gennemgået detaljeret i 8 husspecifikke rapporter. Der refereres i denne rapport til de husspecifikke rapporter, som alle kan hentes på www.vbn.aau.dk.

Desuden tager en del af analyserne i denne rapport udgangspunkt i analyserne lavet i rapporten "Vurdering af indeklimaet i hidtidigt lavenergibyggeri - med henblik på forbedringer i fremtidens lavenergibyggeri", som er udgivet fra Aalborg Universitet i januar 2011 (se referenceliste).

Aalborg Universitet, januar 2012

Tine Steen Larsen

Lektor

Indholdsfortegnelse

1. Sammenfatning.....	9
2. Indledning.....	13
2.1 Baggrund.....	13
2.2 Analyser af indeklima og energiforbrug.....	13
2.3 Brug af beboerprofiler og "kunstigt år".....	14
3. Termisk indeklima.....	15
3.1 Vurderingskriterier	15
3.2 Generel vurdering af kriterier	16
3.3 Risiko for overophedning	17
3.4 Effekt af termisk masse	24
3.5 Utilstrækkelig opvarmning.....	25
3.6 Lufttæthedens betydning for varmebehovet.....	30
3.7 Opsummering	31
4. Atmosfærisk indeklima.....	33
4.1 Vurderingskriterier	33
4.2 Overordnet vurdering ift vurderingskriterier	33
4.3 Behovsstyret ventilation	34
4.4 CO ₂ -niveau	37
4.5 Relativ luftfugtighed	38
4.6 Opsummering	39
5. Dagslys.....	41
5.1 Vurderingskriterier	41
5.2 Generelle erfaringer	41
5.3 Dagslysforhold i Komforthusene	42
5.4 Problemer med mørke rum	45
5.5 Sammenhæng mellem DF, vinduesareal og overophedning.....	46
5.6 Robusthed i forhold til rotering af bygningen	48
5.7 Opsummering	49
6. Akustik og støj	51
6.1 Vurderingskriterier	51
6.2 Efterklangstider.....	51
6.3 Støj fra installationer	52
6.4 Opsummering	53
7. Energiforbrug og energieffektivitet	55
7.1 Vurdering af energiforbrug til rumvarme.....	55
7.2 Vurdering af primært energiforbrug	56
7.3 Vurdering af husenes lufttæthed	57
7.4 Vurdering af PHI-anbefaling om overtemperatur maks. 10% med t > 25°C.....	58
7.5 Energieffektivitet (SEL, veksleffektivitet)	58
7.6 Opsummering	61
8. Brugernes påvirkning på energiforbrug og indeklima	63
8.1 Generelle erfaringer	63
8.2 Erfaringer fra Komforthusene.....	64
8.3 Opsummering	64
9. Fremtidens lavenergiboliger	67
9.1 Indeklima	67
9.2 Energiforbrug	67
9.3 Dialog med brugerne	68
10. Referencer.....	69
Bilag A: Krav til indeklima og energiforbrug.....	71
A.1 Termisk indeklima.....	71
A.2 Atmosfærisk indeklima.....	72

A.3	Dagslys	74
A.4	Akustisk indeklime	75
A.5	Vurderingskriterier oversigt	77
A.6	Energiforbrug	78
A.7	Overholdelse af passivhus-kriterierne	78
A.8	Overholdelse af passivhus-anbefalingerne	78
Bilag B	– Målinger i husene	79
B.1	Indeklima	79
B.2	Energi til rumvarme og varmt brugsvand	80
B.3	Elforbrug	80
B.4	El-forbrug fra måleudstyr	80
Bilag C:	Beregning af dagslysfaktor	83
C.1	Definition af dagslysfaktor	83
C.2	Bestemmelse af dagslysfaktor	83
Bilag D:	Måling af efterklangstider og støj fra ventilationsanlæg	85
D.1	Bestemmelse af efterklangstid	85
D.2	Måling af støj fra ventilationsanlæg	86
Bilag E:	Sammenligning af vejrdato (DRY & Skibet)	87
Bilag F:	Sammenligning af vejrdato (DMI-Billund & Skibet)	89

1. Sammenfatning

Denne rapport beskriver resultaterne fra måleprogrammet i Komforthusene gennemført af Aalborg Universitet i perioden 2008 til 2011. Resultaterne fra hvert enkelt hus i projektet er gennemgået detaljeret i 8 husspecifikke rapporter. Følgende sammenfatning er skrevet ud fra projektets generelle konklusioner.

Termisk indeklima

Det termiske indeklima i Komforthusene er vurderet ud fra både for høje og for lave temperaturer. Alle målinger er holdt op imod krav fra DS/EN 15251, krav til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020 samt anbefalinger fra PHI om maksimalt 10% af tiden over 25°C.

Overophedning

Ved vurderingen fremgår det, at der er stor forskel på hvordan husene fungerer termisk. Fælles for næsten alle husene er, at de ikke kan overholde kriterierne på hhv 100 timer over 26°C og 25 timer over 27°C som fremover skal benyttes til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020. Kun to huse kan overholde dette krav.

En af de vigtigste konklusioner, når problematikken med overophedning vurderes, er, at det fremover er væsentligt at inddrage muligheden for aktiv brug af naturlig ventilation i vores boliger kombineret med udvendig solafskærmning. Den aktive brug af naturlig ventilation skal forstås således, at det også i dagstimerne, hvor boligen står tom, eller om natten, skal være muligt at ventilere naturligt, og dermed gøre brug af den "gratis" køleeffekt vi får stillet til rådighed ved blot at åbne vinduerne. For at dette kan blive muligt, uden risiko for indbrud, skal åbningerne i boligen indtænkes fra designfasens start, og huset designs ud fra muligheden for naturlig ventilation, da det kan være svært at skabe denne mulighed, når huset først er opført.

Udover inddragelse af naturlig ventilation og solafskærmning er det diskuteret hvorvidt tunge konstruktioner (og dermed termisk masse) kan påvirke indetemperaturen i enten en positiv eller negativ retning i en varm sommerperiode. Her blev det konkluderet, at den termiske masse kun har en positiv effekt så længe det er muligt at køle konstruktionen ned i nattetimerne, dvs at brug af termisk masse kun fungerer, når det er muligt at tilvejebringe et passende stort luftskifte i nattetimerne via den naturlige ventilation. Opnås dette ikke, kan den termiske masse i stedet forøge problemerne med overophedning af bygningen.

Utilstrækkelig opvarmning

Ved vurdering af problemer med utilstrækkelig opvarmning er et af de kritiske punkter, hvor tæt varmeanlæggets maksimale effekt ligger på husets dimensionerende varmetab. Er disse to størrelser forholdsvis tæt på hinanden vil bygningen blive væsentligt mere følsom for afvigelser mellem det opførte hus i driftstilstanden og beregningsforudsætningerne. Dog vil kraftig overdimensionering af anlægget fordyre projektet, så disse parametre skal afbalanceres.

Et andet punkt, når problemer med utilstrækkelig opvarmning skal vurderes, er den reducerede eller manglende mulighed for brug af individuel

regulering af rumtemperaturen, når der udelukkende bruges luft som opvarmning. Dette kan bl.a. komme til udtryk ved de kolde hjørnerum i en bolig, som kræver øget varmetilførsel, noget der også fremhæves af Minergie® Agentur Bau i deres undersøgelse af luftvarme til opvarmning af boliger [Minergie® Agentur Bau, 2007]. Er der i boligen dårlig fordeling af varme mellem rum (fx pga lydisolering i væggene mellem de enkelte rum), vil en individuel reguleret varmeforsyning i hvert rum også kunne forbedre komforten i rummet.

Problematikken med den uens varmefordeling mellem rummene understreger desuden nødvendigheden i at regne på boligen som flere temperaturzoner, hvor varmetab og varmetilskud er forskellige fra zone til zone.

Atmosfærisk indeklima

Alt tyder på, at fremtidens boliger bliver større og større samtidig med at vi bor færre personer i boligerne. Det vil sige, at vi får større antal m² pr person, hvilket samtidig medfører, at behovet for frisk luft pr m² bolig reduceres - i al fald når parametrene temperatur, CO₂ og fugt vurderes.

Det har hidtil været krævet, at ventilationsmængden pr m² bolig skal opfylde et fast minimumskrav [BR08, BR10], men i takt med et faldende behov i boligerne på grund af ovennævnte, bør det vurderes, hvorvidt dette krav skal fastholdes, eller en reduktion, og dermed en energibesparelse, kan tillades. Ud fra denne tankegang fik Komforthusene dispensation fra BR08 og kunne dermed lave behovsstyret ventilation i alle husene.

Ved vurdering af atmosfærisk komfort ses, at alle komforthusene kører med mindre luftmængder end anbefalet i BR08/BR10. Nogle gør det med succes, og opnår stadig et godt indeklima, men de huse, hvor luftskiftet er mindst, opnår problemer med dårlige vurderinger af det atmosfæriske indeklima i huset.

Ved vurdering af CO₂-niveau og relativ luftfugtighed i boligerne findes CO₂-niveauet som det mest kritiske. CO₂-niveauet varierer meget fra bolig til bolig alt afhængig af ventilationsmængden, og der findes i stuerne overskridelser af kategori II gående fra 0% til 19% af tiden. De fleste stuer har dog lave overskridelser. I børne- og soveværelserne er overskridelserne langt større, da der i disse rum oftest er væsentligt større belastning pr m² over en længere periode. Her findes der overskridelser i nogle af værelserne i næsten halvdelen af tiden.

Ingen af de monterede anlæg registrerer CO₂-niveau i boligen, men vil man fremover tillade behovsstyring med luftmængder væsentligt mindre end 0,5h⁻¹ bør det diskuteres hvorvidt den ekstra investering er nødvendig. Erfaringerne fra Komforthusene viser, at små rum med høj intern belastning skal sikres et godt luftskifte. Dette er som før nævnt typisk soveværelser og børneværelser, hvor der er belastning hele natten. Børneværelserne er i nogle tilfælde ekstra kritiske, da der i disse rum også er belastning i dagstimerne.

Dagslys

Dagslysfaktorer i boliger bør fremover inddrages, når fremtidige lavenergiboliger designs. Argumentet for at gøre dette er, at man via øget fokus på brug af dagslys i boliger muligvis samtidig vil kunne sikre et lavere energiforbrug til elektrisk belysning, og dermed en energibesparelse på belysningsområdet. Et bud på kriteriet for godt dagslys i boligerne er fra dette projekt en dagslysfaktor på 2% ved rummets bagvæg, for hermed at inddrage rummets dybde i vurderingen.

Komforthusene har gode dagslysforhold i langt de fleste rum. Der gives ud fra målingerne flere eksempler på, hvordan vinduesplaceringen kan forbedre dagslysforholdene i en bolig. Dog skal det pointeres, at der ved alle sydvendte placeringer samtidig bør kontrolleres for overophedning i rummet. Denne pointe illustreres af en analyse med konkrete målinger af overtemperatur sammenholdt med DF og vinduesareal/gulvareal. Resultaterne her sammenholdes også med anbefalingerne i BR10, hvor det i dag anbefales at have en vindues/gulvareal-faktor på 0,15 i bygningsklasse 2020. Ud fra erfaringerne i Komforthusene ville et bedre bud på denne faktor være 0,20.

Endeligt analyseres betydningen af vinduernes orientering i forhold til energibehov og robusthed overfor rotering af bygningen. Ikke overraskende var det her bygningen med en ligelig fordeling af vinduer i alle retninger, der var mest robust, og dermed bedst kunne placeres på en hvilken som helst byggegrund uafhængig af orienteringen af denne. Samtidig vil en mere ensartet placering af vinduerne mod alle retninger også kunne afhjælpe problemer med mørke rum i den nordlige del af huset samt risiko for overophedning, blænding og stærke kontraster i de sydvendte rum.

Akustik og støj

Der er i flere af Komforthusene aktivt gjort tiltag for at sikre god akustik. Ved måling af efterklangstider i umøblerede rum, er der fundet store forskelle i dæmpningen af rum i de forskellige huse, med en klar forskel mellem de huse, der har lavet akustikregulering, og de huse hvor det er udeladt. Dog med en enkelt undtagelse, hvor akustiklofterne ikke formår at sænke efterklangstiden i et dobbelthøjt rum med mange tunge konstruktioner.

Støj fra installationer er målt ved standard drifttrin på ventilationsanlægget. Under målingerne er der ikke fundet problemer med at overholde kategori B (<25dB), men ved interview med beboerne er der i nogle huse udtrykt, at støj fra anlæggene generer når anlægget kører med højere luftmængder. Det pointeres derfor, at lyddæmpning omkring rum med ventilationsanlæg skal have høj prioritet.

Energi

Alle Komforthusene er opført som passivhuse, hvilket betyder, at de gerne skal overholde passivhus-kriterierne. Rapporten omfatter derfor en kontrol af hvorvidt dette også var tilfældet. Kontrollen foretages via sammenligninger mellem beregnet og målt energiforbrug.

Da PHPP-beregningen er lavet ud fra en række forudsætninger (fx en rumtemperatur på 20°C, et standard udeklima og en given intern belastning) er det ikke muligt direkte at sammenligne de målte og de

beregnete værdier. Da både udeklima og rumtemperatur er væsentlige parametre når energiforbruget vurderes, blev der i PHPP-beregningen korrigeret for begge parametre ud fra målte værdier i Komforthusene. Dette gav ca. en fordobling af det beregnede forventede energiforbrug i huset, hvilket fint illustrerer vigtigheden af disse to parametre. De fleste huse har kørt med ca. 23°C i huset, hvilket har kostet ca. 6-8 kWh/m² pr år ekstra i dette tilfælde.

Ved vurdering af *passivhuskravet til rumvarme* overholder alle huse på nær et enkelt passivhuskravene. Dog vil forbruget i to af husene reelt være højere end hvad der er målt, da begge huse har haft ekstra varmekilder tilsluttet udenom målerne til måleprojektet på grund af utilstrækkeligt opvarmning i husene. Der vurderes dog, at disse bidrag er i mindre omfang. Huset der afviger fra kravet, har i perioden haft tekniske problemer, som kan forklare en del af afvigelsen.

Ved vurdering af *passivhuskravet til primært energi* findes der stor variation i de målte el-forbrug og en faktor 3 er fundet mellem det højeste og det laveste forbrug. De fleste af husene overholder passivhuskravet til primær energi. Dog overskrider to af husene begge kravet i væsentligt omfang. Begge huse har haft tekniske vanskeligheder, der kan forklare en del af afvigelsen.

Ved vurdering af *passivhuskravet til overtemperatur* findes at 5 ud af 8 huse har problemer med overtemperaturer i mere end 10% af tiden. I den forbindelse fremhæves det, at beregningen af overtemperatur sker på basis af en middelterperatur i hele boligen, som ikke stemmer overens med indeklimaet i en virkelig bolig. Der er i virkelighedens bolig stor variation mellem rummene, som ikke tages med ved vurderingen af bygningen som et samlet hele. Vurdering af overtemperatur bør derfor foretages på rumniveau.

Slutteligt vurderes SEL-værdier for ventilationsanlæggene. Der er ved SEL-værdierne en faktor 6 i forskel mellem højeste og laveste værdi, hvilket rejser spørgsmålet om, hvorvidt der bør stilles krav til dokumentation af dette ved aflevering af anlæg.

Brugernes påvirkning på indeklima og energiforbrug

Der er i Komforthusene fundet flere eksempler på brugeradfærd, som har været uhensigtsmæssig i forhold til husets indeklima eller energiforbrug. Flere af disse eksempler stiller krav til brugerne om ændret adfærd i forhold til deres tidligere boliger. Ikke alle er villige til, eller bevidste om, denne adfærdsændring, og det bør diskuteres, hvorvidt det skal være nødvendigt med en ændret adfærd for at bo i et lavenergihus. Beboere uden en "energigivenlig" adfærd skal også kunne bo i lavenergi huse uden at dette føles som en begrænsning i deres adfærd. Der bør derfor aldrig indskrænkes i beboernes personlige komfort – bliver dette nødvendigt vil lavenergikonceptet ikke kunne opnå succes.

En oplagt mulighed i fremtidig lavenergi byggeri vil være en vejledning til beboerne. Ikke nødvendigvis for at ændre deres adfærd, men for at sikre, at de forstår konsekvensen af deres adfærd, som i nogle tilfælde forøger husets energiforbrug ganske mærkbart.

2. Indledning

Denne rapport og det tilhørende analysearbejde er udarbejdet i forbindelse med projektet "Demonstration af energiforbrug og indeklima i 10 danske passivhuse" som er gennemført på Aalborg universitet fra 2008 til 2012 i Komforthusene. Rapporten vil gennemgå de resultater der er opnået ud fra målinger af indeklima og energiforbrug, og vil desuden give forslag til gode løsninger i fremtidigt lavenergibyggeri.

2.1 Baggrund

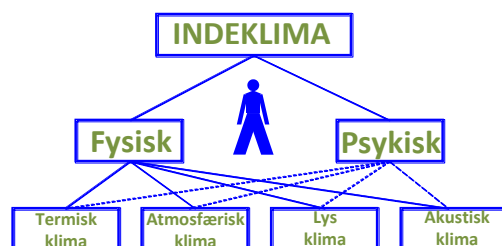
I takt med den politiske udvikling indenfor energibesparelser i nybyggeriet har der de seneste år været stor fokus på opførelsen af lavenergiboliger. Dette har udmundet i flere forsøgsbyggerier og udviklingsprojekter som fx Komforthusene, Green Lighthouse (Københavns Universitet), Fremtidens Parcelhuse (Køge) og Bolig for livet (Lystrup).

Denne rapport dokumenterer, som tidligere nævnt, indeklima og energiforbrug i Komforthusene. Komforthus-projektet blev startet i 2007 som et udviklingsprojekt hos Saint Gobain Isover A/S, som ønskede at formidle viden om lavenergibyggeri og de principper der står bag. Det blev ved projektets start valgt at tage udgangspunkt i passivhus-konceptet, da dette koncept var velkendt og testet gennem en årrække i Tyskland, Østrig og Schweiz. Projektet var tænkt som et udviklingsprojekt, og koncepterne bag passivhusene var nye for en stor del af deltagerne i de konsortier, der bød ind på projektet. Ideen med at lave projektet til et udviklingsprojekt var samtidig, at resultaterne fra projektet skulle meldes åbent ud således, at man via erfaringerne fra projektet kunne være med til også at forme fremtidens lavenergibyggeri. En vision der blev til virkelighed da udkastet til den danske bygningsklasse 2020 blev udformet, og fx indeklimaet kom væsentligt mere i fokus end det hidtil har været i det danske bygningsreglement [Larsen, 2011].

Denne rapport vil hovedsageligt fokusere på resultaterne fra Komforthusene, men der vil desuden blive refereret til andre danske forsøgsbyggerier og udviklingsprojekter. Herudover suppleres analyserne med erfaringer fra svenske lavenergiboliger fundet via litteraturstudier.

2.2 Analyser af indeklima og energiforbrug

Rapporten tager udgangspunkt i de målinger der er foretaget i Komforthusene – det vil sige indeklima og energiforbrug. Indeklimaet behandles først. Her ses på de forskellige fysiske parametre, der påvirker beboerne i Komforthusene. Ved en vurdering indgår således både termisk, atmosfærisk, lys og akustisk klima. Parametrene er angivet i Figur 2.1. I figuren indgår desuden psykiske parametre, da de fysiske parametre kan vurderes forskelligt afhængigt af menneskets psykiske tilstand og omvendt kan menneskets psykiske tilstand påvirkes af de fysiske omgivelser.



Figur 2.1. Parametre der indgår ved vurdering af indeklima [Hyldgård et al., 2001]

Vurdering af indeklimaet inddeles i fire kapitler omhandlende de fire parametre i Figur 2.1. Herefter vurderes energiforbruget i boligerne samt nogle af de nøgletal fra husene der vedrører energiforbruget. Efter dette ses på brugernes påvirkning af både energiforbrug og indeklima i deres bolig. Sidste kapitel samler op på alle resultaterne og giver bud på hvordan fremtidens lavenergiboliger skal udformes.

2.3 Brug af beboerprofiler og "kunstigt år"

Da Komforthusene ikke som forventet blev solgt da måleprogrammet startede, er der i flere af husene også målt i perioder, hvor husene har stået ubeboede. Da flere af vurderingerne i projektet kræver beboere, har det derfor været nødvendigt for nogle af analyserne, at konstruere et kunstigt år ud fra de måneder, hvor der er beboere i husene. I de tilfælde, hvor det "kunstige år" er brugt, er dette nævnt i analysen.

Beboerprofiler for de 8 huse ses i Figur 2.2. I de tilfælde, hvor der har boet to familier i husene er familierne angivet som familie 1 og familie 2. Familie 1 altid er den familie, der først har beboet huset. Ved analyserne er der så vidt muligt brugt data sidst i måleperioden, da der på dette tidspunkt er foretaget en del korrektioner og løsning af fejl i husene. Det bør derfor være de mest reelle tal at bruge til analyserne.

12	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
Beboet																																	
28	2 voksne + 1 barn																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
37	2 voksne + hund																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
39	2 voksne + 3 børn																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
43	2 voksne + 1 barn (teenager)																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
45	2 voksne																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
47	2 voksne + 2 børn (teenagere)																																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
49	2 voksne + 2 børn (teenagere)																2 voksne + 2 børn																
Beboet	jan-09	feb-09	mar-09	apr-09	maj-09	jun-09	jul-09	aug-09	sep-09	okt-09	nov-09	dec-09	jan-10	feb-10	mar-10	apr-10	maj-10	jun-10	jul-10	aug-10	sep-10	okt-10	nov-10	dec-10	jan-11	feb-11	mar-11	apr-11	maj-11	jun-11	jul-11	aug-11	sep-11
	2 voksne + 2 børn (teenagere)																																

Figur 2.2: Beboerprofil for Komforthusene i tidsrummet, hvor måleprojektet har forløbet.

I nogle huse er der som nævnt ikke beboere eller data for et helt år i træk. I disse tilfælde er det "kunstige år" brugt således, at der laves et år med alle måneder repræsenteret i datasættet, men disse måneder er ikke nødvendigvis fra samme år.

3. Termisk indeklima

Ved vurdering af det termiske indeklima inddrages både de perioder, hvor der har været for varmt i nogle af husene, men også de perioder, hvor der har været for koldt i nogle af husene. Førstnævnte beskrives i afsnit 3.3 "Risiko for overophedning". Herefter følger i afsnit 3.4 et afsnit om effekten af termisk masse på det termiske indeklima. I afsnit 3.5 behandles de problemer der har været med utilstrækkelig opvarmning og i afsnit 3.6 ses på vigtigheden af at tætte bygningen korrekt, da en utæt bygning har stor indflydelse på energiforbruget til opvarmning.

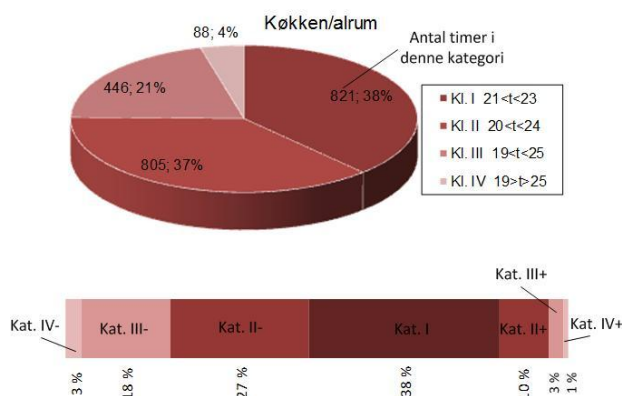
3.1 Vurderingskriterier

En grundig gennemgang af vurderingskriterierne for det termiske indeklima findes i "Bilag A: Krav til indeklima og energiforbrug". Tabel 3.1 viser i overordnede træk de kriterier, der er evalueret efter i husene. Kriterierne tager udgangspunkt i DS/EN 15251.

Termisk	Kriterium	Maks. afvigelse	
		Måned	År
Generel vurdering	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
Overtemperatur	25 °C	10 %	10 %
	26 °C	100 h	100 h
	27 °C	25 h	25 h
Undertemperatur	20 °C	100 h	100 h
	19 °C	25 h	25 h

Tabel 3.1: Vurderingskriterier for det termiske indeklima.

Det termiske indeklima er vurderet i forskellige sæsoner over året (forår, sommer, efterår og vinter). Alle vurderinger findes i de husspecifikke rapporter, og for alle vurderinger er der udarbejdet et diagram som hurtigt giver overblikket over resultaterne i perioden. Et eksempel på diagrammet er vist i nedenstående figur. Det øverste diagram angiver fordelingen af henholdsvis timer og % på kategori I, II og III. Kategori IV angiver tid udenfor de øvrige kategorier. Når det i projektet angives, at kategori II skal overholdes omfatter tid i kategori II både andelen af timer i andelen kaldet kategori II og kategori I.



Figur 3.1: Signaturforklaring til diagrammer

Det nederste diagram angiver hvorvidt rummet ligger i den lave eller høje ende af skalaen. Kat II- angiver fx hvor stor en del af tiden, at temperaturen ligger mellem 20°C og 21°C – dvs forskellen fra den nederste grænse i kategori I til den nederste grænse i kategori II. På tilsvarende måde angiver

kategori II+ tiden, der ligger mellem 23°C og 24°C. For overskuelighedens skyld er enkelte signaturer i de følgende grafer udeladt.

3.2 Generel vurdering af kriterier

Det termiske indeklima i Komforthusene blev vurderet ud fra kriterierne angivet i Tabel 3.1. Vurderingen for stuen er medtaget i tabellen, da dette rum anses for husets primære rum. Informationer om huset øvrige rum findes i de husspecifikke rapporter.

Det giver ikke nogen mening at vurdere indeklimaet i husene i de perioder, hvor de har stået uden beboere. Det er derfor i nedenstående samlede vurdering i Tabel 3.2 angivet, hvornår husene er beboet ud for hvert årstal. Yderligere detaljer om dette fremgår af Figur 2.2.

		<19 [h]	<20 [h]	>25 [%]	>26 [h]	>27 [h]	Afvigelse fra Kat. II [%]
HUS 12 Køkken/ alrum	2009**	36	521	42	2220	904	31
	2010**	66	480	21	861	392	15
	2011	0	0	27	703	93	8
HUS 28 Stue	2009**	0	158	27	1313	560	17
	2010**	32	317	23	953	427	14
	2011	0	0	32	1770	381	37
HUS 37 Stue	2009**	114	599	25	1819	1568	28
	2010**	374	671	40	2355	1533	35
	2011	0	49	21	801	295	10
HUS 39 Stue	2009*	0	0	40	2360	1550	27
	2010**	1360	1989	24	779	266	32
	2011	0	0	6	100	28	1
HUS 43 Stue	2009*	0	54	52	4157	3505	48
	2010**	1128	1495	22	1457	1147	34
	2011	91	199	15	600	280	9
HUS 45 Stue	2009*	1101	1411	44	3305	2092	54
	2010**	1187	1862	5	118	11	23
	2011	13	271	7	44	5	4
HUS 47 Stue	2009**	4	159	28	1988	1587	25
	2010	719	926	16	732	370	19
	2011**	1	1	30	1651	1241	19
HUS 49 Stue	2009*	805	1297	23	1391	884	31
	2010**	611	697	11	481	205	13
	2011	0	1	4	62	10	1

* Ikke beboet, ** Delvist beboet

Tabel 3.2: Resultat af indeklimavurdering for termisk indeklima. Rød tekst fortæller at vurderingskriterium ikke er overholdt. Grøn og sort fortæller at kriterium er overholdt.

Ud fra vurderingerne af det termiske indeklima fremgår det, at der er stor forskel på hvordan husene fungerer termisk – både når de høje og de lave temperaturer vurderes. Fælles for næsten alle husene er, at de ikke kan overholde kriterierne på hhv 100 timer over 26°C og 25 timer over 27°C til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020. Dog formår hus 45 og 49 at komme under grænserne. Ved vurdering af PHI-anbefalingen om 10% af

tiden over 25°C overholder hus 39, 45 og 49 kravene. Samme huse overholder den maksimale afvigelse fra kategori II på årsbasis, som skulle være under 3% eller 5% alt efter hvilket niveau der vælges. Det skal dog nævnes, at kravene er ved brug af standard vejrdatasæt, hvilket ikke er tilfældet ved målingerne. Dette diskuteres yderligere i kapitel 7.

3.3 Risiko for overophedning

Et kritisk punkt i designfasen er design og placering af solafskærmning samt bortventilering af varm luft fra huset så overophedning undgås. Da lavenergihuse er tætte og velisolerede, vil der ved et stort solindfald gennem vinduerne også hurtigt blive varmt. Det er derfor væsentligt, at solafskærmning og brug af naturlig ventilation tænkes ind fra starten af designfasen for at undgå efterfølgende problemer med overophedning, som kan være svære at rette op på, når huset er opført.

3.3.1 Generelle erfaringer

Hidtidige erfaringer fra boliger bygget som lavenergibyggeri har vist, at der i en del huse hurtigt opstår meget høje temperaturer med diskomfort som følge. De høje temperaturer opstår dels pga de mange sydvendte vinduespartier, som i mange tilfælde er dårligt afskærmet fra solindfald, og dels på grund af manglede muligheder for udluftning. Dog skal det påpeges, at der er begrænsede erfaringer med størrelsen af dette problem i ældre boliger bygget efter tidligere tiders bygningsreglementer, men også ældre boliger oplever dette problem i de varme sommermåneder.

Brugen af naturlig ventilation og solafskærmning vil kunne reducere og i mange tilfælde fjerne, overtemperaturerne i boligen. Hidtil er solafskærmning ikke blevet betragtet som nødvendig ved opførsel af boliger, men dette bør i fremtidens boliger inddrages allerede fra projektets start.

En anden erfaring fra nutidigt lavenergi-byggeri er, at der i designfasen lægges stor vægt på dokumentation af bygningens energiforbrug, hvorimod indeklimaet i huset ikke vurderes og dokumenteres i tilnærmelsesvis samme grad. Husets energiforbrug skal overfor myndighederne dokumenteres via Be06. I programmet gives straf for overtemperatur, og mange bruger størrelsen af denne "straf" som en vurdering af hvorvidt indeklimaet er i orden. Dog skal det pointeres, at man ikke kan sikre et godt indeklima ud fra et energiberegningsprogram. Indeklima bør dokumenteres ud fra en beregning, der er møntet på indeklima, dvs en dokumentation af fx termisk indeklima i sommerperioden (ved vurdering af overtemperaturer), CO₂-indhold i luften, dagslysforhold eller andet. Denne dokumentation af termisk indeklima vil med lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020 blive obligatorisk.

Ses der på erfaringer fra tilsvarende svenske projekter, hvor klimaet ligner det danske klima, er erfaringerne de samme. I en stor analyse lavet af Ulla Janson i 2010 samles erfaringerne fra fire svenske projekter med i alt 93 boliger på passivhusniveau i en doktorafhandling [Janson, 2010]. En af de generelle konklusioner i denne rapport i forbindelse med overophedning er, at mange af de beboere der oplever problemer med overtemperaturer også har et stor forbrug til el-apparater. Det vil sige de har en høj intern belastning, som dermed bidrager til forøgede indetemperaturer.

I et en-familiehus fra 2007 på 171 m² i Lidköping nær ved søen Vänern i Sverige er der massive problemer med overophedning. Her er manglende mulighed for både åbning af vinduer og solafskærmning årsagen til de meget utilfredse beboere i sommerperioden. Efter målingernes afslutning blev der monteret et vindue med mulighed for åbning, hvilket mindskede overtemperaturerne væsentligt. [Janson, 2010]

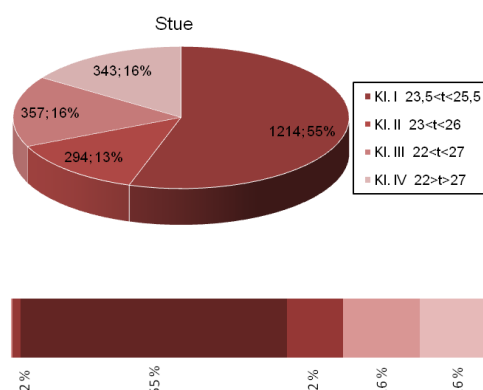
Samme problem med overtemperaturer findes i et energirenoveringsprojekt med 40 lejligheder i Alingsås nær Göteborg fra 2005, men i dette tilfælde er det kun beboerne i lejlighederne på 3. sal, der klager over overtemperaturer, som også bekræftes af målingerne. I de to lejligheder hvor indeklimamålingerne foretages, er der i den ene lejlighed ingen solafskærmning og i den anden lejlighed indvendige persienner. I dette byggeri opleves og registreres der ikke problemer med overtemperaturer i lejlighederne i stueetagen. Årsagen til dette er ikke yderligere analyseret. [Janson, 2010]

I to andre projekter med hhv 40 lejligheder og 12 lejligheder er boligerne udført med kraftige udhæng, der fungerer som solafskærmning. [Janson, 2010] Der er i begge disse projekter mindre klager over overtemperatur, hvilket illustrerer vigtigheden af brug af solafskærmning i lavenergibyggeri fremover.

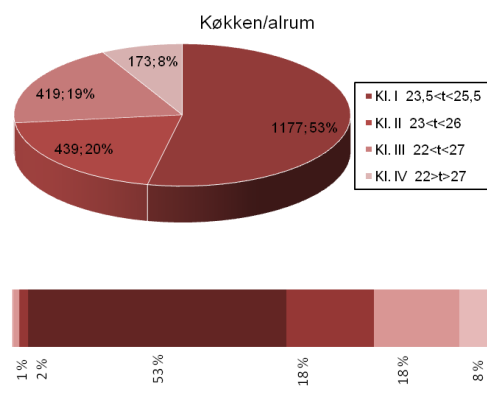
3.3.2 Erfaringer fra Komforthusene

Der er i flere huse fundet store problemer med overophedning i løbet af sommeren, men der er også i nogle af husene fundet effektiv solafskærmning, som sikrer at huset ikke overopheder i løbet af sommeren.

Figur 3.2 og Figur 3.3 viser resultaterne fra sommerperioden i henholdsvis hus 28 og hus 47. I begge huse er kategori II opnået ca 70% af tiden. I den resterende del af tiden forekommer der næsten udelukkende temperaturer over 26°C.



Figur 3.2: Hus 28: Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue i 2010.



Figur 3.3: Hus 47: Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue i 2011.

Fælles for de to huse er, at vinduerne i de pågældende rum kun er delvist eller slet ikke er afskærmet for solen. Husene ses i Figur 3.4 og Figur 3.5. I hus 28 er det ene af tre vinduespartier i stuen overdækket af det faste udhæng. Desuden er der monteret indvendige gardiner. I hus 47 er der ikke monteret hverken indvendig eller udvendig solafskærmning.

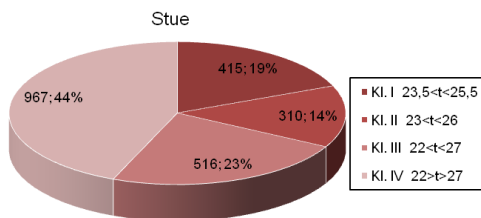


Figur 3.4: Hus 28: Eksempel på delvis solafskærmning

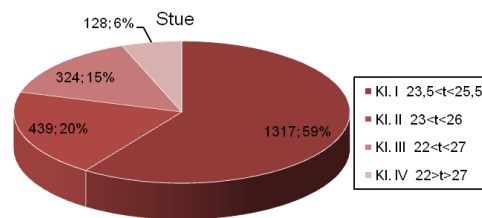


Figur 3.5: Hus 47: Manglende solafskærmning

Figur 3.6 og Figur 3.7 viser effekten af indvendig solafskærmning i en bolig. I sommeren 2010 er beboerne lige flyttet ind i hus 37. Der opnås denne sommer en stor andel af tid udenfor kategori II, og alle overskridelser er i den høje ende af skalaen, dvs temperaturer over 27°C. I 2011 er problemet markant reduceret efter montering af indvendige persienner i boligen.

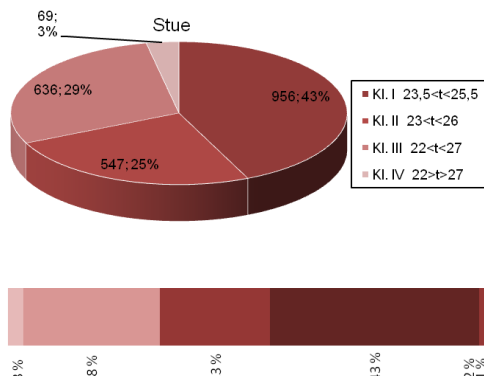


Figur 3.6: Hus 37: Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue, 2010.



Figur 3.7: Hus 37: Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue, 2011.

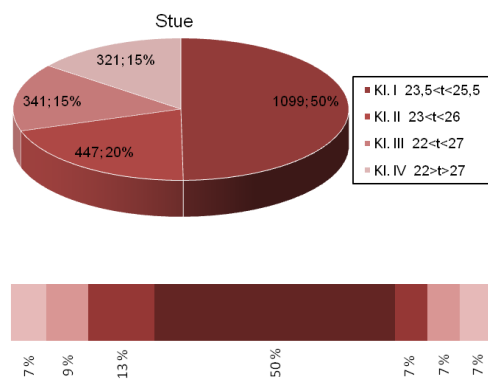
Tre af husene har med effektiv solafskærmning sikret behagelige sommertemperaturer for deres beboere. De forskellige typer af afskærmning gennemgås i næste afsnit (afsnit 3.3.3), men effekten af de gode løsninger ses i Figur 3.8 til Figur 3.12.



Figur 3.8: Hus 39. Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue i 2010.



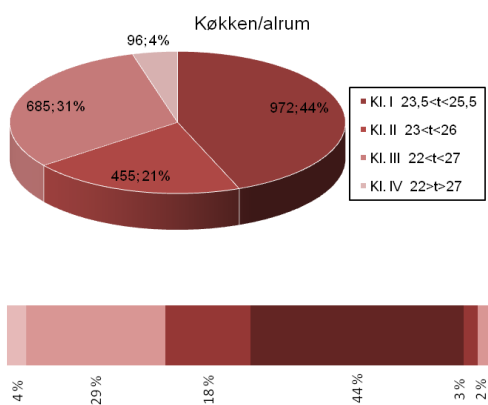
Figur 3.9: Solafskærmningen i hus 39.



Figur 3.10: Hus 43. Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i stue i 2011.



Figur 3.11: Solafskærmningen i hus 43.



Figur 3.12: Hus 45. Timefordeling i komfortklasser for sommersituation i køkken/alrum i 2010.



Figur 3.13: Solafskærmningen i hus 45.

Fælles for de tre huse er, at kategori II opnås i ca. 70% af tiden. Når overskridelserne vurderes ses det, at de ikke skyldes overtemperaturer, men i stedet i de fleste tilfælde skyldes lavere temperaturer – dvs temperaturer under 23°C. I hus 39 og hus 45 er dette tilfældet ved stort set alle overskridelser. I hus 43 er der også overskridelser mod højere temperaturer. Resultaterne for disse boliger viser en effektiv brug af solafskærmning i husets design. Det skal dog bemærkes, at der i hus 45 i værelset, som ikke har nogen form for solafskærmning, ses en tydelig effekt af den manglende afskærmning. Dette værelse har samme problemer som de øvrige huse uden afskærmning - nemlig overtemperatur.

Ud over de tre ovennævnte huse findes der i hus 49 heller ikke mange timer med overtemperatur. Dette hus har dog ikke nogen form for udvendig solafskærmning, men kommer af med varmen på anden vis. I huset er der monteret ovenlysvindue, hvilket kunne være forklaringen på det behagelige indeklima i huset, da et ovenlysvindue kan sikre et godt luftskifte ved naturlig ventilation.

3.3.3 Integration af solafskærmning

Brug af solafskærmning i boliger har ikke hidtil været standardløsninger, men erfaringerne beskrevet i de foregående afsnit viser, at det fremover er nødvendigt at inddrage muligheden for dette i dansk lavenergibyggeri.

Ved valg af solafskærmning er der stor variation i type og teknologi, men fælles for alle typer solafskærmning er, at afskærmningen bør være

udvendig, da dette giver den mest effektive afskærmning [SBI202]. Ved den udvendige løsning kommer solens stråler nemlig slet ikke indenfor i bygningen, som den gør ved indvendige løsninger, og en effektiv udvendig solafskærmning kan derfor reducere solindfaldet med omkring 70-80% og samtidig bibeholde en del af udsynet.

I Figur 3.14 ses fire eksempler på afskærmning. *Illustration a.* viser automatisk, integreret solafskærmning i hus 43, som kan køres op under facaden, og dermed kun er synlig når den er i brug. *Illustration b.* viser fastmonteret afskærmning monteret over det nederste vindue i hus 45. Her fungerer selve konstruktionen som afskærmning for den øverste del af vinduet. *Illustration c.* viser manuel solafskærmning i hus 39 i form af skodder, der trækkes for vinduerne kombineret med fastmonteret afskærmning over vinduerne. I *Illustration d.* er det tiltænkt, at der med tiden skal vokse løvfaldende beplantning op som afskærmning over terrasserne på hhv 1. sal og stueplan.

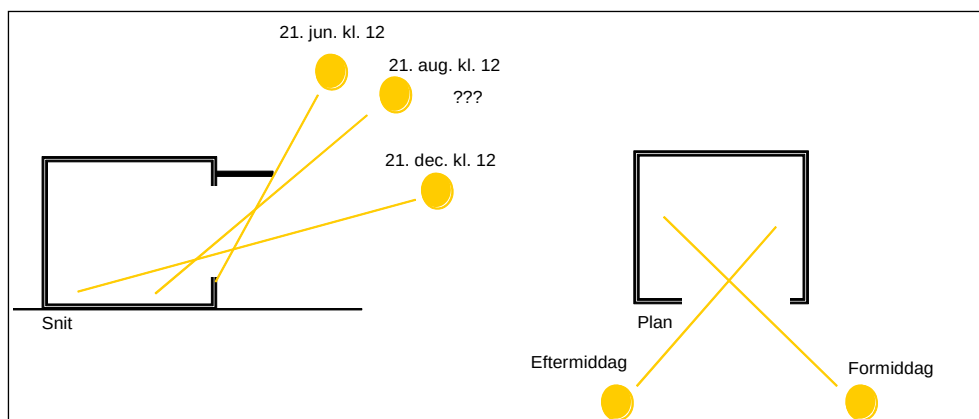


Figur 3.14. Eksempel på udvendig solafskærmning.

Der er fordele og ulemper ved alle de forskellige typer af afskærmning, og valget af løsning vil derfor variere fra projekt til projekt. Den automatiske løsning (a.) har den fordel, at der bliver rullet ned for afskærmningen selvom huset beboere ikke er hjemme. De undgår dermed at komme hjem til et overophedet hus. Ulempen ved denne løsning er prisen samt vedligehold.

Den manuelle solafskærmning (c.) med justerbare lameller eller skodder er en driftssikker løsning med et minimum af vedligehold, men korrekt brug af løsningen kræver, at brugerne husker at få rullet den for vinduerne fx om morgenen inden huset forlades.

Ved design af fastmonteret solafskærmning (b. og c.) benyttes solens højde på himlen til beregning af udhængets længde. Ofte beregnes der således, at solen afskærmes om sommeren men kommer ind i bygningen om vinteren. Ved beregningen er det væsentligt, at der regnes for et tidsinterval symmetrisk omkring 21/6 når solafskærmningen bestemmes, da det er den dag solen står højest på himlen. Hvis der kun beregnes for selve den 21/6 vil solen komme ind i bygningen alle andre dage. Problematikken i dette er illustreret i Figur 3.15, hvor det ses, at solen i det givne eksempel vil komme ind i bygningen fx i august måned, hvor der stadig ikke er behov for det, men også formiddags- og eftermiddagssituationen, hvor solen står lavere på himlen, kan være kritisk.

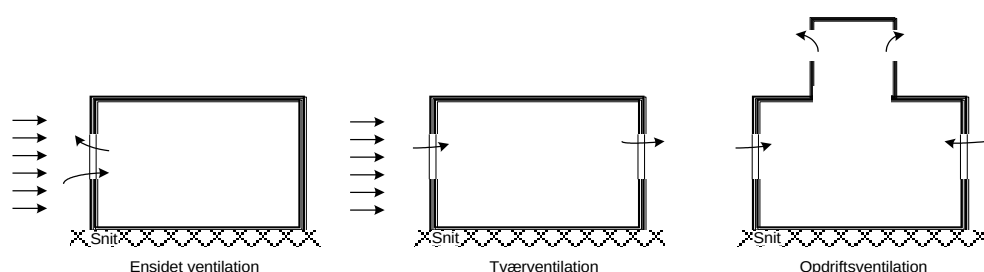


Figur 3.15. Vurdering af bygningen som solafskærmning.

3.3.4 Aktiv brug af naturlig ventilation

Da overtemperaturer i boligen kan fjernes effektivt ved brug af naturlig ventilation i både dag- og nattetimer er det væsentligt, at det også er muligt at bruge dette aktivt. For at sikre muligheden for dette, skal brug af naturlig ventilation indtænkes i husets design allerede fra opstarten af designprocessen.

De mest effektive måder at bortventilere den varme luft på er ved enten tværv ventilation eller termisk opdrift (kræver højdeforskel i boligen mellem åbningerne). Herudover kan suppleres med ensidet ventilation, hvor kun et vindue i rummet åbnes. De tre typer ventilation er illustreret i Figur 3.16. Opdriftsventilationen vist til højre kan også kombineres med tværv ventilation.

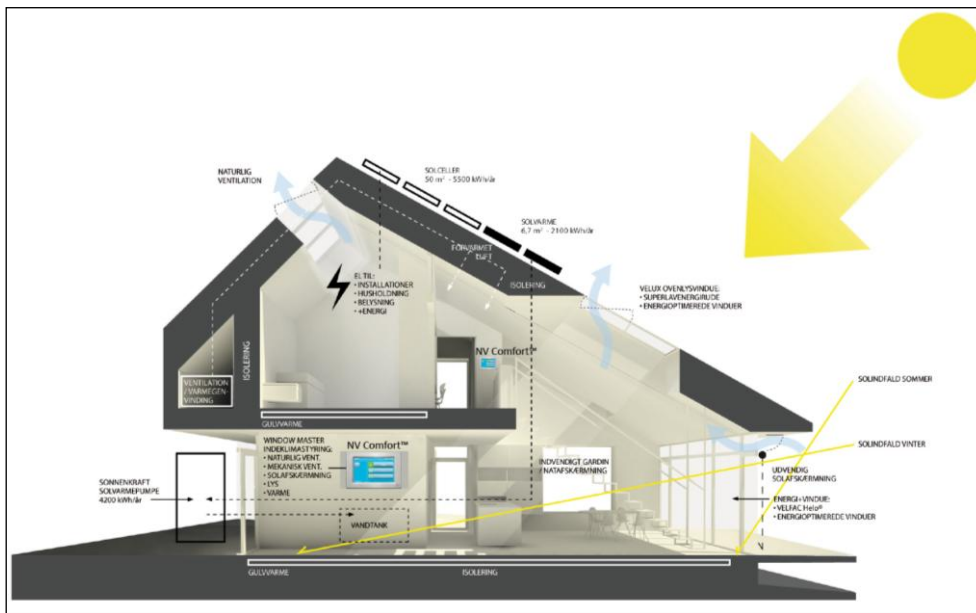


Figur 3.16. Principper for naturlig ventilation.

For at sikre en optimal løsning for brug af naturlig ventilation i boliger er det væsentlig, at der kan åbnes vinduer, eller alternativt ventilationslemme, hele døgnet rundt. Dvs at der skal være mulighed for at holde vinduerne åbne i dagtimerne, når husets beboere ikke er hjemme, og i nattetimerne, når alle sover. Dette skal naturligvis gøres med sikrede åbninger og i overensstemmelse med gældende forskriftsregler.

Et eksempel på brug af naturlig ventilation fra designfasens start findes bl.a. i "Bolig for Livet" opført i Lystrup nær Århus, hvor ventilationsåbninger til naturlig ventilation er en integreret del af designet i bygningen. Her bruges den naturlige ventilation som den eneste form for ventilation i sommerperioden. I overgangsperioderne forår og efterår bruges hybrid ventilation, hvor enten mekanisk eller naturlig ventilation vælges afhængig af udetemperatur, således at den bedste komfort og det laveste energiforbrug opnås. Om vinteren bruges naturlig ventilation som supplement til den mekaniske ventilation med varmegenvinding. Styringen

af vinduesåbningerne foregår automatisk, og princippet i ventilationsstrategien ses i Figur 3.17.



Figur 3.17. Principperne for naturlig ventilation i "Bolig for Livet" [VKR, 2010]

I sommerperioden vil styringen af den naturlige ventilation som udgangspunkt foregå efter rumtemperaturen med åbning af vinduerne for køling, men også CO₂ og relativ luftfugtighed kan påvirke åbningsgraden. Åbningsgraden bliver beregnet ud fra det ønskede maksimale luftskifte, vejrdata osv. Brugeren kan selv øge eller mindske hvor aktiv reguleringen skal være.

Hvis der ikke er behov for køling, men der registreres en høj CO₂-værdi kan styringen overgå til aktiv puls-udluftning, hvor der ventileres med korte udluftninger. Alternativt kan brugeren kan indsætte puls udluftninger på faste tidspunkter.

For at reducere energiforbruget mest muligt, startes ventilationsanlægget kun efter behov hvis én eller flere zoner kalder på hybrid assistance. Hver zone med hybridmulighed kan kalde på hybridassistance med baggrund i målinger af temperatur, CO₂ eller relativ luftfugtighed.

Som nævnt er en del af vinduesåbningerne i dette eksempel tænkt til brug af naturlig ventilation allerede fra projektets opstart. Dermed kunne det også indtænkes, at der skal tyverisikres således, at systemet kan fungere i et tomt hus samt i nattetimerne, hvor natkøling er en del af ventilationsstrategien. Placering og udformning af åbningerne ses i Figur 3.18.



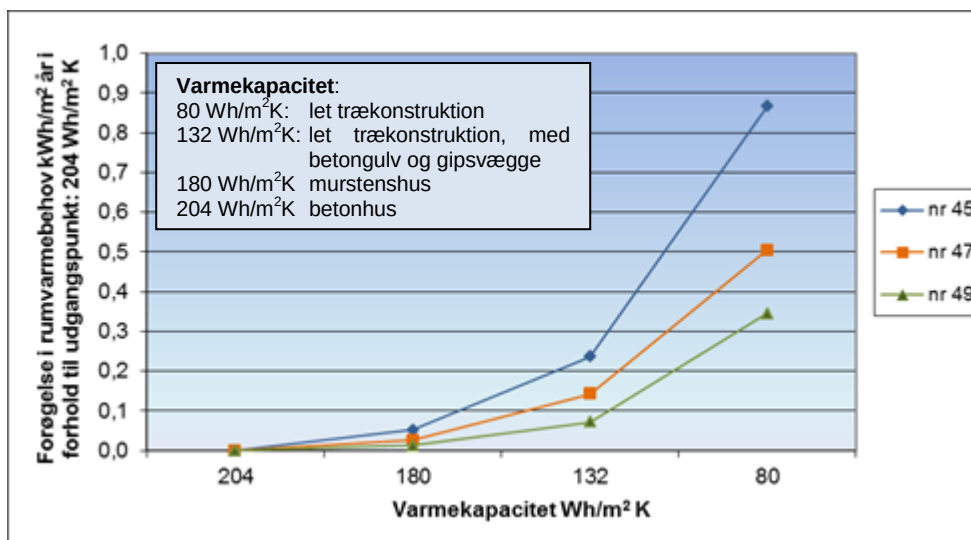
Figur 3.18. Placering af ventilationsåbninger i "Bolig for Livet" [VKR, 2010]

3.4 Effekt af termisk masse

Der er i Komforthusene brugt flere forskellige løsninger til konstruktion af huset, gående fra (tunge) betonkonstruktioner til (lette) trækonstruktioner. I den forbindelse blev det i processen diskuteret, hvorvidt den termiske masse er vigtig i et lavenergibyggeri for således at kunne lagre overskudsvarme og dermed udjævne indetemperaturen og undgå meget høje temperaturer indendørs.

Erfaringerne har vist, at den termiske masse kan skabe problemer i de tilfælde, hvor den ikke køles ned i løbet af natten – dvs hvor den naturlige ventilation ikke leverer en køleeffekt, der er stor nok til at kunne køle konstruktionen ned. Erfaringsmæssigt kræves der et luftskifte på ca. $4-8h^{-1}$ i løbet af natten for at sikre en tilpas køleeffekt i konstruktioner med høj termisk masse [Artmann et al, 2008]. Køles konstruktionen ikke ned vil rummet opleves ubehageligt varmt, og i dette tilfælde vil en let konstruktion have fungeret bedre, da der her langt hurtigere kan køles ned ved udluftning.

På samme vis, som termisk masse i nogle tilfælde kan udjævne overtemperaturer om sommeren ved at lagre varmen i konstruktionen, kan det også bidrage til en besparelse på varmeregningen i opvarmningssæsonen. Figur 3.19 viser hvorledes rumvarmebehovet ændres når den termiske masse i bygningen mindskes. Analysen er lavet i forbindelse med Komforthus-projektet, og er baseret på PHPP-beregningen fra tre forskellige huse i projektet. [Komfort Husene: erfaringer, 2010]



Figur 3.19. Ændring i rumvarmebehov ved ændring af husets varmekapacitet. [Komfort Husene: erfaringer, 2010]

Det ses af beregningen, at varmebehovet stiger ved mindre termisk masse i konstruktionen, da evnen til at lagre varme fra perioder med fx stort solindfald reduceres. Ved en variation fra det tungeste byggeri til let byggeri, kan det ekstra rumvarmebehov variere fra 0,3 til 0,9 kWh/m² år. Det største spring er fra let til meget let byggeri (132 til 80 Wh/m²K), hvor kurvens hældning ændres kraftigt.

Stigningen er afhængig af husets øvrige udformning, som det fremgår af eksemplet, hvor der er brugt tre forskellige huse. Samtidig er stigningen i varmebehov minimal, og viser det sig, at det giver større ulemper i sommerperioden end gavn i vinterperioden, bør det overvejes en ekstra gang hvorvidt stor termisk masse er gavnligt i lavenergibyggeri.

3.5 Utilstrækkelig opvarmning

I takt med at husenes varmebehov reduceres bliver korrekt dimensionering af tekniske installationer og beregning af dimensionsgivende varmetab stadig mere kritisk, idet der ofte køres lige på grænsen mellem, hvor meget varme der kan tilføres, og hvor meget varme der tabes. Dette kapitel vil beskrive erfaringerne med utilstrækkelig opvarmning af lavenergihuse og de kritiske punkter i designprocessen i denne sammenhæng.

3.5.1 Generelle erfaringer

Ved design af lavenergihuse er det ofte meget små mængder energi der skal tilføres huset for at opvarme det i vinterperioden. Hvis der ved anlægsudformningen vælges en mulig tilført effekt, der ligger meget tæt op ad det beregnede varmetab, vil huset opleve situationer med utilstrækkelig kapacitet i anlægget så snart de aktuelle tilstande i huset afviger fra beregningsforudsætningerne. Dvs i situationer, hvor udetemperaturen er lavere end -12°C og rumtemperaturen ønskes højere end 20°C, i situationer hvor ventilationsanlægget afrimer og ikke kan levere den forudsætte indblæsningstemperatur, i situationer hvor folk er på arbejde eller ferie, og den interne belastning er reduceret eller i andre situationer, hvor huset bare ikke svarer til beregningerne, og dermed kræver øget effekt afgivet fra husets ventilations- og/eller varmeanlæg.

Ved valg af varmeforsyning i boligen, er der i lavenergihuse i dag brugt forskellige løsninger gående fra huse udelukkende opvarmet via ventilationsluft til huse opbygget med et traditionelt vandbåren opvarmningssystem i form af radiatorer og/eller gulvvarme. Opvarmningen via luft er den billigste løsning, da installation af radiatorer og/eller gulvvarme hermed kan spares, men løsningen med luftopvarmning kan også give dårlig termisk komfort i boligen, da den besværliggør eller fjerner muligheden for individuel rumregulering. I et omfattende svensk projekt med i alt 93 boliger er en generel konklusion, at beboere der var utilfredse med opvarmningen af boligen alle efterspurgte radiatorer i stedet for luftopvarmning [Janson, 2010]. Årsagen til dette angives ikke, men det skyldes muligvis, at beboerne mangler mulighed for selv at kunne påvirke temperaturen i deres bolig.

Brugen af et vandbåren varmesystem vil kunne give beboerne mulighed for individuel regulering af temperaturer i alle boligens rum. Systemet kan enten udformes som gulvvarme eller som radiatorer. Fordelen ved radiatorerne er den hurtige reaktion ved regulering. Denne fordel er bl.a.

fundet af beboerne i "Bolig for Livet", som ville have valgt radiatorer frem for gulvvarme i alle rum, hvis de havde haft mulighed for at vælge om efterfølgende. [VKR, 2010]

Ved alle typer opvarmningssystem er det dog vigtigt at der, ligesom i tidligere standard byggeri med høje varmetab, stadig beregnes et dimensionerende varmetab for alle rum på individuel basis. Hermed sikres, at rum placeret i husets hjørner (som dermed har to ydervægge) også kan opvarmes på lige fod med resten af huset.

Brugernes adfærd spiller også en rolle når problemet med utilstrækkelig opvarmning skal vurderes. Fx via kraftig afkøling af huset i vinterperioden, hvilket sker ved manuel udluftning via vinduerne. Huset bør have mekanisk ventilation, som skal kunne klare friskluftsbehovet i de kolde perioder, da der ved brug af mekanisk ventilation anvendes varmegenvinding, og varmetabet ved ventilation kraftigt reduceres.

Ved vurdering af erfaringer fra lignende svenske undersøgelser ses der også en tendens til problemer med lave temperaturer i vinterperioden. Således ønskede 50% af beboerne en højere temperatur i vinterperioden i et projekt omfattende 40 lejligheder fra 2006 i Värnamo i det sydlige Sverige – de øvrige 50% var tilfredse. [Janson, 2010]

I et andet projekt med energirenovering af 40 lejligheder i Alingsås nær Göteborg i 2005 opstår der bl.a. problemer med lave temperaturer (helt ned til 16,9°C) på grund af el-besparende adfærd hos en beboer. El-forbruget i lejligheden er medregnet som internt tilskud til varmebalancen, men beboeren, som bor alene i lejligheden, er meget opmærksom på sit el-forbrug. Dette medfører, at der næsten ikke bruges el i denne lejlighed. Det interne tilskud, der normalt kommer fra el-udstyr i boligen, er derfor minimalt, hvilket gør, at der mangler tilførsel af varme fra denne kilde. Håndklæde-tørreren, som skulle supplere med varme er også el-drevet, og tændes derfor ikke af beboeren. Løsningen blev i dette tilfælde, at boligforeningen valgte at betale for drift af håndklæde-tørreren. [Janson, 2010]

I et projekt af Isakson fra 2001 analyseres energiforbrug og indeklima i 20 rækkehuse opført som lavenergihuse. Beboerne oplever her problemer med at opvarme husene, og især gavlhusene har store problemer med at holde rumtemperaturen på et komfortabelt niveau. Der er i alle boliger installeret en 900 W varmeplade i ventilationsanlægget. Dette er i gavlhusene ikke nok, og der eftermonteres derfor el-radiatorer. Flere beboere tænder ofte stearinlys og er meget bevidste om hvornår de fx skal bruge tørretumbleren for at kunne holde huset varmt. [Isakson, 2006]

3.5.2 Erfaringer fra Komforthusene

Der er i flere af Komforthusene oplevet problemer med utilstrækkelige muligheder for at opvarme husene. Problemerne er midlertidigt blevet løst ved at opsætte el-radiatorer og gasovne, men da disse varmekilder er væsentligt dyrere i drift end fx jordvarmepumpen, som sidder i mange af husene, er der i efteråret 2011 søgt andre løsninger. Løsningerne fra efteråret 2011 påvirker ikke måleprogrammet, men i forbindelse med monteringen af el-radiatorerne og øvrige ekstra varmekilder er energien til disse ikke blevet registreret. Dette har medført, at der ikke i alle huse kan gives et reelt billede af energiforbruget til rumopvarmning, da de ekstra varmekilder ikke registreres.

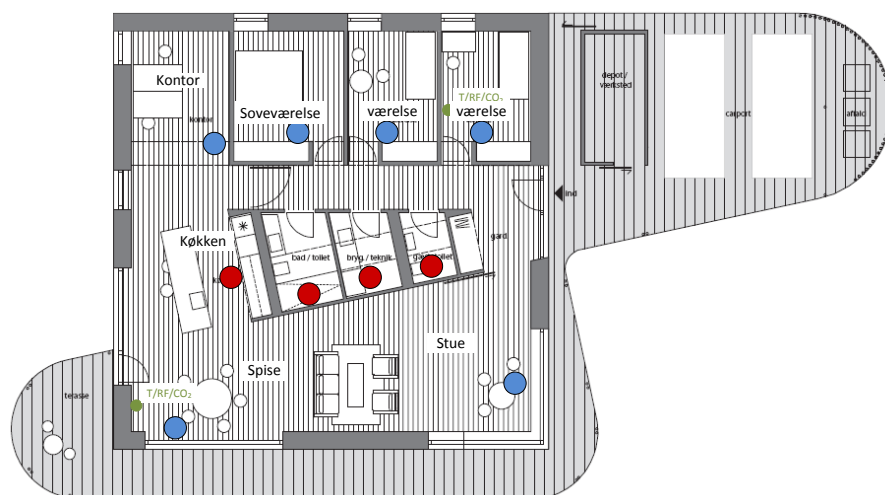
Der er eftermonteret ekstra varmekilder i følgende huse:

- Hus 28: 2 el-radiatorer er monteret på børneværelserne i husets vestlige ende i efteråret 2010. I efteråret 2011 er det søgt at løse problemet ved forøget lufttilførsel til rummet. Denne var i første omgang næsten blokeret af møbler på værelserne. Desuden er et gulvvarmefelt i stuen tilsluttet varmepumpen.
- Hus 37: El-radiator opstillet januar 2010. El-radiatoren blev i maj 2010 erstattet af en radiator tilkoblet jordvarmepumpe, da el-løsningen var en alt for dyr løsning. Der er ikke registreret energi til hverken el-radiator eller vandbåret radiator.
- Hus 45: Gasovne opstillet november 2010. Disse er senere erstattet af 3 stk el-radiatorer.

3.5.3 Case study: Varmetab fra kritisk rum

Følgende case study er medtaget for at vise hvorledes problemet med utilstrækkelig opvarmning kan opstå, og hvordan det kan afhjælpes. I dette tilfælde er problemet opstået som en kombination af flere forskellige u hensigtsmæssige parametre, men som nævnt i afsnit 3.5.1, vil en enkelt afvigelse fra dimensioneringsforudsætningerne kunne skabe problemer i de tilfælde, hvor den maksimalt mulige tilførte effekt er tæt på det dimensionerende varmetab.

Huset brugt i dette case study er hus 37, som er vist i Figur 3.20. På samme figur ses placering af termaturmålere i husets stue og værelse mod nordvest (markeret med grønne mærker). Alle målere er placeret i h=1,6 m. Yderligere information om målingerne findes i den husspecifikke rapport for hus 37.

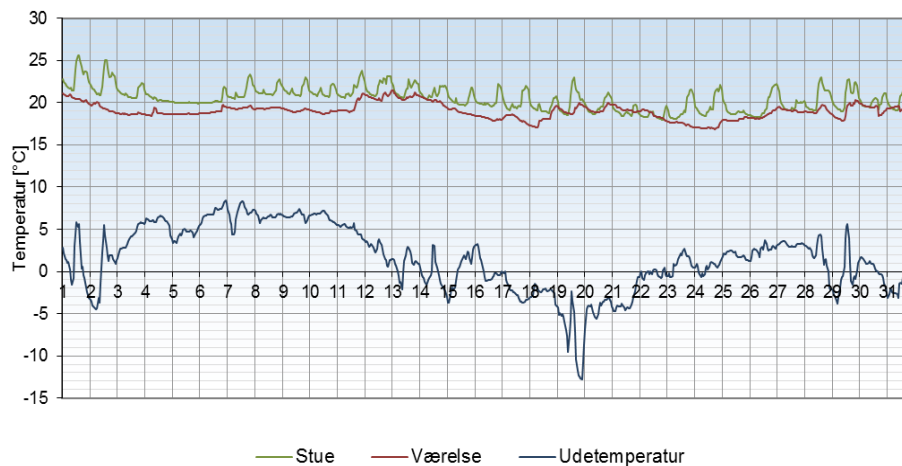


Figur 3.20. Placering af termaturmåligerne i stue og værelse (markeret med grønnt) samt indblæsning (blå cirkler) og udsugning (røde cirkler) af ventilationsluft.

Huset er forsynet med et Nilan VP18 kompaktanlæg og tænkes opvarmet udelukkende ved luftopvarmning. Dog er der tilføjet gulvvarme via et vandbåren system i husets badeværelser (varme leveres fra jordvarmepumpe), men dette bidrag er ikke indregnet i husets varmetilskud ved dimensionering af afgivet effekt fra ventilationsluften.

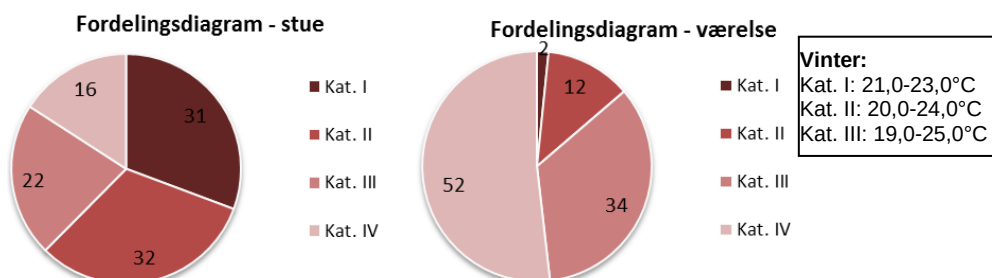
Betragtes temperaturerne målt i hhv stue og værelse mod nordvest findes forløbet vist på Figur 3.21 for december samt Figur 3.23 for januar. I

december ses, at indetemperaturen begynder at falde midt i december, hvor udetemperaturen falder. Dog er der i hele måneden problemer med temperaturen i værelset mod nordvest.



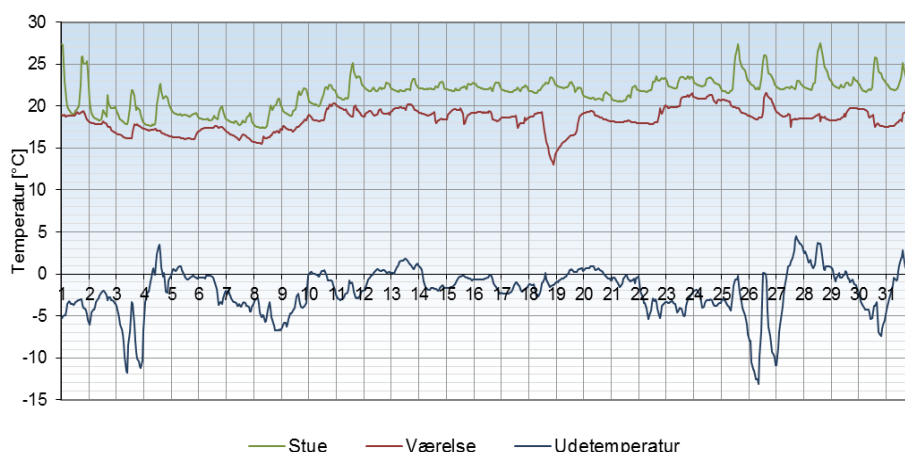
Figur 3.21. Temperaturer målt december 2009.

Temperaturfaldet, som følger udetemperaturen viser, at anlægget har nået sin kapacitetsgrænse, og dermed ikke formår at opvarme huset. Vurderes den termiske komfort i december fås fordelingen i Figur 3.22. Her fremgår det, at der langt fra har været termisk komfort (dvs temperaturer over 20°C for opnåelse af kategori II) i boligen, og især værelset mod nordvest er kritisk.



Figur 3.22. Vurdering af det termiske indeklima i hhv stue og værelse mod nordvest, december 2009.

Opvarmningsproblemerne fortsætter indtil 9. januar 2010 (jf Figur 3.23), hvor der eftermonteres en el-radiator i huset. Efter montering af denne opnås atter rimelige komforttilstande i stuen, men temperaturen i værelset er fortsat i underkanten, og har stadig brug for ekstra varmetilførsel, som ikke sker via den nye radiator på grund af dårlig transport af varmen mellem husets rum.



Figur 3.23. Temperaturer målt januar 2010.

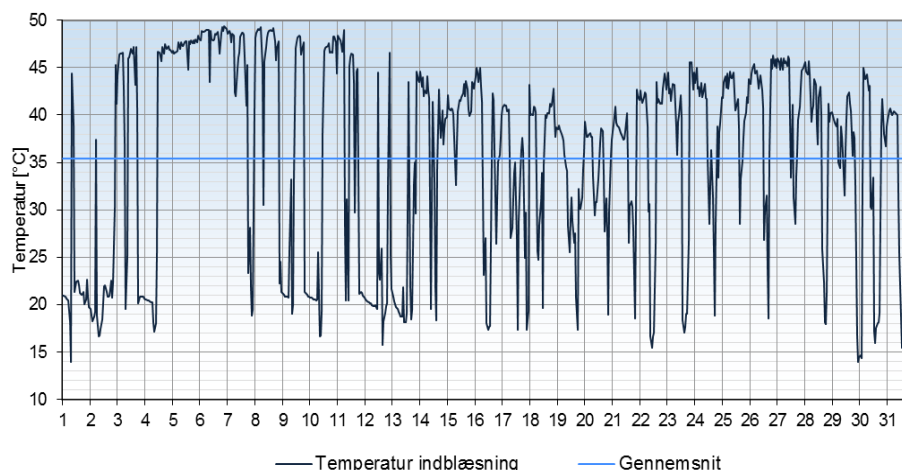
På samme vis som det var tilfældet ved overophedning er der heller ikke i dette tilfælde en ensartet fordeling af temperaturen i boligen, hvilket atter understreger det nødvendige i at regne på boligen som flere temperaturzoner, hvor varmetab og varmetilskud er forskellige fra zone til zone.

Hvor går det galt?

Der er i ovenstående case study flere fejlkilder, og som nævnt i afsnit 3.5.1, er det ofte blot en enkelt parameter, der skal afvige fra beregningsforudsætningerne, for at der opstår problemer. I dette tilfælde blev problemet senere løst ved at indsætte en radiator i stuen tilkoblet jordvarmepumpen, da der var nok kapacitet i denne. Havde der ikke været kapacitet her, kunne en løsning have været en fast el-radiator, hvilket ikke ville være hensigtsmæssig i energiregnskabet.

En fejlkilde er i dette tilfælde indblæsningstemperaturen fra husets anlæg, som i beregningerne er forudsat til 52°C. Denne temperatur er hvad der anbefales fra det tyske passivhus institut, og som typisk bruges i tyske passivhuse [Feist, 2007]. Den høje temperatur vil dog kræve en høj hastighed af indblæsningsluften for at sikre en god ventilationseffektivitet, da varm luft stiger opad, og dermed naturligt gerne vil lægge sig som en pude under loftet. Dette problem er af generel karakter, og det bør pointeres, at et armatur, som muliggør høj impuls i indblæsningsluften, bør vælges i tilfælde med forhøjet indblæsningstemperatur.

Ved vurdering af indblæsningstemperaturen i dette eksempel ses, at temperaturen aldrig når over 49°C, og gennemsnitstemperaturen kun er 35,4°C, jf Figur 3.24. I perioden efter 17. december, hvor udetemperaturen begynder at falde, bliver indblæsningstemperaturen endnu lavere. Samtidig er der mange perioder med afrimning af anlægget som medfører yderligere sænkning af indblæsningstemperaturen.



Figur 3.24. Indblæsningstemperaturen fra kompaktanlægget, december 2009.

Ulemperne ved brug af luftvarme findes også i en analyse foretaget i forbindelse med valg af opvarmningssystem til Minergie® og Minergie®-P husene i Schweiz. Her konkluderes det, at ulemperne ved brug af denne type opvarmningssystem er for store i forhold til de besparelser der opnås ved ikke at bruge vandbåren opvarmning. [Minergie® Agentur Bau, 2007] EBST har valgt at følge denne anbefaling ved udmeldingen af den kommende bygningsklasse 2020, hvor det ikke længere er muligt udelukkende at benytte luftvarme.

En anden fejlkilde i problemet med opvarmningen kan være manglende kontrol af varmetabet fra værelset mod nordvest. Hvis dette varmetab er større end den varme der kan tilføres via ventilationsluften, vil værelset ikke have mulighed for at opnå komforttemperaturer, da der ikke er mulighed for yderligere varmetilførsel til rummet fra fx radiatorer eller gulvvarme.

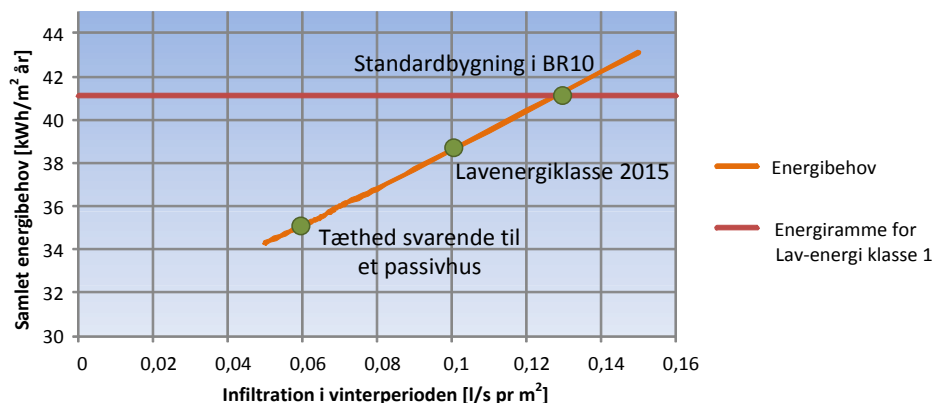
En tredje parameter, der kan ændre energibehovet og dermed medføre kolde rum pga utilstrækkelig mulighed for varmetilførsel, er brugerens vane med at udlufte via vinduerne i længere perioder i vinterhalvåret. I denne periode bør ventilationsanlægget klare udluftningen således, at varmen i udsugningsluften genanvendes via anlæggets varmeveksler. Dette sker netop ikke når der luftes ud via vinduerne, og varmetabet ved denne form for udluftning bliver dermed ekstra krævende for varmeinstallationen. Lidt det samme problem forekommer i huse uden vindfang, da store mængder af luft vil forsvinde ud når yderdøren står åbent. Her vil et vindfang kunne reducere varmetabet kraftigt.

3.6 Lufttæthedens betydning for varmebehovet

En væsentlig parameter for energibehovets størrelse er tætheden af byggeriet. Er byggeriet utæt, vil infiltration medføre indtrængen af koldt luft i boligen, som kræver opvarmning fra husets almindelige varmekilder. Hvis disse i forvejen er projekteret med en lille eller ingen sikkerhedsmargin, vil en øget infiltration, i forhold til forudsætningen i beregningerne, hurtigt kunne medføre problemer med opvarmning af boligen.

For at illustrere denne problematik beregnes energibehovet for en 181 m² 2-plans bolig svarende til lavenergiklasse 1 i BR08. Den eneste parameter der varierer i beregningen er infiltrationen i vinterperioden (dvs opvarmningssæsonen, hvor dette problem vil kunne opstå). Resultatet er

vist i Figur 3.25. Her fremgår det, hvor vigtig tætheden af boligen er når energibehovet beregnes, da en utæt bygning med høj infiltration hurtigt vil kunne mærke det på energiregningen til opvarmning. På figuren er medtaget infiltration svarende til både en standardbygning og en lavenergiklassebygning i BR10.



Figur 3.25. Energibehovet som funktion af infiltrationen [Larsen et al, 2011]

Udover de danske krav til tæthed er infiltration svarende til tæthedskravet i et passivhus¹ medtaget for at illustrere fordelene ved denne tætning, som her resulterer i en yderligere besparelse på knap 4 kWh/m² pr år i forhold til den danske lavenergiklasse 2015 bygning.

3.7 Opsummering

Det termiske indeklima i Komforthusene er vurderet ud fra både for høje og for lave temperaturer. Alle målinger er holdt op imod krav fra DS/EN 15251, krav til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020 samt anbefalinger fra PHI om maksimalt 10% af tiden over 25°C. Ved vurderingen fremgår det, at der er stor forskel på hvordan husene fungerer termisk. Fælles for næsten alle husene er, at de ikke kan overholde kriterierne på hhv 100 timer over 26°C og 25 timer over 27°C til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020. Kun to huse kan overholde dette krav. Ved vurdering af PHI-anbefalingen om 10% af tiden over 25°C samt en maksimal afvigelse fra kategori II på 3% eller 5% af tiden klarer tre huse testen.

Overophedning

En af de vigtigste konklusioner, når problematikken med overophedning vurderes, er, at det fremover er væsentligt at inddrage muligheden for aktiv brug af naturlig ventilation i vores boliger kombineret med udvendig solafskærmning. Den aktive brug af naturlig ventilation skal forstås således, at det også i dagstimerne, hvor boligen står tom, eller om natten, skal være muligt at ventilere naturligt, og dermed gøre brug af den "gratis" køleeffekt vi får stillet til rådighed ved blot at åbne vinduerne. For at dette kan blive muligt, uden risiko for indbrud, skal åbningerne i boligen indtænkes fra designfasens start, og huset designes ud fra muligheden for naturlig ventilation, da det kan være svært at skabe denne mulighed, når huset først er opført.

¹ Omregningen fra de tyske krav er foretaget ud fra en antaget rumhøjde på 2,5 m og en netto/brutto faktor på 0,83.

Udover inddragelse af naturlig ventilation og solafskærmning er det diskuteret hvorvidt tunge konstruktioner (og dermed termisk masse) kan påvirke indetemperaturen i enten en positiv eller negativ retning i en varm sommerperiode. Her blev det konkluderet, at den termiske masse kun har en positiv effekt så længe det er muligt at køle konstruktionen ned i nattetimerne, dvs at brug af termisk masse kun fungerer, når det er muligt at tilvejebringe et passende stort luftskifte i nattetimerne via den naturlige ventilation. Opnås dette ikke, kan den termiske masse i stedet forøge problemerne med overophedning af bygningen.

Utilstrækkelig opvarmning

Ved vurdering af problemer med utilstrækkelig opvarmning er et af de kritiske punkter, hvor tæt varmeanlæggets maksimale effekt ligger på husets dimensionerende varmetab. Er disse to størrelser forholdsvis tæt på hinanden vil bygningen blive væsentligt mere følsom for afvigelser mellem det opførte hus i driftstilstanden og beregningsforudsætningerne. Dog vil kraftig overdimensionering af anlægget fordyre projektet, så disse parametre skal afbalanceres.

Et andet punkt, når problemer med utilstrækkelig opvarmning skal vurderes, er den reducerede eller manglende mulighed for brug af individuel regulering af rumtemperaturen, når der udelukkende bruges luft som opvarmning. Dette kan bl.a. komme til udtryk ved de kolde hjørnerum i en bolig, som kræver øget varmetilførsel, noget der også fremhæves af Minergie® Agentur Bau i deres undersøgelse af luftvarme til opvarmning af boliger [Minergie® Agentur Bau, 2007]. Er der i boligen dårlig fordeling af varme mellem rum (fx pga lydisolering i væggene mellem de enkelte rum), vil en individuel reguleret varmforsyning i hvert rum også kunne forbedre komforten i rummet.

Problematikken med den uens varmefordeling mellem rummene understreger desuden nødvendigheden i at regne på boligen som flere temperaturzoner, hvor varmetab og varmetilskud er forskellige fra zone til zone.

4. Atmosfærisk indeklima

Ved vurdering af det atmosfæriske indeklima sammenholdes målinger af CO₂-niveau, relativ luftfugtighed (RF) og ventilationsrater for bl.a. at vurdere, om ventilationsmængderne har været tilstrækkelige i husene. Denne vurdering er væsentlig, da Komforthusene alle har fået dispensation fra BR08 til at køre behovsstyret ventilation. En ventilationsform, som i dette projekt har medført, at samtlige huse kører med et mindre luftskifte end bygningsreglementet foreskriver.

4.1 Vurderingskriterier

En grundig gennemgang af vurderingskriterierne for det atmosfæriske indeklima findes i "Bilag A: Krav til indeklima og energiforbrug". Tabel 4.1 viser i overordnede træk de kriterier, der er evalueret efter i husene. Kriterierne tager udgangspunkt i DS/EN 15251.

Atmosfærisk	Kriterium	Maks. afvigelse	
		Måned	År
CO ₂	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
	Klasse II	8 h i træk	-
Relativ fugtighed	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
	Klasse II	24 h i træk	-
	$\varphi < 45\%$	1 måned i træk på nær 10 timer	-
	$\varphi > 75\%$	1 %	-

Tabel 4.1: Vurderingskriterier for det atmosfæriske indeklima.

4.2 Overordnet vurdering ift vurderingskriterier

Det atmosfæriske indeklima i Komforthusene blev vurderet ud fra kriterierne angivet i Tabel 4.1. Vurderingen ses i Tabel 4.2 hvor vurderingen for stuen er medtaget, da dette rum anses for husets primære rum. Dog er sove- og børneværelser oftest mere kritiske end stuen når CO₂-niveauet vurderes. Disse rum er behandlet i afsnit 4.4. Informationer om husets øvrige rum findes desuden i de husspecifikke rapporter.

Da det ikke giver nogen mening at vurdere indeklimaet i husene i de perioder, hvor de har stået uden beboere, er der i tabellen angivet, hvornår husene er beboet ud for hvert årstal. Yderligere detaljer om dette fremgår af Figur 2.2.

Ved vurdering af CO₂-niveauet i boligerne er det væsentligt at se på hvornår husene er beboede. Her ses, at en del af husene overholder anbefalingen om maks 3% af tiden udenfor kat. II. Dog er der i hus 39 og hus 12 en del afvigelser fra anbefalingen. I hus 39 køres der med et lavt luftskifte, hvilket kan forklare afvigelserne. I hus 12 er luftskiftet højere, men her bliver stuen brugt i en stor del af opholdstiden. Desuden er der i efteråret 2009 problemer med anlægget, som medfører meget høje CO₂-koncentrationer i huset. Antallet af perioder med 8-timers afvigelse fra kat. II følger pænt med andelen af tid udenfor kat. II generelt.

		CO ₂ -niveau		Relativ luftfugtighed			
		Afv. fra kat. II [%]	8-timers perioder med afv. fra Kat. II [-]	Afv. fra kat. II [%]	24-timers perioder med afv. fra Kat. II [-]	Hele måneder med ϕ<45%	Tid med ϕ>75%
HUS 12 Køkken/ alrum	2009**	16	36	9	13	3	0
	2010**	9	11	30	32	3	0
	2011	13	26	12	9	2	0
HUS 28 Stue	2009**	0	0	20	12	3	0
	2010**	1	1	52	17	2	0
	2011	1	0	20	20	2	0
HUS 37 Stue	2009**	11	12	14	9	2	1
	2010**	6	12	32	27	2	0
	2011	3	1	5	1	2	0
HUS 39 Stue	2009*	0	0	24	11	2	0
	2010**	19	46	21	11	2	0
	2011	16	23	4	2	3	0
HUS 43 Stue	2009*	0	0	39	17	3	0
	2010**	3	5	43	16	3	1
	2011	3	4	29	19	2	1
HUS 45 Stue	2009*	0	0	15	8	2	0
	2010**	7	11	16	14	2	1
	2011	3	3	2	1	3	0
HUS 47 Stue	2009**	8	7	29	17	3	0
	2010	10	18	28	16	3	1
	2011**	0	1	33	19	2	1
HUS 49 Stue	2009*	0	0	11	6	2	0
	2010**	13	25	29	22	2	1
	2011	6	3	6	4	2	0

* Ikke beboet, ** Delvist beboet

Tabel 4.2: Resultat af indeklimavurdering for atmosfærisk indeklima. Rød tekst fortæller at vurderingskriterium ikke er overholdt. Grøn fortæller at kriterium er overholdt. Sort fortæller at der ikke er noget specifikt kriterium.

Ved vurdering af relativ luftfugtighed er det kun ganske få huse der kan overholde vurderingskriteriet med 3% eller 5% afvigelse fra kat. II. Overskridelserne skyldes for lave værdier af RF, som opstår igennem vinteren. De fleste huse har ikke problemer med for høje værdier af RF. Dog ses en tendens til, at soveværelser i direkte forbindelse med badeværelser, får forhøjede værdier af RF, idet fugten spredes fra badeværelset og ikke udsuges som den burde.

Alle huse opnår perioder på mindst en måned med $RF < 45\%$ og heller ikke i den anden ende af skalaen ved vurdering af $RF > 75\%$ er der problemer.

4.3 Behovsstyret ventilation

Med BR10 er der i begrænset omfang åbnet op for muligheden for behovsstyret ventilation i etageboliger. En del teknologier er stadig under udvikling og flere nye løsninger vil komme til. Et stort problem er imidlertid

at finde frem til en metode for styring af anlæggene. Der er en række problemer forbundet med at styre efter de oplagte parametre CO₂, relativ fugtighed eller temperatur, da man ved et reduceret luftskifte, som opretholder ovennævnte parametre på et acceptabelt niveau, måske udløser problemer med andre parametre såsom radon eller formaldehyd.

Ud fra ovenstående er det derfor vigtigt at få defineret hvilke parametre der skal indgå, når der tales behovstyret ventilation.

4.3.1 Generelle erfaringer

Ideen med brug af behovstyret ventilation kommer fra et energioekonomisk synspunkt. Det kan nemlig diskuteres, hvorvidt det er nødvendigt at ventilationsanlægget bruger energi på at ventilere en tom bolig, eller på at udskifte et stort volumen af næsten ren luft i boliger med lav intern belastning, hvis der i stedet kan justeres ned på luftmængden når behovet mindskes eller forsvinder, og tilsvarende justeres op på luftmængden når behovet for frisk luft forøges. Inden der overgås til behovsstyring af boliger og et eventuelt reduceret luftskifte, er det dog vigtigt at man, udover de typiske styringsparametre som CO₂, relativ fugtighed og temperatur, også analyserer virkningen ved reduceret luftskifte set i forhold til radon eller formaldehyd, som i dag ikke er direkte målbare, og derfor ikke kan indgå i ventilationsanlæggets styring.

Det der ofte diskuteres når der skal anvendes behovstyret ventilation er, hvilken eller hvilke parametre der skal reguleres efter. Oftest anvendes fugten som parameter, hvilket bl.a. er undersøgt for lejligheder i [Bergsøe et al, 2008]. Da for høj relativ luftfugtighed vil kunne medføre bl.a. kondensproblemer på vinduer, øget vækst af husstøvmider og i værste tilfælde fugt og råd i konstruktioner, er denne parameter yderst relevant, når der skal bestemmes en parameter til styring af ventilationsmængden.

En anden relevant parameter er den oplevede luftkvalitet, men denne parameter er ikke direkte målbar, og relateres derfor ofte til måling af CO₂, da begge parametre afhænger af boligens personbelastning.

Der er i boliger ikke tradition for at bruge CO₂ som reguleringsparameter [Bergsøe et al, 2008], [Maripuu et al., 2009]. Et af argumenterne er prisen på CO₂-følere i forhold til fugtfølere, da en CO₂-føler er væsentligt dyrere end en fugtføler. Et andet argument er, at CO₂-niveauet i en bolig med normal intern belastning ikke vil kunne give problemer så længe luftskiftet holdes på de anbefalede 0,35 l/s pr m² (netto), men nedjusteres dette tal vil det være relevant også at måle på luftens CO₂-niveau.

4.3.2 Erfaringer fra Komforthusene

Ses der på målingerne af RF i Komforthusene er det sjældent, at den relative luftfugtighed, beregnet som middelværdi over en måned, kommer over 70%. Dette forekommer kun i enkelte sommermåneder med meget nedbør. I stedet opleves meget tør luft i vintermånederne, hvilket kunne forbedres ved at nedsætte luftskiftet. Luftskiftet er i mange af husene allerede lavt, og det kan kun nedsættes til et begrænset niveau, da der stadig skal kunne leveres tilstrækkelig varme til huset (hvis det er opvarmet via ventilationsluft) og samtidig skal det sikres, at der ikke opstår for høje niveauer af CO₂. For at sikre dette, bør CO₂-niveauet også indgå som reguleringsparameter i dette tilfælde.

Tabel 4.3 viser de målte luftmængder i Komforthusene. Luftmængderne er angivet som middelværdier for de perioder hvor husene har været beboet. Det fremgår af tabellen, at nogle huse kører med meget lave luftskifter samt at alle huse kører med luftskifter lavere end anbefalet i BR08 (=0,35 l/s pr m² (netto)).

Middel ventilationsrate	12	28	37	39	43	45	47	49
Beboet periode	0,24	0,13	0,13	0,16	0,14	-	0,24	0,17
Maj-september	0,25	0,16	0,15	0,16	0,14	-	0,27	0,15
Oktober-april	0,24	0,12	0,12	0,16	0,14	-	0,24	0,16

Tabel 4.3: Målte ventilationsmængder i Komforthusene i beboede perioder. Angivet i l/s pr m².

Hus 39, som havde store afvigelser fra kategori II ved vurdering af atmosfærisk komfort, kører med et luftskifte i boligen, som ligger under halvdelen af det anbefalede i BR08. I vinterperioden, hvor supplering af naturlig ventilation er på et minimum, opnåedes der således kun kategori II i 25% af tiden i børneværelset, og overskridelserne nåede ofte op på 2000 ppm over udeniveau. Problemet i børneværelset er karakteristisk og ses i flere af husene. Samme problem genfindes i soveværelserne, og opstår i løbet af natten på grund af den konstante belastning fra personer i rum, som har et forholdsvis mindre volumen pr person end husets øvrige rum. Når den relative luftfugtighed vurderes, findes der også her problemer. Dog er perioden med problemer når RF vurderes skubbet til sensommer og efterår, hvor der opnås perioder med høj RF. Kategori II opnås i 57% af tiden i ovennævnte værelset når RF vurderes. I vinterperioden opnås i husene med meget lavt luftskifte mindre problemer med lave værdier af RF (dvs tør luft), men dette er som nævnt på bekostning af høje værdier for CO₂-niveau.

Det er derfor væsentligt at pointere, at der i sove- og børneværelser bør kunne opretholdes et luftskifte stort nok til at undgå disse problemer, enten via mekanisk eller naturlig ventilation. Dog frarådes det at bruge naturlig ventilation i vinterperioden, da der ikke er varmegenvinding på denne måde, og varmetabet fra huset dermed forøges unødvendigt. Ovennævnte illustrerer også hvorfor en CO₂-sensor i ventilationsanlægget er nødvendig, når man tillader at køre luftskiftet ned under 0,35 l/s pr m² (netto) og den interne belastning ikke er reduceret tilsvarende.

Ved vurdering af den interne belastning er ventilationsmængden pr person beregnet i Tabel 4.4. Her ses det, at der også er stor variation i ventilationsmængderne når den interne belastning medtages i vurderingen.

Middel ventilationsrate	12	28	37	39	43	45	47	49
Beboet periode, beregnet pr. person	13,99	5,70	6,00	8,21	10,36	-	9,35	6,68

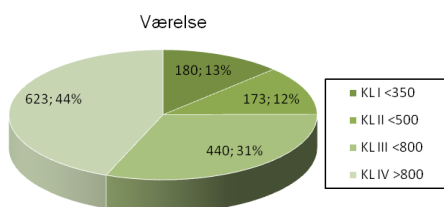
Tabel 4.4: Målte ventilationsmængder i Komforthusene i beboede perioder. Angivet i l/s pr person. Børn er regnet som ½ person, teenagere som voksne.

4.4 CO₂-niveau

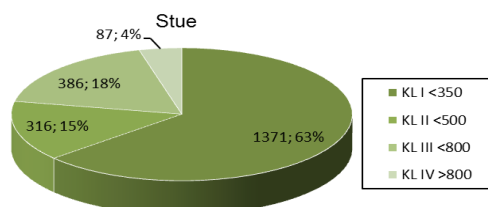
Når CO₂-niveauet vurderes og sammenlignes fra hus til hus er det væsentligt også at se på den belastning der forekommer i husene. Dette gøres ud fra beboerprofilerne vist i Figur 2.2. Desuden er det væsentligt at inddrage ventilationsmængden, da dette også påvirker CO₂-niveauet.

I det følgende vises resultater fra hus 39, som har de største afvigelser fra kategori II, men dog ikke det laveste luftskifte, og hus 12 og 47, som har det højeste luftskifte. I hus 39 bor der 2 voksne og et teenagebarn, i hus 12 og 47 bor der familier med hhv et barn (hus 12) og to børn (hus 47). Der ses i alle tilfælde på en vintersituation, da det er i denne periode den naturlige ventilation er mindst, og dermed også i denne periode de højeste værdier for CO₂-niveauet opnås.

I hus 39 stiger CO₂-niveauet også i vintermånederne. Der opnås kategori II i 53% af tiden for stuen. I børneværelset opnås kun kategori II i 25% af tiden for værelset. Dette er vist i Figur 4.1. Ved vintersituationen i hus 47 kategori II i 80-90% af tiden. Her er det stuen, der giver det dårligste resultat. Resultatet fra stuen ses i Figur 4.2.

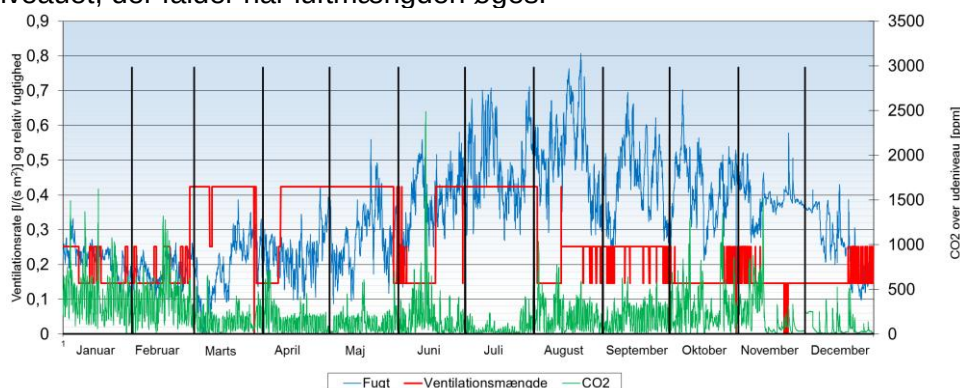


Figur 4.1: Timefordeling i komfortklasser for vintersituation i værelse i 2011, hus 39.



Figur 4.2: Timefordeling i komfortklasser for vintersituation i stue i 2010, hus 47.

I hus 12, som ventilerer med samme luftmængde som i hus 47, opnås kategori II i 75-80% af tiden. Når luftmængderne vurderes i de to huse ses, at der er forskel på måden der ventileres på i de to boliger. I hus 12 køres med næsten konstant luftmængde året rundt, i hus 47 ændres luftmængden afhængigt af sæson. Dette ses i Figur 4.3, hvor luftmængden er angivet med den røde linie. Desuden ses en tydelig effekt på CO₂-niveauet, der falder når luftmængden øges.



Figur 4.3: Ventilationsmængde, CO₂ og fugt i stue, hus 47, 2010.

Ved vurdering af CO₂-niveauet på årsbasis anbefales det, at overskridelserne ligger indenfor 3% eller 5% af tiden (jf "Bilag A: Krav til indeklima og energiforbrug"). Overskridelserne fra de tre omtalte huse ses i

Tabel 4.5. Hus 47 opnår det bedste resultat med hhv 0% og 1% i køkken/alrum og stue i 2011. Hus 12 har lidt større afvigelser, og opnår ikke de ønskede 3% eller 5%. Dette sker til trods for, at ventilationsmængden pr. person er den højeste for dette hus, men da værelserne i husets østlige ende ikke bruges til dagligt, er voluminet af huset reelt mindre. Hus 39 har store afvigelser i børneværelset, hvor der kun godt halvdelen af tiden opnås kat. II i 2011.

	2009	2010	2011
Hus 12			
Køkken/alrum	16	9	13
Værelse	15	9	14
Hus 47			
Køkken/alrum	3	3	1
Stue	8	10	0
Soveværelse	2	3	4
Hus 39			
Værelse	-	23	47
Stue	-	19	16

Tabel 4.5: Overskridelser fra kategori II vurderet på årsbasis.

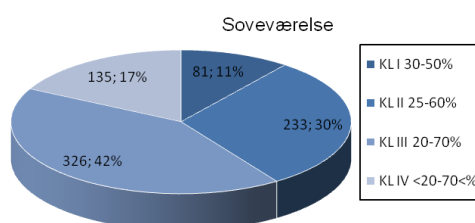
4.5 Relativ luftfugtighed

Ligesom med CO₂-niveauet er den relative luftfugtighed i huset afhængig af den interne belastning fra personer og ventilationsmængden. Herudover vil beboernes adfærd i form af bade- og madlavningsvaner samt tørring af tøj indendørs påvirke den relative luftfugtighed.

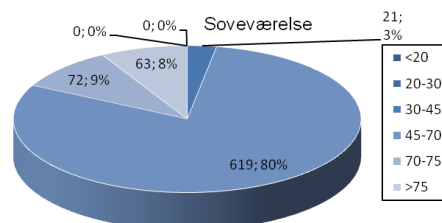
I husene med de højeste luftskifter er der ingen eller få problemer med for høj RF men der opstår derimod problemer i vinter- og forårmånederne, hvor der bliver meget tørt i husene.

I husene med lavt luftskifte er der i store dele af året problemer med høje værdier af RF. I sensommeren, som har de højeste værdier af RF, overskrider værdierne ofte 70%, hvilket kan være problematisk for konstruktionerne i huset. I disse huse reduceres problemerne med tørt indeklima i vintermånederne, men det sker på bekostning af et højt CO₂-niveau.

Desuden er der i husene fundet problemer i de soveværelser, som ligger i direkte forbindelse med et badeværelse. Her er der ofte et højt niveau af RF, hvilket ikke er godt for indeklimaet i soveværelset. Dette ses bl.a. i Figur 4.4 for hus 45, hvor kat. II opnås i ca. 41% af tiden. Ved opdeling i målte værdier af RF (jf .Figur 4.5) ses, at en stor del af tiden opnår RF>70%.



Figur 4.4: Timefordeling i komfortklasser for efterårssituation i soveværelse i 2011, hus 45.



Figur 4.5: Fordeling for målt RF for efterårssituation i soveværelse i 2011, hus 45.

Ved vurdering af kriteriet på min 1 måned med $RF < 45\%$ for at undgå problemer med støvmider i boligen opfylder samtlige boliger kriteriet.

4.6 Opsummering

Alt tyder på, at fremtidens boliger bliver større og større samtidig med at vi bor færre personer i boligerne. Det vil sige, at vi får større antal m^2 pr person, hvilket samtidig medfører, at behovet for frisk luft pr m^2 bolig reduceres - i al fald når parametrene temperatur, CO_2 og fugt vurderes.

Det har hidtil været krævet, at ventilationsmængden pr m^2 bolig skal opfylde et fast minimumskrav [BR08, BR10], men i takt med et faldende behov i boligerne på grund af ovennævnte, bør det vurderes, hvorvidt dette krav skal fastholdes, eller en reduktion, og dermed en energibesparelse, kan tillades. Ud fra denne tankegang fik Komforthusene dispensation fra BR08 og kunne dermed lave behovsstyret ventilation i alle husene.

I dette kapitel er der vist resultaterne for de 8 huse. Alle huse kører med mindre luftmængder end anbefalet i BR08/BR10. Nogle gør det med succes, og opnår stadig et godt indeklima, men de huse, hvor luftskiftet er mindst opnås problemer med dårlige vurderinger af det atmosfæriske indeklima i huset.

Ved vurdering af atmosfærisk komfort ses på CO_2 -niveau og relativ luftfugtighed i boligerne. CO_2 -niveauet varierer meget fra bolig til bolig alt afhængig af ventilationsmængden, og der findes i stuerne overskridelser af kategori II gående fra 0% til 19% af tiden. De fleste stuer har dog lave overskridelser. I værelserne er overskridelserne langt større, da der i disse rum oftest er væsentligt større belastning pr m^2 over en længere periode. Her findes der overskridelser i nogle af værelserne i næsten halvdelen af tiden.

Ved vurdering af relativ luftfugtighed er det kun ganske få huse der kan overholde vurderingskriteriet med 3% eller 5% afvigelse fra kat. II. Overskridelserne skyldes for lave værdier af RF, som opstår igennem vinteren. De fleste huse har ikke problemer med for høje værdier af RF. Dog ses en tendens til, at soveværelser i direkte forbindelse med badeværelser, får forhøjede værdier af RF, idet fugten spredes fra badeværelset og ikke udsuges som den burde. Alle huse opnår perioder på mindst en måned med $RF < 45\%$ og heller ikke i den anden ende af skalaen ved vurdering af $RF > 75\%$ er der problemer.

Ses på vinterperioden, som oftest er mest kritisk, findes i alle boliger et højere CO_2 -niveau, da den naturlige ventilation i boligen reduceres. Niveauet er ikke kritisk for det atmosfæriske indeklima i de boliger der kører med de højeste luftskifter (0,24 l/s pr m^2). Ingen af de monterede anlæg registrerer CO_2 -niveau i boligen, men vil man fremover tillade behovsstyring med luftmængder væsentligt mindre end 0,5 h^{-1} bør det diskuteres hvorvidt den ekstra investering er nødvendig. Herudover viser erfaringerne fra Komforthusene, at små rum med høj intern belastning skal sikres et godt luftskifte. Dette er som før nævnt typisk soveværelser og børneværelser, hvor der er belastning hele natten. Børneværelserne er i nogle tilfælde ekstra kritiske, da der i disse rum også er belastning i dagstimerne.

5. Dagslys

Der er i udbudsmaterialet ikke direkte omtalt dagslysforhold. Dog står der at *"Huset skal være funktionelt og udstråle komfort og velvære"*. Eftersom huset skal have komfort betragtes dette i denne analyse også som gode dagslysforhold. Spørgsmålet er bare, hvordan gode dagslysforhold defineres i en bolig. Problematikken vil blive diskuteret i dette afsnit sammen med eksempler på hvordan der opnås øget dagslyskvalitet i boliger. Herudover vurderes hvordan energiforbruget påvirkes afhængig af vinduernes størrelse og orientering samt om der er en sammenhæng mellem dagslysfaktor og vinduesareal/gulvareal samt overophedning.

5.1 Vurderingskriterier

I Komforthusene er der anvendt en minimumsværdi for dagslysfaktoren på 2%, som bør kunne opnås hele vejen ind gennem rummet og ikke kun i områder, der kan betragtes som arbejdspladser. Er dette opfyldt vurderes forholdene som gode dagslysforhold. På denne måde vil dybden af rummet også kunne medtages i vurderingen, da dybe rum bør have større eller højere placerede vinduesarealer end smalle rum.

5.2 Generelle erfaringer

Hidtil har energiforbruget til dagslys ikke været indregnet i energiberegningen for boliger. Undersøgelser viser, at forbruget til -belysning i boliger svarer til ca. 7-10% af det samlede energiforbrug i en standard bolig i dag [Marsh, 2008], [Gram-Hanssen, 2005], men i takt med et faldende energiforbrug til opvarmning og bygningsdrift vil elforbrugets andel af det samlede energiforbrug vokse mere og mere.

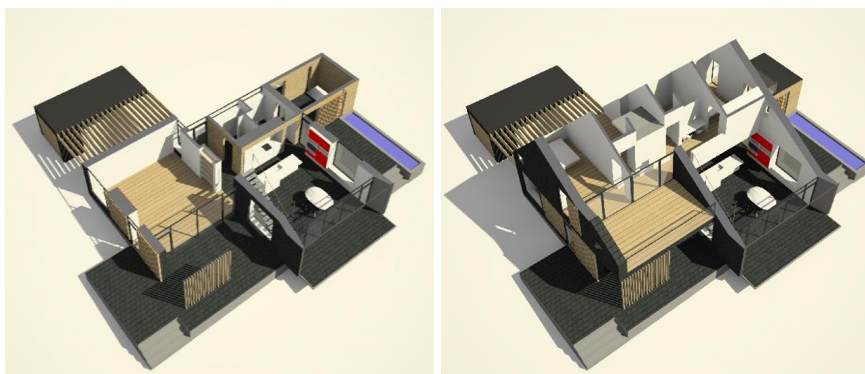
Øget brug af dagslys i boligen medfører, udover en energibesparelse på el til belysning, også kvalitative aspekter; æstetiske, oplevelsesmæssige, sundheds- og komfortmæssige forbedringer, som ikke er medtaget her.

Mængden af dagslys i rummet afhænger af arealet og placeringen af vinduer i facaden og taget, men skal dog samtidig balanceres og styres med solafskærmning i forhold til direkte solindfald, da der ofte er en tendens til en massiv overrepræsentation af sydvendte vinduer i lavenergiboliger og kraftigt reduceret glasareal i de nordvendte rum. Dette kan medføre mørke rum i den nordlige del af huset samt risiko for overophedning, blænding og stærke kontraster i de sydvendte rum, hvis der ikke er en helt klar strategi for solafskærmning. Samtidig kan de meget åbne facader i tættere byområder medføre indbliksgener og dermed utilsigtet brug af solafskærmningen, hvis beboerne, i perioder med behov for solindfald, kører solafskærmningen for ruderne for at reducere mulighederne for indblik gennem vinduerne, som det bl.a. blev erfaret i "Bolig for Livet" [VKR, 2010].

5.2.1 Case study: Dagslysoptimering i en bolig

Følgende case study beskriver dagslysforholdene i "Bolig for Livet" opført i Lystrup ved Århus i 2009. Huset er opført i to plan med 190 m² bolig. Opbygningen af boligen ses i Figur 5.1.

I designet af huset er der arbejdet meget bevidst med dagslysindtaget. Der er arbejdet med relativt stort vinduesareal, 40% af gulvarealet, ca det dobbelte af normale enfamiliehuse.



Figur 5.1. Opbygning af boligen. [VKR, 2010]

Designparametre i boligen har været, at dagslyset skulle oplyse rummene så det understreger arkitekturen og skaber et behageligt og funktionelt lys. Et af virkemidlerne er, at der i alle opholdsrum er dagslys fra mindst to retninger. Derved mindskes blænding og der fås et større dagslysindtag, der kan erstatte brug af kunstlys. Derudover har der været fokus på, at der skal være tilstrækkeligt arbejdsbelysning/funktionslys ved eks. køkkenbordet og arbejdsplads i soveværelse mod øst på 1. sal. Ved beregning af dagslysfaktorer på disse positioner er der fundet værdier på hhv 6,7% og 4,3%. Målet i "Bolig for Livet" var en gennemsnitsdagslysfaktor på 5%. Ud over fokus på gode dagslysforhold, har der været fokus på at benytte energibesparende armaturer samt styring af kunstlys, der slukker lyset når personer forlader rummet.

5.3 Dagslysforhold i Komforthusene

Ved vurdering af dagslysforhold i Komforthusene blev dagslysfaktoren målt i alle stuer/primære rum. Herudover er der i enkelte boliger målt i værelser med små vinduer for at se effekten af de små vinduesarealer på dagslysfaktoren.

Alle primære rum i Komforthusene kan opfylde kravet om en dagslysfaktor på 2% ved bagvæggen af rummet. Dog er der stor forskel på resultaterne, hvor nogle huse lige holder sig på 2% og andre huse opnår værdier på op til 6%.

For at sikre god dagslysfordeling i boliger er det vigtigt at overveje vinduesplaceringen. I det følgende vises eksempler fra komforthusene på gode virkemidler. Yderligere eksempler findes bl.a. i [SBI-219, 2008].

5.3.1 Højtsiddende vinduer og ovenlys

I hus 28 og 39 er der brugt højtsiddende vinduer til at forøge dagslysfaldet i stuen. Et højtsiddende vindue placeret i ydervæggen kan forøge dagslysniveauet langt ind i rummet, og kan i nogle tilfælde lette indretningen af rummet, da det kan give mere fri vægplads. Figur 5.2 og Figur 5.3 viser vinduesplaceringen i stuen i hus 28. I dette hus er det valgt at placere det højtsiddende vindue over et stykke væg for dermed at give mulighed for at indrette hjørnet i rummet med møbler og stadig sikre gode dagslysforhold i rummet.

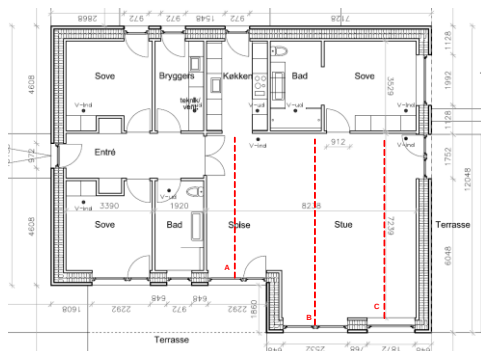


Figur 5.2: Placering af vinduer i facaden, hus 28.

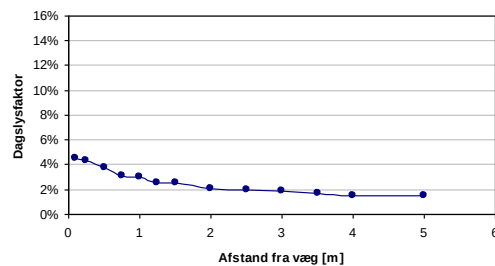


Figur 5.3: Effekt af vinduet set fra stuen.

Ved måling af dagslysfaktoren i stuen blev der registreret DF i tre linier ind i stuen. Målepunkterne er angivet i Figur 5.4. I linie A, som slutter inde midt i huset foran køkkenet, er der målt en DF på lige under 2%, hvilket er et godt resultat for et punkt så langt inde i huset. Målingerne er vist i Figur 5.5.



Figur 5.4: Placering af målepunkter i hus 28.



Figur 5.5: Måling af dagslysfaktor midt i huset, punkt A.

I hus 39 er der også placeret et højtstående vindue. Her er det valgt at placere vinduet i sammenhæng med et andet vinduesparti. Placeringen af vinduet fremgår af Figur 5.6. Et foto taget inde i stuen ses i Figur 5.7. Ved brug af dette forholdsvis store glasareal i den sydvendte facade er det væsentligt at sikre god mulighed for udvendig solafskærmning, da der ellers er stor risiko for overopghedning af huset.

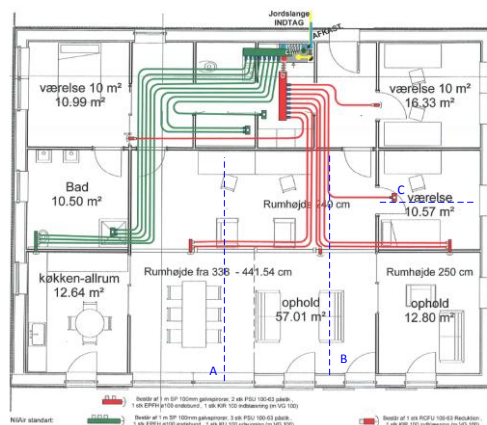


Figur 5.6: Placering af vinduer i facaden, hus 39.

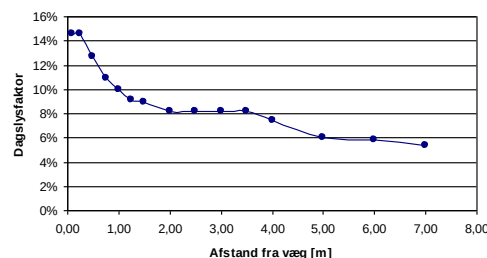


Figur 5.7: Effekt af vinduet set fra stuen.

I hus 39 blev der målt DF i to linier i stuen. I linie A, som udgår fra vinduespartiet med det højsiddende vindue, er der målt en DF på 6% ved bagvæggen, hvilket giver et godt og velbelyst rum.



Figur 5.8: Placering af målepunkter i hus 39.



Figur 5.9: Måling af dagslysfaktor foran det højsiddende vindue, punkt A.

Nedenstående figur viser et eksempel på brug af ovenlys i hus 49. Ovenlyset kan bidrage til dagslys i fx dybe rum og andre områder, hvor det kan være svært at nå ind med lys fra almindelige vertikale vinduer. Desuden kan ovenlyset forøge effekten af naturlig ventilation, i de tilfælde hvor det kan åbnes. En potentiel ulempe ved ovenlys uden solafskærmning er det store solindfald gennem vinduet grundet den horisontale placering. Det er derfor nødvendigt at sikre afskærmning, hvilket kan gøres bedst udvendigt med en screen eller skodde eller indvendigt i form af gardiner eller persienner.



Figur 5.10: Ovenlysvindue i hus 49

5.3.2 Lys fra flere retninger

Figur 5.11 viser et eksempel på brug af lys fra flere sider i hus 47. I dette hus er vinduesarealerne dog meget store, og det er vigtigt ved brug af denne løsning, også at kontrollere risikoen for overtemperaturer i rummet, og sikre brug af udvendig solafskærmning.



Figur 5.11: Vinduer placeret mod syd og øst i hus 47.

5.3.3 Brug af indvendig glas til transport af lys mellem rum

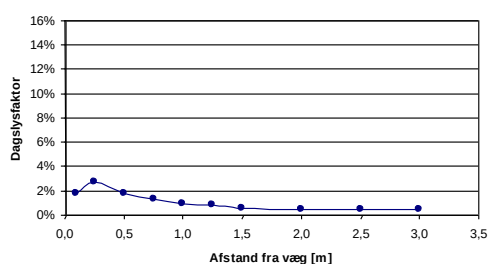
Udover vinduesplaceringer i facaden kan brug af glas indvendigt i bygningen også medvirke til fordeling af dagslys med stor effekt. Figur 5.12 viser et eksempel på dette. På billedet til venstre (Figur 5.12a) er der brugt glas øverst over betonkernen i hus 37. I kernen er der bad, toilet og bryggers, og via glasset transporteres der også dagslys ind til disse funktioner. I Figur 5.12b (som dog ikke er fra Komforthusene men fra Bolig for livet) er der indsat et vindue mellem alrummet og børneværelset på 1. sal, som samtidig giver udsyn ud gennem tagvinduet fra 1. sal.



Figur 5.12. Brug af glas indvendigt i boligen til transport af dagslys.

5.4 Problemer med mørke rum

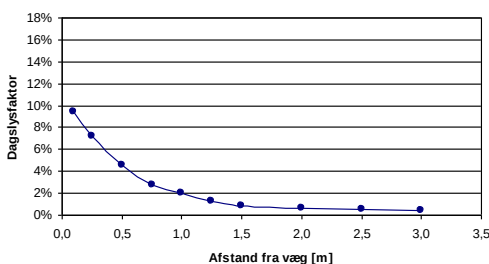
Selvom der er mange gode løsninger på dagslysforhold i Komforthusene er der også fundet problemer med mørke rum i nogle af husene. De mørke rum er typisk værelser med meget små vinduespartier. Eksempler på dette findes bl.a. i hus 39 og 43, som begge har værelser med en DF på omkring 0,5% ved bagvæggen. Målingerne fra disse rum samt fotos af facaden med vinduet fremgår af Figur 5.13 til Figur 5.16.



Figur 5.13: Måling af dagslysfaktor i østvendt værelse, punkt C, hus 39.



Figur 5.14: Vinduer i østfacaden, hus 39. Målinger er foretaget i værelse bag det midterste vindue i østfacaden.



Figur 5.15: Måling af dagslysfaktor i nordvendt værelse, punkt B, hus 43.



Figur 5.16: Vinduer i nordfacaden, hus 43. Målinger er foretaget i værelse bag vinduet på første sal længst mod øst.

Der var fra starten af projektet i Komforthusene stor fokus på at have store vinduesarealer mod syd og væsentligt mindre arealer i de øvrige retninger af hensyn til husets energibalance. Dette fokus har muligvis medført disse mørke rum i nogle af boligerne. I løbet af projektet har det dog vist sig, at de store vinduespartier ud over masser af dagslys også medførte overophedning i en del af husene. Ideen med en mere jævn fordeling af vinduerne blev således undersøgt i Komforthusbogen [Komfort Husene: erfaringer, 2010], hvor det er vist, at denne ide sagtens kan lade sig gøre. Fordele ved dette er desuden yderligere diskuteret i afsnit 5.6.

5.5 Sammenhæng mellem DF, vinduesareal og overophedning

I bygningsreglementet er der til bygningsklasse 2020 lavet et krav til vinduesandel i beboelsesrum og køkken/alrum. Rudearealet skal være mindst 15 % af gulvarealet, hvis rudens lystransmittans er større end 0,75. [BR2010, 2012].

I Tabel 5.1 ses en analyse, som omfatter alle otte Komforthuse. I de rum hvor der er målt rumtemperaturer, er vinduesarealet holdt op imod gulvarealet. Tallene bliver holdt op imod de opsatte krav for klasse II vedrørende termisk indeklima, hvor der må være afvigelse på 12 og 25 %. Værdierne er taget fra den måned, for hvert hus, som giver den største afvigelse.

Hus nr.	12	28	37	39	43	45	47	49
Stue		0,35	1,15	0,35	0,37	0,99	0,22	0,29
Køkken/alrum	0,35				0,12	0,79	0,21	0,25
Soveværelse	0,23				0,12	0,08	0,12	0,22
Værelse	0,30	0,24	0,21	0,14	0,10	0,48		0,22
Multirum					0,61			
Baderum						0,34	0,06	
Kontor/gang							0,28	

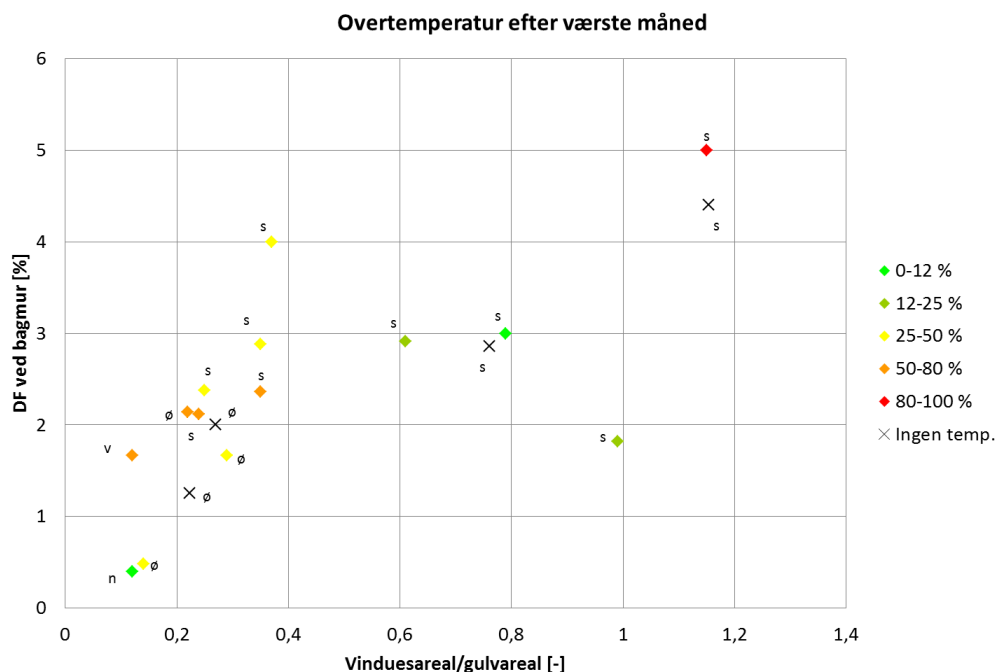
Tabel 5.1: Vinduesareal/gulvareal i alle rum, hvor der er målt indeklima. Grønne værdier står for en afvigelse i det termiske indeklima fra klasse II på under 12 %, sort står for en afvigelse mellem 12 og 25 % og rød for værdier over 25 %. De grå felter viser, hvilke rum der er målt dagslysfaktor i.

Her ses det at nogle huse opfylder kravene til bygningsklasse 2020 i alle rum, hvorimod andre ikke gør. Hus 43 og 47 har op til flere rum som ligger under de givne 15 %, men de har også rum med væsentlig større andel af vinduer. De fleste huse har forholdsvis høje værdier i forhold til kravene i 2020.

Vurderes overtemperatur ses der ingen direkte sammenhæng mellem vinduesareal/gulvareal og afvigelse fra klasse II, da dette også i væsentlig grad vil afhænge af bl.a. solafskærmningen på vinduerne. Det er kun hus 43 og 45 som har rum der ikke afviger mere end både 12 og 25 %.

Ovenstående data benyttes endvidere i en analyse som medtager både vinduesareal/gulvareal, dagslys, overtemperatur i rum og orientering. Denne analyse findes på Figur 5.17. Analysen omfatter kun de rum, hvor der er målt en dagslysfaktor. Den benyttede dagslysfaktor er værdi målt ved bagvæggen, altså væggen længst væk fra vinduet eller vinduerne.

Her tillægges hver datasæt en farvekode, som viser om rummet har haft problemer med overtemperatur i måleperioden (procentdel af tiden hvor temperaturen er over 26 °C, efter klasse II). Det er kun den værste overtemperatursmåned der er medtaget i analysen, og der mangler temperaturmålinger i fire rum hvor dagslysfaktoren er målt.



Figur 5.17: Dagslysfaktor ved bagvæg som funktion af vinduesareal/gulvareal og andel overtemperatur samt orientering er vist som henholdsvis farvekode og verdenshjørner.

Figuren viser en sammenhæng mellem vinduesareal/gulvareal og dagslysfaktoren som er ret klar for forhold mellem vinduesareal/gulvareal på op til ca. 0,4. De rum der afviger ved større værdier af forholdet, kan forklares ved, at der er mange forskellige faktorer som har indflydelse på dagslyset. En forklaring kunne, som beskrevet i afsnit 5.3.1, være placeringen af vinduerne vertikalt i rummet, hvor højt placerede vinduer giver en bedre dagslysfaktor. En anden ting kunne være selve rummets udformning.

En anden tendens som er ret klar er, at alle målte dagslysfaktorer over 2,1 % er for et sydvendt rum. Dette betyder at de største vinduespartier er blevet placeret mod syd, som også kommer til udtryk ved værdien for vinduesareal/gulvareal. I Tabel 5.1 kan det ses, at de brugte data til figuren som har en værdi for vinduesareal/gulvareal på over 0,3 alle er for opholdsrum som fx stue eller køkken/alrum. Når denne tendens observeres, er det vigtigt at sikre sig at der ikke opstår problemer med det termiske indeklima, som i dette tilfælde tydeligvis er et problem i flere huse i den varme måned der er lagt til grunde for analysen.

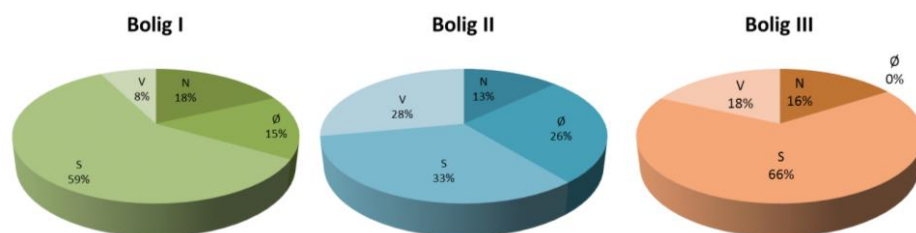
Værdien anbefalet i BR10 på 0,15 for vinduesareal/gulvareal i fx beboelsesrum og køkken/alrum er i dette tilfælde ikke nok for at sikre en dagslysfaktor på over 2 % ved bagmuren i rummet. Herudover er det væsentligt at huske, at placeringen af vinduer og udformning af rummet spiller en stor rolle.

Ud fra data i dette projekt bør værdien på 0,15 sættes op til 0,2 for at sikre en tilstrækkelig dagslysfaktor. Dernæst er det vigtigt at sikre sig at der ikke forekommer overtemperatur i de kritiske opholdsrum i bygningen.

5.6 Robusthed i forhold til rotering af bygningen

Mange lavenergihuse har væsentligt større vinduesarealer orienteret mod syd end mod nord. Dette gør, at bygningen vil være meget afhængig af korrekt placering på byggegrunden. Ved dette design reduceres samtidig muligheden for reproduktion af den samme grundplan (fx i forbindelse med typehuse), da orienteringen af huset bliver fastlåst mod syd. Havde designet af bygningen i stedet haft en jævn fordeling af vinduer i alle retninger, ville det være muligt at rotere bygningen og flytte den rundt mod alle retninger.

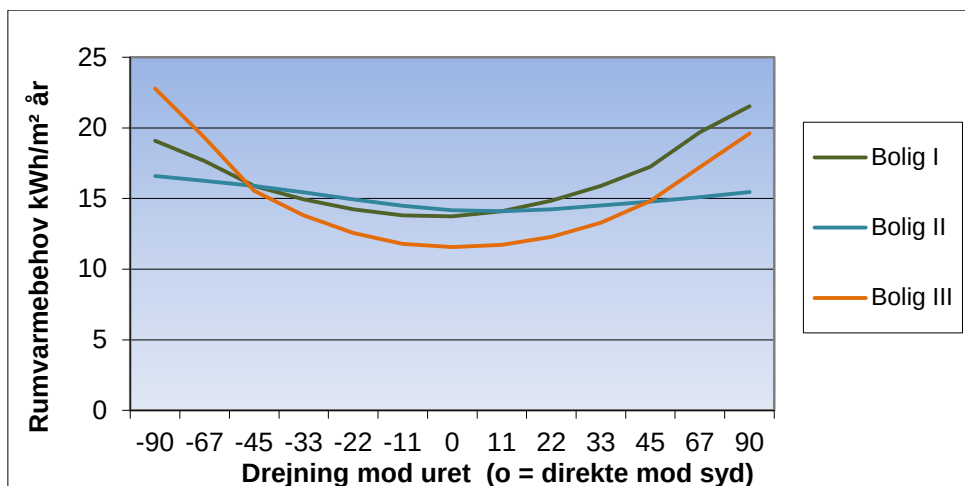
En analyse af dette foretages i det følgende for tre forskellige boliger. Boligernes fordeling af vinduer mod hhv nord, øst, syd og vest ses i Figur 5.18. Her fremgår det, at bolig I (hus28) har en meget stor andel af sine vinduer placeret mod syd, bolig II (hus 37) har en mere jævn fordeling mod alle retninger og bolig III (hus 43) har en kraftig sydlig orientering af vinduerne og ingen vinduer placeret mod øst.



Figur 5.18. Fordeling af vinduesareal mod hhv nord, øst, syd og vest i tre forskellige boliger. [Komfort Husene: erfaringer, 2010]

I det følgende analyseres rumvarmebehovet som funktion af orienteringen af huset. I analysen er alle tre huse, uanset deres faktiske placering på grunden, drejet i beregningen så de starter med facaden direkte mod syd og derefter drejes i spring af 11 grader mod henholdsvis øst og vest.

Resultatet af analysen ses i Figur 5.19. Ikke overraskende er det bolig II, med den jævne fordeling af vinduernes areal, der er mindst følsom for drejning i forhold til verdenshjørnerne. Bolig II, der har en del areal mod øst og kun lidt mod vest er mest følsom ved drejning mod øst, mens bolig III, der ikke har vinduer mod øst er mest følsom for drejning mod vest. Ud fra denne analyse tyder det på, at især en vis andel østvendte vinduer er vigtige for at sikre mod følsomhed.



Figur 5.19. Rumvarmebehovet som funktion af husets drejning ift sydlig orientering for tre forskellige vinduesfordelinger. [Komfort Husene: erfaringer, 2010]

5.7 Opsummering

Det diskuteres i dette afsnit hvorvidt et krav til dagslysfaktorer i boliger skal inddrages, når fremtidige lavenergiboliger designes. Argumentet for at gøre dette er, at man via øget fokus på brug af dagslys i boliger muligvis samtidig vil kunne sikre et lavere energiforbrug til elektrisk belysning, og dermed en energibesparelse på belysningsområdet.

Der gives i dette afsnit to bud på vurdering af dagslysforhold i en bolig. Den ene metode er brugt i Komforthusene, hvor kriteriet for gode dagslysforhold er en dagslysfaktor på 2% ved rummets bagvæg, for hermed at inddrage rummets dybde i vurderingen. Den anden metode er brugt i Bolig for Livet, hvor det tilstræbes, at der opnås en middel dagslysfaktor for rummet på 5%.

Komforthusene har gode dagslysforhold i langt de fleste rum. Der gives ud fra målingerne flere eksempler på, hvordan vinduesplaceringen kan forbedre dagslysforholdene i en bolig. Dog pointeres det ved alle sydvendte placeringer, at der samtidig bør kontrolleres for overophedning i rummet. Denne pointe illustreres af det efterfølgende afsnit, hvor konkrete målinger af overtemperatur er sammenholdt med DF og vindues/gulvareal. Resultaterne her sammenholdes også med anbefalingerne i BR10, hvor det i dag anbefales at have en vindues/gulvareal-faktor på 0,15 i 2015 og 2020 byggeri. Ud fra erfaringerne i Komforthusene ville et bedre bud på denne faktor være 0,20.

Endeligt analyseres betydningen af vinduernes orientering i forhold til energibehov og robusthed overfor rotering af bygningen. Ikke overraskende var det her bygningen med en ligelig fordeling af vinduer i alle retninger, der var mest robust, og dermed bedst kunne placeres på en hvilken som helst byggegrund uafhængig af orienteringen af denne. Samtidig vil en mere ensartet placering af vinduerne mod alle retninger også kunne afhjælpe problemerne med mørke rum i den nordlige del af huset samt risiko for overophedning, blænding og stærke kontraster i de sydvendte rum.

6. Akustik og støj

Øget tæthed og isolering i lavenergihuse fungerer også som lydisolering mod støj udenfor huset, hvorfor lyde fra installationer inde i boligen kan opleves højere og mere generende. Fx kan radiatorventiler hyle, vandhaner og cisterner vil suse og ventilationsanlægget brumme. Herudover er der i alle Komforthusene mekanisk ventilation, som også kan støje, hvis ikke det er korrekt udført. I det følgende gennemgås resultaterne for Komforthusene, som er blevet undersøgt for støj fra installationer samt efterklangstider.

6.1 Vurderingskriterier

Tabel 6.1 angiver de kriterier, som de akustiske målinger skal holdes op imod. Både efterklangstider og støj fra tekniske installationer skal overholde kat. B. For efterklangstider betyder dette en efterklangstid $< 0,6$ sek. For de tekniske installationer skal støjen være under 25 dB.

Akustik	
	Kriterium
Efterklang	Kat B
Tekniske installationer	Kat B

Tabel 6.1: Kriterier til vurdering af det akustiske indeklima.

6.2 Efterklangstider

Der er i Komforthusene gjort forskellige tiltag for at sikre lave efterklangstider. De forskellige løsninger er præsenteret i Tabel 6.2. Her fremgår det, at ingen af husene kan overholde kategori B. Det er i den forbindelse væsentligt at nævne, at efterklangstider skal måles i møblerede rum, hvilket ikke har været muligt at gennemføre i projektet. De målte efterklangstider kan dog stadig bruges som indikation for i hvilke huse, beboerne skal være særligt opmærksomme på selv at sikre dæmpning af efterklangstiderne, idet interviews med beboerne efterfølgende kunne afsløre problemer i et af husene med høj efterklangstid.

Et eksempel fra et beboerinterview følger her. Interviewet er gennemført af Camilla Brunsgaard [Brunsgaard, 2010], og citatet kommer fra beboeren da emnet falder på støj og akustik:

Citat: "Det her er noget af det mest lydte jeg har boet i nogensinde. Prøv at høre her, det værelse deroppe, slår én en skid så kan du høre det helt nede i stuen. Og omvendt. Det er helt vildt. Hvis jeg skal snakke med dem ovenpå, kan jeg bare sidde hernede og snakke, det kan de høre. Det er helt elendigt, voldsomt elendigt. Alle de plader der... de virker jo ikke... De har aldrig virket...Klangen her - ja du kan jo høre det nu. Altså selvom vi har billeder oppe, blomster som egentlig skal bryde akustikken, det bryder intet. Nej det bryder ikke akustikken..."

	12	28	37	39
Gennemsnitlig efterklangstid (125-4000 Hz) UDEN MØBLER	1,23	0,89	0,79	1,34
Akustikregulerende tiltag	Liste-lofter 	Træ-beton-lofter, stigende loftshøjde 	Rockidan, Mineraluld med akustik-puds 	Ingen specielle tiltag. Varierende loftshøjde 
	43	45	47	49
Gennemsnitlig efterklangstid (125-4000 Hz) UDEN MØBLER	1,13	0,86	1,4	1,4
Akustikregulerende tiltag	Akustik-regulering i central væg. Perforeret gipsplade fra Gyproc 	EXPAN Lyddæk - akustik dækunder side og arkitektur med varierende lofthøjder 	Felter med perforeret gipsplade fra Gyproc 	Ingen deciderede tiltag 

Tabel 6.2: Gennemsnitlige efterklangstider samt oversigt over akustikregulerende tiltag.

6.3 Støj fra installationer

I målingerne foretaget i Komforthusene blev målinger af støj foretaget for ventilationsanlægget indstillet på det driftstrin, som var forventet til brug i daglig drift. Ved denne måling overholdt alle boligerne lydklasse C og langt de fleste også lydklasse B, som svarer til 25 dB.

Målingerne blev kombineret med en efterfølgende kvalitativ vurdering via interviews med beboerne. [Brunsgaard, 2010] I flere interviews fremgik det, at ventilationsanlæggene støjer, når de kører med luftmængder over driftstrinet, som svarer til standarddrift. Dvs at støj over 25 dB i disse

eksempler har medført gener for beboerne til trods for, at kravet til lydklasse B var overholdt.

I forbindelse med støj fra tekniske installationer er det væsentligt at fremhæve, at selve placeringen af ventilationsanlægget og afskærmning fra støj omkring anlægget er vigtig for at opnå et godt resultat, når støj fra anlægget efterfølgende vurderes. En god løsning kan fx være at isætte en lyddør til husets teknikrum samt lyddæmpning på alle kanaler fra anlægget.

6.4 Opsummering

Der er i flere af Komforthusene aktivt gjort tiltag for at sikre god akustik. Ved måling af efterklangstider i umøblerede rum, er der fundet store forskelle i dæmpningen af rum i de forskellige huse, og der er målt gennemsnitlige værdier fra 0,79s til 1,4s. Dog er der en klar forskel mellem de huse, der har lavet akustikregulering, og de huse hvor det er udeladt. Dog med en enkelt undtagelse, hvor akustiklofterne ikke formår at sænke efterklangstiden i et dobbelthøjt rum med mange tunge konstruktioner.

Støj fra installationer er målt ved standard drifttrin på ventilationsanlægget. I dette tilfælde er der ikke fundet problemer med at overholde kategori B (<25dB), men ved interview med beboerne er der i nogle huse udtrykt, at støj fra anlæggene generer når anlægget kører med højere luftmængder.

7. Energiforbrug og energieffektivitet

Alle Komforthusene er opført som passivhuse, hvilket betyder, at de gerne skal overholde passivhus-kriterierne i Tabel 7.1. Dette er naturligvis overholdt for alle huse ved beregning i PHPP, men via måleprogrammet er det desuden muligt at se, om husene også overholder kriterierne i praksis.

Varmebehov	15 kWh/m ² pr år
Primært Energibehov	120 kWh/m ² pr år
Lufttæthed	0,6 h ⁻¹ v. ΔP = 50 Pa

Tabel 7.1: Passivhus-kriterierne. [PHPP2007]

Da PHPP-beregningen er lavet ud fra en række forudsætninger (fx en rumtemperatur på 20°C, et standard udeklima og en given intern belastning) er det ikke muligt direkte at sammenligne de målte og de beregnede værdier. Der skal i stedet foretages en ny PHPP-beregning, hvor målte vejrdata indsættes. Herefter kan det forventede energiforbrug sammenlignes med det målte forbrug. En illustration af betydningen for brug af korrekt vejrdata findes i "Bilag E: Sammenligning af vejrdata (DRY & Skibet)". En sammenligning mellem vejrdata i Skibet og vejrdata i Billund findes i "Bilag F: Sammenligning af vejrdata (DMI-Billund & Skibet)". Denne sammenligning er lavet, da det er vejrdata for Billund, der bruges i PHPP.

For at foretage den mest reelle sammenligning mellem målt og beregnet energiforbrug, er det væsentligt, at husene er beboede ved sammenligning. Da de fleste huse ikke har været beboede et sammenhængende år med brugbare data, er der genereret et "kunstigt år" for alle huse. Dette år bruges både til at fastsætte det målte energiforbrug samt sammensætte et vejrdatasæt med målt vejrdata. Året er sammensat af forskellige måneder udplukket i løbet af måleperioden. Ud over energiforbrug benyttes PHPP-beregningen med vejrdata fra det kunstige år også til vurdering af problemer med overtemperatur i husene.

Der er for hus 45 ikke medtaget data for energiforbrug, da beboeren ved indflytning har lukket projektets internetadgang til huset. Der er derfor kun målinger for hus 45 foretaget med trådløs adgang – dvs indeklima-målinger.

7.1 Vurdering af energiforbrug til rumvarme

Ved vurdering af kravet om et rumvarmebehov < 15 kWh/m² pr år fastlægges alle kilder til rumvarme i husene. Disse summeres efterfølgende og omregnes til en årsværdi, der kan sammenlignes med resultatet fra PHPP. Da der i flere huse er fundet en rumtemperatur i opvarmningssæsonen, der afviger fra 20°C, er der desuden korrigeret for dette. Det er værdien for denne korrigeret der sammenlignes med den målte værdi. Resultaterne af sammenligningen findes i Tabel 7.2.

	12	28	37	39	43***	45****	47	49
Energiforbrug beregnet i PHPP for standard vejrdato	15	15	14	15	12	-	13	15
Energiforbrug beregnet i PHPP med kunstigt år	24	23	23	23	25	-	20	23
Middeltemperatur i opvarmningssæsonen	23,0	23,5	24,0	23,0	22,4	-	22,3	23,0
Energiforbrug beregnet i PHPP med kunstigt år + korrigeret rumtemperatur	31	32	32	31	31	-	26	29
Målt værdi	33	28*	17**	27	34	-	55	28

* Energi til to el-radiatorer er ikke medtaget. Reelt forbrug er højere.

** Energi til el-radiator + radiator på jordvarmepumpe er ikke medtaget. Reelt forbrug er højere.

*** Der er brugt estimeret data for flere måneder pga manglende data.

**** Data mangler, jf indledning.

Tabel 7.2: Beregnet og målt energiforbrug. Alle værdier for energiforbrug er angivet i kWh/m² pr år. Middeltemperatur er angivet i °C

Det ses af resultaterne i Tabel 7.2, at der i de fleste huse er god overensstemmelse mellem beregnet og målt energiforbrug, og alle huse på nær hus 45 og 47 overholder passivhuskravene. Dog vil forbruget i hus 28 og 37 reelt være højere end hvad der er målt i husene, da begge huse har haft ekstra varmekilder tilsluttet udenom målerne til måleprojektet på grund af utilstrækkeligt opvarmning i husene. Der vurderes dog, at disse bidrag er i mindre omfang.

Det eneste hus der ikke overholder passivhuskravet er hus 47, som afviger kraftigt fra energiforbruget i de øvrige huse. Energiforbruget i dette hus er ca det dobbelte af hvad der er beregnet for huset. Ses der på de problemer der er registreret i huset, kan disse hjælpe til at forklare i al fald en del af afvigelsen. I huset blev en vandbåret forvarmeplade frostsprængt og erstattet af en el-varmeplade. Ved dette besøg og ved efterfølgende servicebesøg har serviceteknikeren, på grund af manglende kendskab til anlæggets design, foretaget nogle u hensigtsmæssige ændringer i anlægget, både hvad angår automatikken og selve anlæggets opbygning. Anlægget har derfor ikke kørt optimalt, og er først efter projektets afslutning blevet ført tilbage til det oprindeligt designede.

7.2 Vurdering af primært energiforbrug

På samme måde som for rumvarmebehovet vurderes det primære energiforbrug i huset ud fra en PHPP-beregning med vejrdato fra det kunstige år samt med korrigeret af for målt rumtemperatur i opvarmningssæsonen. Nogle af beregningerne giver ikke resultat efter korrigeret, men det antages, at forøgelsen størrelsesmæssigt vil følge de huse der har givet resultat. Resultaterne af sammenligningen findes i Tabel 7.3.

	12	28	37	39	43	45**	47	49
Primært energiforbrug beregnet i PHPP for standard vejrdato	91	119	120	120	100	120	92	114
Primært energiforbrug beregnet i PHPP med kunstigt år	96	134	133	133	109	-	99	-
Primært energiforbrug beregnet i PHPP med kunstigt år + korrigeret rumtemperatur	101	153	-	-	113	-	105	-
Målt værdi	123	162*	132	138	86,4	-	262	211

* Overskrides pga tilkoblede el-radiatorer i huset

** Data mangler, jf indledning.

Tabel 7.3: Beregnet og målt primært energiforbrug. Alle værdier er angivet i kWh/m² pr år.

Af sammenligningen i Tabel 7.3 ses der stor variation i de målte el-forbrug og en faktor 3 er fundet mellem det højeste og det laveste forbrug. Hus 12, 37, 39 og 43 overholder alle passivhuskravet. Hus 28 overskrider med 9 kWh, som sandsynligvis vil bortfalde hvis el-radiatorerne i huset erstattes af en varmekilde tilsluttet husets jordvarmepumpe.

Hus 47 og 49 overskrider derimod begge kravet i væsentligt omfang. Forklaring på overskridelsen i hus 47 er allerede givet i forrige afsnit. I hus 49 er det også teknikken der har drillet. I dette hus blev forvarmefladen, i forbindelse med en strømafbrydelse oktober 2009, afkølet så kraftigt at anlægget slog fra for at sikre mod frostsprængning. For at forcere opvarmning stillede serviceteknikeren om på styringen så el-patronen i varmtvandsbeholderen havde første prioritet, foran varmepumpen i anlægget. Udover varmt brugsvand forsynes gulvvarmen i badeværelserne og radiatoren i stuen fra varmtvandsbeholderen. Denne fejl blev først rettet sidst på sommeren 2011. Indtil da er der kørt med højt el-forbrug.

7.3 Vurdering af husenes lufttæthed

Alle huse har fået gennemført blowerdoor-test. Resultatet af testene fremgår i Tabel 7.4.

	12	28	37	39	43	45	47	49
Målt lufttæthed ved blowerdoortest sammenholdt med PHI krav på 0,6 h⁻¹ v. ΔP = 50 Pa	0,59	0,50	0,42	0,40	0,60	0,40	0,50	0,30
Målt lufttæthed ved blowerdoortest sammenholdt med BR08 krav på 1,5 l/s pr m² v. ΔP = 50 Pa	0,33	0,27	0,30	0,21	0,34	0,21	0,35	0,16

Tabel 7.4: Resultat fra blowerdoor test. Alle værdier er angivet i h⁻¹ for PHI krav (øverst) og l/s pr m² for BR08-krav (nederst).

Det fremgår af testresultaterne at alle huse overholder kravet til tæthed. Det ses desuden, hvor stor forskel der er mellem BR08-kravene og de målte

værdier fra Komforthusene. Betydningen af tæthed for energiforbruget er gennemgået i afsnit 3.6

7.4 Vurdering af PHI-anbefaling om overtemperatur maks. 10% med $t > 25^{\circ}\text{C}$

Der blev i afsnit 3.3 set på problemet med overtemperatur i Komforthusene, som i nogle af husene har givet et dårligt termisk indeklima. I det følgende vurderes kriteriet om maks 10% af tiden med temperaturer over 25°C . Også her er der korrigeret med vejrdato fra det kunstige år. Resultaterne fremgår af Tabel 7.5.

	12	28	37	39	43	45	47	49
Forventet tid med overtemperatur beregnet i PHPP for standard vejrdato	4	3	0	0	0	0	3	1
Forventet tid med overtemperatur beregnet med kunstigt år	3	3	1	0	0	-	4	0
Målt ud fra værdier i kunstigt år (middel for alle rum)	12	21	32	4	17	6	16	6

Tabel 7.5: Kontrol af passivhus-anbefaling om maks 10% tid med overtemperatur.

Det fremgår af Tabel 7.5 at de 5 ud af de 8 huse har problemer med overtemperaturer i mere end 10% af tiden. Denne tendens kan også bekræftes af vurderingen af termisk indeklima i kapitel 3.

Det er væsentligt at fremhæve, at beregningen af overtemperatur sker på basis af en middelterperatur i hele boligen, som ikke stemmer overens med indeklimaet i en virkelig bolig. Fx er middelværdien på 17% i hus 43 dækkende over en afvigelse på op til 22% i stuen på 1. sal og 9% i børneværelset mod nordøst. Der er dermed i virkelighedens bolig en stor variation mellem rummene, som ikke tages med ved vurderingen af bygningen som et samlet hele. Denne problematik er ligeledes diskuteret i [Larsen, 2011], som anbefaler kontrol af indeklimaet i kritiske rum.

7.5 Energieffektivitet (SEL, vekslereffektivitet)

Ved vurdering af energieffektivitet i Komforthusene er energien til lufttransport i anlæggene (SEL-værdien) samt vekslereffektiviteten i varmevekslerne vurderet. I begge vurderinger er der en vis usikkerhed, da luftmængden kan ændre sig i løbet af perioden. Luftmængder er målt i alle huse i perioden mellem oktober 2008 og april 2009, men er ikke senere kontrolleret ved nedtagning af udstyr. Målingerne er foretaget ved forskellige driftstrin for anlægget. For hus 43, som kører med trinløs ventilator, er der lavet en ventilatorkarakteristik til bestemmelse af luftmængden. Denne fremgår af den husspecifikke rapport til hus 43.

7.5.1 SEL-værdi

Vurdering af de målte SEL-værdier i hvert af husene fremgår af Tabel 7.6.

	12	28	37	39	43	45	47	49
Målt SEL	364/ 463	2054/ 2088	1371/ 1368	618	1244	-	1548/ 997	629

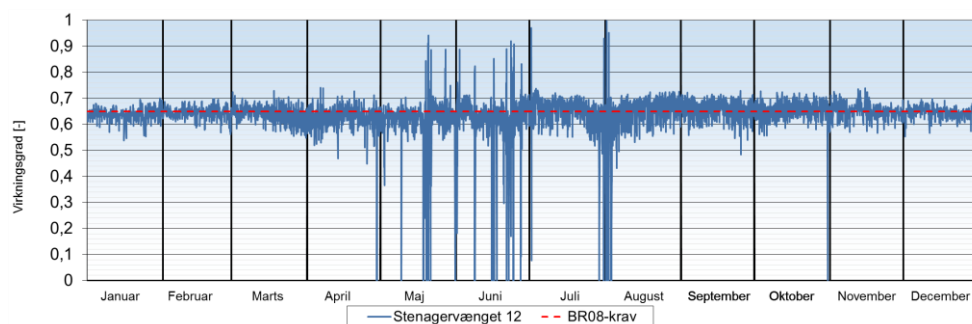
Tabel 7.6: SEL-værdier målt i husene. I de huse hvor der er angivet to værdier er disse gældende for hhv familie 1 og familie 2.

Af tabellen med de målte SEL-værdier fremgår det, at der er stor forskel i værdierne og en faktor 6 mellem højeste og laveste værdi. Hvis der ses på betydningen af dette på huset el-forbrug til ventilatorerne findes for hus 12 et el-forbrug på 140 kWh på et år. I hus 28 er dette tal 325 kWh. Samtidig er det væsentligt at huske, at luftskiftet i hus 12 er 0,24 l/s pr m² men kun 0,13 l/s pr m² i hus 28. Dermed får hus 12 altså et væsentligt højere luftskifte til et elforbrug der er under det halve af hus 28.

En høj SEL-værdi kan dermed ødelægge selv de bedste hensigter om at lave et effektivt og energivenligt ventilationssystem, så det kunne derfor være en mulighed, at dette som standard dokumenteres ved aflevering af byggeriet ud fra målinger på det opstillede anlæg.

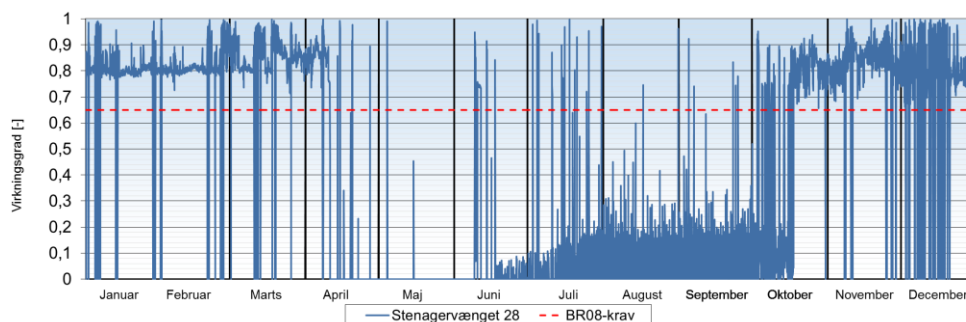
7.5.2 Vekslereffektivitet – virkningsgrad

Inden projektets start blev det diskuteret, om virkningsgraden på varmeveksleren i ventilationsanlægget kunne bestemmes, da disse beregninger kræver stor nøjagtighed ved placering af følerne i anlægget. Et anlæg placeret i "felten" giver selvsagt ikke de samme muligheder for nøjagtighed som et anlæg i laboratoriet. Det blev valgt at prøve at gennemføre målingerne, og konklusionen er helt som forventet, at disse målinger er af meget varierende kvalitet. I det følgende præsenteres målinger fra de forskellige typer anlæg brugt i husene. Usikkerheden på målingerne forventes at være omkring +/-10%.



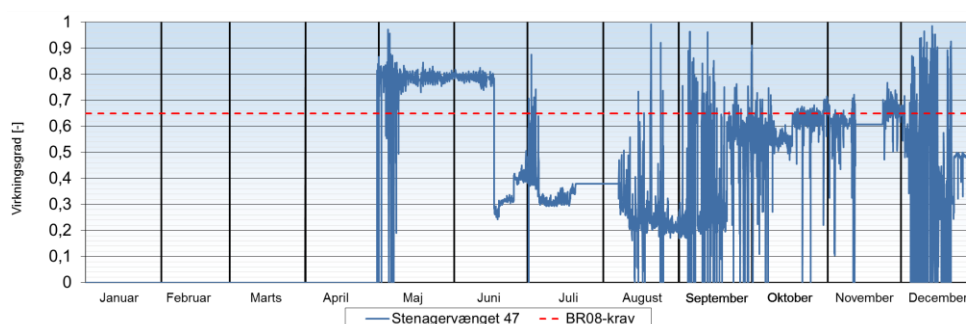
Figur 7.1: Virkningsgrad målt i Stenagervænget 12, 2010. Usikkerhed på måling er ca. +/-10%.

Figur 7.1 viser virkningsgraden målt i Drexel og Weiss anlægget. Virkningsgraden ligger stabilt hele året omkring 0,6.



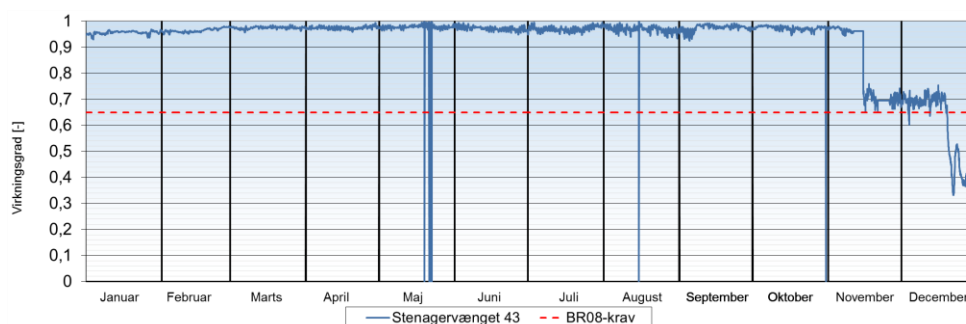
Figur 7.2: Virkningsgrad målt i Stenagervænget 28, 2010. Usikkerhed på måling er ca. +/- 10%.

Figur 7.2 er målt i Nilans VP18 kompaktanlæg. Her ligger virkningsgraden omkring 0,8. I sommerperioden bypasses der, hvilket forklarer udfaldet af målinger i sommerperioden.



Figur 7.3: Virkningsgrad målt i Stenagervænget 47, 2009. Usikkerhed på måling er ca. +/- 10%.

Figur 7.3 viser målinger fra Nilans comfort 300 ventilationsanlæg. Her varierer virkningsgraden mellem 0,8 og 0,4. Dog kun mellem 0,6 og 0,8 i de kolde måneder. Anlægget slukkes i december, da huset står tomt i denne måned.



Figur 7.4: Virkningsgrad målt i Stenagervænget 43, 2010. Usikkerhed på måling er ca. +/- 10%.

Figur 7.4 viser målinger fra Paul Atmos 175 ventilationsanlægget installeret i hus 43. Målingerne viser det meste af året en usædvanlig høj virkningsgrad, men kontrolleres databladet for anlægget lover dette en virkningsgrad mellem 85-95%. Der er ikke skiftet til bypass (skal gøre manuelt), hvilket stemmer godt overens med, at husets beboere først flyttede ind i august. I november falder niveauet til et lavere niveau da luftmængden ændres.

7.6 Opsummering

Alle Komforthusene er opført som passivhuse, hvilket betyder, at de gerne skal overholde passivhus-kriterierne. I dette afsnit blev det derfor kontrolleret, om dette også var tilfældet via sammenligninger mellem beregnet og målt energiforbrug.

Da PHPP-beregningen er lavet ud fra en række forudsætninger (fx en rumtemperatur på 20°C, et standard udeklima og en given intern belastning) er det ikke muligt direkte at sammenligne de målte og de beregnede værdier. Da både udeklima og rumtemperatur er væsentlige parametre når energiforbruget vurderes, blev der i PHPP-beregningen korrigeret for begge parametre ud fra målte værdier i Komforthusene. Dette gav ca. en fordobling af det beregnede forventede energiforbrug i huset, hvilket fint illustrerer vigtigheden af disse to parametre. De fleste huse har kørt med ca. 23°C i huset, hvilket koster ca. 6-8 kWh/m² pr år ekstra i dette tilfælde.

Ved vurdering af *passivhuskravet til rumvarme* overholder alle huse på nær et enkelt passivhuskravene. Dog vil forbruget i hus 28 og 37 reelt være højere end hvad der er målt i husene, da begge huse har haft ekstra varmekilder tilsluttet udenom målerne til måleprojektet på grund af utilstrækkeligt opvarmning i husene. Der vurderes dog, at disse bidrag er i mindre omfang. Hus 45 mangler data, og er ikke medtaget i vurderingen. Det hus der afviger fra kravet, har i perioden haft tekniske problemer, som kan forklare en del af afvigelsen.

Ved vurdering af *passivhuskravet til primært energi* findes der stor variation i de målte el-forbrug og en faktor 3 er fundet mellem det højeste og det laveste forbrug. Hus 12, 37, 39 og 43 overholder alle passivhuskravet. Hus 28 overskrider med 9 kWh, som sandsynligvis vil bortfalde hvis el-radiatorerne i huset erstattes af en varmekilde tilsluttet husets jordvarmepumpe. Hus 47 og 49 overskrider derimod begge kravet i væsentligt omfang. Begge huse har haft tekniske vanskeligheder, der kan forklare en del af afvigelsen.

Ved vurdering af *passivhuskravet til overtemperatur* findes at 5 ud af 8 huse har problemer med overtemperaturer i mere end 10% af tiden. I den forbindelse fremhæves det, at beregningen af overtemperatur sker på basis af en middeltemperatur i hele boligen, som ikke stemmer overens med indeklimaet i en virkelig bolig. Der er i virkelighedens bolig stor variation mellem rummene, som ikke tages med ved vurderingen af bygningen som et samlet hele. Vurdering af overtemperatur bør derfor foretages på rumniveau.

Sidst i kapitlet vurderes SEL-værdier og virkningsgrader for ventilationsanlæggene. Der er ved SEL-værdierne en faktor 6 i forskel mellem højeste og laveste værdi, hvilket rejser spørgsmålet om hvorvidt der bør stilles krav til dokumentation af dette ved aflevering af anlæg. Virkningsgraderne for anlæggene ligger indenfor forventet niveau.

8. Brugernes påvirkning på energiforbrug og indeklima

Brugernes påvirkning af både energiforbrug og indeklima er en væsentlig faktor, når vurderinger af disse parametre skal foretages. Brugernes adfærd kan betyde en variation på en faktor 3-4 i boligens energiforbrug [Andersen, 2009], [Gram-Hanssen, 2005], [Janson, 2010], og det er derfor væsentligt at overveje, om vi ved påvirkning af brugerne kan forbedre indeklimaet og samtidig reducere energiforbruget.

8.1 Generelle erfaringer

Meget tyder på, at kommunikation og oplysning af brugerne er vejen til succes, og der findes flere eksempler på hvordan manglende information har ført til enten dårligt indeklima eller forhøjet energiforbrug [Brunsgaard, 2010], [Janson, 2010].

Et eksempel på dette kan være beboernes brug og vedligehold af ventilationssystemet. Langt de fleste danske familier er ikke vant til at have et ventilationsanlæg i boligen, og dette vil derfor kræve information og adfærdsændring, for at der kan opnås succes og energivenlig drift. Ud fra denne erfaring, og andre tilsvarende, kunne man derfor overveje, om der skal være jævnlige serviceeftersyn på ventilationsanlæg på lige fod med service for vores biler.

Flere eksempler på uhensigtsmæssig adfærd er fundet i "Bolig for livet"-projektet, som nævner følgende [VKR, 2010]:

- Familien har problemer med overophedning i det store sydvendte køkken/alrum i. Moderen er på barsel og er derfor hjemme det meste af tiden. Ofte overstyrer hun den udvendige solafskærmning for at nyde udsigten, hvilket kan være en af årsagerne til, at der kan forekomme overophedning i køkken/alrum.
- Familien overstyrer ofte den automatiske styring i huset – specielt i forbindelse med styring af varme og solafskærmning for at nyde udsigten og skabe privathed i stuerne. På trods af de mange overstyringer, er familien positivt indstillet over for den automatiske styring.
- Familien oplevede lyden når ovenlysvinduerne åbnede generende i nattetimerne, hvilket resulterede i at den automatiske naturlige ventilation blev slået fra i værelserne i nattetimerne og derved reducerede muligheden for natkøling.
- Huset ventileres via automatisk naturlig ventilation sammen med mekanisk ventilation med varmegenvinding. Da den naturlige ventilation blev slået fra i november, savnede familien den friske luft og lyden af vinduer, der åbnede automatisk. De begyndte derfor at lufte ud ved manuelt at åbne vinduer og døre. Dette medførte ofte nedkøling af huset til under 22 grader, hvorpå opvarmningen sætter ind. Dermed skabtes en utilsigtet forøgelse af energiforbruget til opvarmning.

Der er derved masser af eksempler på brugere der "modarbejder" de gode hensigter i teknikken, som skal hjælpe dem til at opnå en optimal og energibesparende drift af boligen. Overstyringerne af automatikken viser også, at beboerne har behov for selv at kunne påvirke deres indeklima, og tages denne mulighed fra dem ved udelukkende at lave automatisk styring, og dermed optimal drift, vil der opnås utilfredse beboere. En anden

mulighed vil derfor være mere information om hvorledes boligen fungerer og hvordan adfærden skal være for at opnå de største energibesparelser og det bedste indeklima.

8.2 Erfaringer fra Komforthusene

Der har i løbet af Komforthusenes første år været flere adfærdsmæssige forhold hos beboerne, som har kostet dyrt i energiregnskabet. Nogle problemer har været forårsaget af uvidenhed, i andre tilfælde har det været beboernes adfærd der ikke har været energikønsomisk hensigtsmæssig.

Følgende er eksempler fra projektperioden:

- I hus 12 skal beboerne selv omstille anlægget fra vinterdrift til sommerdrift ved at udskifte veksler-modulet, som sørger for genvending af varmen, til et bypass-modul. Dette er blevet glemt i de to første somre anlægget var i drift, hvilket medførte et øget problem med overtemperaturer i boligen.
- I samme hus foretrækker familie 2 ca 24°C i stuen hele vinteren. Dette giver et væsentligt forøget energiforbrug til opvarmning. Det samme er tilfældet i flere af de øvrige huse.
- I hus 37 og 45 luftes der ofte ud i længere perioder i vinterhalvåret. Dette afkøler husene uhensigtsmæssigt meget og forøger de problemer anlæggene har med at opvarme huset. Udluftningen bør i stedet klares via det mekaniske ventilationsanlæg.
- I hus 45 opstillede beboerne i en kold periode en gasovn i stuen. Denne medførte væsentligt forhøjede CO₂-koncentrationer i huset og dermed et dårligt indeklima.
- I hus 47 ønskede beboeren ikke, at man kunne lugte tobaksrøg i huset når der blev røget indendørs. Ventilationsanlægget kørte derfor ofte forceret ventilation på et højt (og energikrævende) trin.
- I flere huse er der kørt med meget lave luftmængder, da beboerne havde den fejlopfattelse at de, ved at skrue ned for anlægget, kunne spare energi. Uheldigvis havde denne nedjustering andre konsekvenser såsom øget CO₂-niveau og RF samt øget energiforbrug til opvarmning fra andre varmekilder.

Flere af eksemplerne ovenfor kunne være undgået med mere oplysning til beboerne om hvordan de bruger deres bolig og samtidig sparer på energien. Selvfølgelig vil det altid være op til den enkelte bruger selv at afgøre, om vinduerne skal være åbne fx i soveværelset om vinteren, men man bør gøre brugerne opmærksomme på hvad det koster rent energimæssigt at lufte ud via vinduerne om vinteren i stedet for at lade ventilationsanlægget klare udluftningen. På samme måde kunne man også forklare fordelene ved netop at åbne vinduerne om sommeren og udnytte den gratis køling der findes i udeluften især i nattetimerne. Denne liste kunne blive lang, men en oplagt ide er fremover, at samle disse oplysninger i en manual til huset. Erfaringerne fra Komforthusene tyder på, at dette ville have afhjulpet nogle af ovenstående problemer.

8.3 Opsummering

Isaksson konkluderer i en svensk undersøgelse, at brugerne ikke købte deres lavenergi-boliger fordi det var lav-energiboliger, men fordi de havde en god placering og en god udsigt. De forholder sig positivt til lav-energikonceptet, men det var ikke en vigtig grund til beslutningen af købet

[Isaksson, 2006]. Samme konklusion findes i [Brunsgaard, 2010], når Komforthusene vurderes.

Samtidig beskriver Isaksson, at flere beboere ofte tænder stearinlys og er meget bevidste om hvornår de fx skal bruge tørretumbleren for at kunne holde huset varmt samt at alle indvendige døre skal være åbne for at sprede varmen i huset. Desuden nævnes tiltag som at lade badevandet afkøle i badekarret inden det lukkes ud [Isaksson, 2006]. I en anden undersøgelse fortæller Janson, at nogle brugere har kompenseret for den lave indetemperatur ved at tage ekstra tøj på før end de skruede op for varmen [Janson, 2010].

Flere af disse eksempler stiller krav til brugerne om ændret adfærd i forhold til deres tidligere boliger. Ikke alle er villige til, eller bevidste om, denne adfærdsændring, og det bør også diskuteres, hvorvidt det skal være nødvendigt med en ændret adfærd for at bo i et lavenergihus. Beboere uden en "energigivenlig" adfærd skal også kunne bo i lavenergihuse uden at dette føles som en begrænsning i deres adfærd. Der bør derfor aldrig indskrænkes i beboernes personlige komfort – bliver dette nødvendigt vil lavenergikonceptet ikke kunne opnå succes.

En oplagt mulighed i fremtidig lavenergibyggeri vil være en manual til beboerne. Ikke nødvendigvis for at ændre deres adfærd, men for at sikre, at de forstår konsekvensen af deres adfærd, som i nogle tilfælde forøger husets energiforbrug ganske mærkbart.

9. Fremtidens lavenergiboliger

Komforthusene startede som et udviklingsprojekt – et projekt der skulle give erfaring i at bygge lavenergibyggeri i en dansk kontekst – et projekt der skulle give ny viden til den danske byggebranche. Efter at have fulgt projektet med målinger i husene igennem 3 år kan det konkluderes, at målsætningen for projektet er opfyldt til fulde. I dette afsnit opridses nogle af de væsentligste erfaringer fra projektet med henblik på at hjælpe fremtidige lavenergibyggerier et skridt videre på vejen mod en optimal balance mellem et godt indeklima og et lavt energiforbrug.

9.1 Indeklima

Ved vurdering af indeklimaet indgår både temperatur, CO₂-niveau og relativ luftfugtighed. For det termiske indeklima blev overtemperatur det mest diskuterende emne i husene, da flere af husene har haft problemer med dette. For det atmosfæriske indeklima blev der sat fokus på de høje CO₂-niveau og relative luftfugtigheder der opnås i børne- og soveværelser gennem en nat.

Ud fra erfaringerne i projektet er der fundet følgende områder der kræver stor fokus for at opnå succes:

- Mulighed for udvendig solafskærmning
- Mulighed for brug af naturlig ventilation i sommerperioden (både dag og nat)
- Optimering af dagslysforhold så der både er gode dagslysforhold i ALLE rum og samtidig sikring mod overtemperatur
- Kontrol af indeklimaet i kritiske rum, herunder følgende særligt vigtige fokuspunkter
 - Termisk indeklima i rum med stort solindfald for at undgå overophedning
 - Atmosfærisk indeklima i sove- og børneværelser for at sikre et tilpas luftskifte og undgå høj relativ luftfugtighed eller CO₂-niveau
- Et ventilationsanlæg med både CO₂- og fugt-føler, hvis man ønsker at lave behovsstyring
- Fugt i soveværelser med direkte adgang til badeværelser – der er fundet tendens til en øget RF i disse rum. Udsugning på badeværelset skal sikres at kunne køre op i luftskifte når der bades
- Kolde soveværelser – er dette et ønske fra beboerens side, bør der orienteres om konsekvenserne for energiforbruget ved at køle et rum i boligen ned
- Støjdæmpning fra rum med ventilationsanlæg – husk at sætte fokus på dette for at forhindre støjgener fra ventilationsanlægget i at sprede sig rundt i huset

Herudover er der i vinterperioden problemer med tør luft. Dette problem er der ikke umiddelbart nogen løsning på, da løsningen vil være befugtning, som kan give andre problemer i boligen.

9.2 Energiforbrug

Næsten alle husene i dette projekt har overholdt kravet til energiforbrug. Dog er det væsentligt at understrege at man ved design af kommende lavenergiboliger skal have en vis overkapacitet i varmeanlægget. Energiberegningen foretages ud fra givne standardbetingelser, men som

det er vist i dette projekt, steg rumvarmebehovet ca. til det dobbelte pga en koldere vinter end den der er repræsenteret i standard vejrdato og en ønsket rumtemperatur på 23°C. Dette gav i nogle huse problemer med kolde rum, da anlæggene ikke havde denne overkapacitet til rådighed.

Ved en opsummering af væsentlige punkter i forbindelse med husets energiforbrug kan nævnes følgende:

- Vær sikker på at have overkapacitet i husets varmforsyning – mange parametre kan afvige fra energiberegningen. De mest væsentlige er udeklima, intern belastning og rumtemperatur
- Brug vindfang ved hoveddøren, da dette kan afhjælpe store varmetab, når døren åbnes i vinterperioden
- Sørg for at have mulighed for varmetilførsel direkte i alle rum, da risikoen for kolde rum dermed mindskes væsentligt

9.3 Dialog med brugerne

Brugerne i boligen er en væsentlig faktor for succes. En uhensigtsmæssig brugeradfærd kan ødelægge selv de bedste intentioner om et godt byggeri med lavt energiforbrug. Der er i kapitel 8 givet en lang række eksempler på hvordan brugere kan forøge boligens energiforbrug væsentligt.

En oplagt mulighed for at hjælpe brugerne på vej med en energibesparende adfærd er via en brugervejledning til huset. Denne vejledning kunne fx være en mappe med alle husets papirer og en forklaring til hvordan huset fungerer. Mekanisk ventilation i boligen er stadig nyt for mange mennesker, og derfor er det vigtigt at forklare hvordan anlægget virker og hvordan det skal vedligeholdes. Vejledningen kunne også være en DVD med illustrationer/gennemgang af boligen og dens installationer, hvor man direkte "klikker" sig ind på det emne man her og nu har brug for at høre noget om. Fx kunne DVD'en indeholde et klip med en person der skifter filter i anlægget, så familien herefter kunne gøre det samme.

Desuden er det væsentligt, at de teknikere der skal servicere anlæggene, også har information/viden om hvorledes anlæg og teknik i huset fungerer.

10. Referencer

- Andersen, R.V. Occupant behavior with regards to control of the indoor environment, phd thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, May 2009
- Artmann, N., Manz, H., Heiselberg, P., *Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation*. Renewable Energy 33 (12), pp 2589 – 2598, December 2008.
- At-vejledning A.1.2, Arbejdstilsynet, Januar 2008
- Bergsøe, Niels Christian; Afshari, Alireza, *Fugtstyret boligventilation: Målinger og evaluering* (SBI; 2008:08), Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, 2008.
- Brunsgaard, C., *Understanding of Danish Passive Houses based on Pilot Project Comfort Houses*. Aalborg University, Department of Civil Engineering, ISSN-nr: 1901-7294, Thesis nr. 28, 2010.
- Bygningsreglement 2010, <http://www.ebst.dk/bygningsreglementet.dk>
- DS/EN/CR 1752, *Ventilation i bygninger – Projekteringskriterier for indeklimaet*, Dansk standard, 2001
- DS/EN 15251, *Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*, Dansk standard, 2007.
- DMI, Danmarks metrologiske institut. Vejrdata målt for målestation 6104, Billund
- DS490, *Lydklassifikation af boliger*, Dansk standard, 2007
- Energistyrelsen. Energistatistik 2009. Energistyrelsen, 2010.
- Feist, W, *Passive House Planning Package 2007 – Requirements for Quality approved passive houses*, Passive House Institute, 2007
- Gram-Hanssen, K., *Husholdningers elforbrug – hvem bruger hvor meget, til hvad og hvorfor?*, SBI2005:12, Statens Byggeforskningsinstitut, 2005
- Hyldgård, C.E; Funch, E.J.; Steen-Thøde, M., *Grundlæggende climateknik og bygningsfysik*, Aalborg Universitet, Institut for byggeri og anlæg, 2001. ISSN 1395-8232 U9714
- Ingeniøren (tidsskrift), Lavenergihuse plages af overophedning og kolde rum, Ulrik Andersen, 27-08-2010
- Isaksson, C., Karlson, F., *Indoor Climate in low-energy houses – an interdisciplinary investigation*, Building and Environment 41 (2006), pp. 1678-1690.

- Janson U., *Passive houses in Sweden - From design to evaluation of four demonstration projects*, Report EBD-T--10/12, ISBN 978-91-85147-46-5, Lund University, Faculty of Engineering LTH, 2010.
- Koch, A., Kvistgaard, B., Larsen, J. og Nielsen, T., *Fugt i boligen*, Teknologisk Institut, 1987
- Komfort Husene - erfaringer, viden og inspiration*. Saint-Gobain Isover a/s, 2010. 259 s.
- Larsen, T.S., *Vurdering af indeklimaet i hidtidigt lavenergibyggeri - med henblik på forbedringer i fremtidens lavenergibyggeri*, Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg, 2011. 65 s. (DCE Contract Reports; 100)
- Larsen, T.; Maagaard, S., *Renovation of a detached single-family house to an energy efficient low energy house*, i proceedings til NSB2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics, Finland 2011.
- Maripuu, M.-L.; Afshari, A., *Demand controlled ventilation systems - State-of-the-art-review, Technical report D nr R2009:04*, Department of Building Technology, Building Services Engineering, Chalmers University of Technology, 2009.
- Marsh, R.; Grupe Larsen, V.; Hacker, J., *Bygninger, Energi, klima, mod et nyt paradigme*, Statens Byggeforskningsinstitut, 2008
- Minergie® Agentur Bau, Position des verieins minergie ® zum thema luftheizung, Notat, 11.10.2007
- SBI-anvisning 196, Indeklimahåndbogen*, Ole Valbjørn, Susse Lausten, John Høwisch, Ove Nielsen, Peter A. Nielsen, Statens byggeforskningsinstitut, 2000
- SBI-anvisning 202, Naturlig ventilation i erhvervsbygninger*, Karl Terpager Andersen, Per Heiselberg og Søren Aggerholm, Statens byggeforskningsinstitut, 2002
- SBI-anvisning 217, Udførelse af bygningsakustiske målinger*, Dan Hoffmeyer, Henrik S. Olesen & Birgit Rasmussen, Statens byggeforskningsinstitut, 2008
- SBI-anvisning 219, Dagslys i rum og bygninger*, Kjeld Johnsen og Jens Christoffersen, Statens byggeforskningsinstitut, 2008
- SBI-anvisning 224, Fugt i bygninger*, Erik Brandt m.fl., Statens byggeforskningsinstitut, 2009
- VKR-Holding, Oplysninger vedr *"Bolig for Livet"* er stillet til rådighed for denne analyse via Ellen Kathrine Hansen, VKR-Holding A/S, december 2010.
- Aarhus Arkitekterne, levering af plantegning til case study

Bilag A: Krav til indeklima og energiforbrug

Vurdering af målingerne foretages for det termiske og atmosfæriske indeklima ved brug af retningslinjerne opstillet i DS/EN 15251 (*Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*). I projektets oprindelige analyser fra 2008 blev der taget udgangspunkt i "DS/EN/CR 1752, *Ventilation i bygninger – Projekteringskriterier for indeklimaet*", men da de fleste i dag bruger DS/EN 15251, følger analyserne i denne rapport hovedsageligt sidstnævnte standard, men der er indsamlet inspiration til vurderingerne fra flere forskellige kilder til, hvordan måleresultater kan vurderes, hvilket fremgår af de følgende afsnit. Det oprindelige udkast til vurdering af indeklima er vedlagt som bilag A.

Der er i konkurrenceprogrammet for Komforthusene ikke stillet konkrete krav om opfyldelse af et specifikt niveau, men da husene markedsføres som Komforthuse, bør kategori II som minimum være opfyldt. Denne kategori svarer til et normalt forventningsniveau og bør bruges i alle nye byggerier og renoveringer [DS/EN 15251, 2007]. Måleresultaterne fra målingerne af temperatur, relativ fugtighed og CO₂-niveau vil derfor blive holdt op mod en opfyldelse af dette. Kravene til den termiske og atmosfæriske komfort ud fra DS/EN 15251 er gennemgået i afsnit A.1 og A.2. Krav til dagslysfaktoren i centrale rum i huset gennemgås i afsnit A.3 og tager udgangspunkt i BR08. Krav til det akustiske indeklima tager udgangspunkt i DS490, *Lydklassifikation af boliger* og gennemgås i afsnit A.4.

Ved vurdering af energiforbruget i de enkelte bygninger vil dette både blive vurderet ift forskellige typer af forbrug og ift en opfyldelse af passivhus-kriterierne og passivhus-anbefalingerne. Dette er yderligere beskrevet i afsnit A.6-A.8.

A.1 Termisk indeklima

For at kunne opstille et krav til det termiske indeklima, skal et aktivitetsniveau i huset antages. Her er der brugt 1,2 met, hvilket svarer til stillesiddende aktivitet. Der opstilles i Tabel A.0.1 temperaturintervaller for både kategori I, II og III, som måledata vil blive holdt op imod.

Aktivitetsniveau [met]			1,2		
Kategori			I	II	III
Operativ temperatur	[°C]	Sommer	24,5 ± 1,0	24,5 ± 1,5	24,5 ± 2,5
		Vinter	22,0 ± 1,0	22,0 ± 2,0	22,0 ± 3,0

Tabel A.0.1. Krav til temperatur for hhv. kategori I, II og III. [DS/EN 15251, 2007]

Da projektet startede i 2008, var der i bygningsreglementet ingen specifikke krav til det termiske indeklima, men der stod under stk. 6.2.1, stk. 1 at:

"Bygninger skal opføres, så der under den tilsigtede brug af bygningerne i de rum, hvor personer opholder sig i længere tid, kan opretholdes sundhedsmæssigt tilfredsstillende temperaturer under hensyn til den menneskelige aktivitet i rummene." [Br08]

I bygningsreglementet 2010 er der for lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020 defineret krav om, at det termiske indeklima skal

dokumenteres i kritiske rum. Her må temperaturen maksimalt overstige 26 °C i 100 timer og 27 °C i 25 timer pr. år.

A.1.1 Kriterier for overholdelse af kategori

I DS/EN 15251 er en metode, til vurdering af hvornår en komfortklasse er overholdt, præsenteret. I *Annex G – Anbefalede kriterier for acceptable afvigelser*, er det anbefalet at benytte 3 eller 5 % som maksimal afvigelse, hvilket på månedsbasis vil svare til 22 og 36 timer og på årsbasis til 259 og 432 timer. Det vælges i projektet at benytte dette kriterium som vurderingsparameter for om kategori II er overholdt. [DS/EN 15251, 2007].

På månedsbasis vurderes desuden ud fra afvigelser på 12 og 25 %, som anbefales i udkastet til "*Definition of the indoor environmental quality- Used for Net Zero Energy Buildings (NetZEB)*" udarbejdet i Strategisk forskningscenter for Energineutralt byggeri.

Vurdering af Passivhus-anbefaling for overtemperatur

Passivhusinstituttet anbefaler, at der maks. 10% af tiden forekommer temperaturer over 25°C. Denne anbefaling vil blive kontrolleret for hver måned samt på årsbasis.

Vurdering af overtemperatur ift danske BR-10 krav til lavenergibyggeri

I forbindelse med overtemperatur evalueres der i forhold til de maksimalt 100 timer over 26 °C og 25 timer over 27 °C i kritiske rum. Denne undersøgelse passer med de termisk opstillede krav efter kategori II, hvor komforttemperaturen går fra 23 til 26 °C med sommerbeklædning.

Vurdering af problemer med utilstrækkelig opvarmning

For at vurdere, om der er problemer med utilstrækkelig opvarmning, er der til dette projekt opstillet følgende krav med inspiration fra overtemperaturkravene fra BR10 til lavenergiklasse 2015 og bygningsklasse 2020. De 100 og 25 timer benyttes ligeså, men ved temperaturer under henholdsvis 20 °C og 19 °C. Disse krav passer i forhold til vinterbeklædning i kategori II.

A.2 Atmosfærisk indeklima

Som indikator for luftkvaliteten i huset vurderes både CO₂-niveauet i huset samt den relative luftfugtighed. Dog er bidrag fra fx menneskelige bioeffluenter samt afgang af materialer også noget der spiller ind på vores vurdering af luftkvaliteten i et rum. Dette er dog ikke målbart på samme måde, som ovenstående parametre, men vurderes i stedet bl.a. via vores lugtesans. Fælles for alle påvirkningerne af det atmosfæriske indeklima er, at antallet af utilfredse reduceres, når ventilationsmængden forøges, men en forøget ventilationsmængde resulterer samtidig i et forøget energiforbrug, så det er her vigtigt at finde en balance. I bygningsreglementet er der ikke stillet nogle direkte krav til atmosfærisk komfort, men der stilles dog krav til en minimums ventilationsmængde i boliger [BR10, 2011].

Kriterier for både CO₂ og relativ luftfugtighed vurderes i projektet i forhold til kategori II fra DS/EN 15251. Desuden vurderes om setpunktsværdierne har været overskredet i mere end ét sammenhængende døgn. Har dette været tilfældet opfyldes kravene for atmosfærisk komfort ikke. Undersøgelsen af

om forskellige niveauer har været overskredet bliver lavet på månedsbasis, hvorimod kravet til kategori II både undersøges på måneds- og årsbasis.

A.2.2 CO₂

Der findes i dag ikke danske anbefalinger for CO₂ niveau i boliger, og resultaterne fra dette projekt vil derfor udelukkende blive evalueret i forhold til et givent niveau over ude-koncentrationen for DS/EN 15251, hvor kategori II skal overholdes.

Vurdering af CO₂ iht DS/EN 15251

Der er i DS/EN 15251 beskrevet fire klasser, hvor klasse II er sat til 500 ppm over udekonzentrationen. [DS/EN 15251, 2007]. Dette vurderingskriterium medtages i undersøgelsen. Alle fire klasser kan ses i tabellen herunder.

Kategori	CO ₂ værdi over udekonzentration
I	350
II	500
III	800
IV	>800

Tabel A.0.2: Anbefalede CO₂ værdier fra DS/EN 15251.

Overskridelse af grænseværdier

Ved vurdering af CO₂-niveauet i boligen vurderes desuden antallet af perioder, hvor CO₂-niveauet i 8 sammenhængende timer overskrider kategori II. De 8 timer er valgt, da det indenfor en relativt kort periode bør være muligt at opnå et lavt niveau igen efter længere tids belastning (fx om morgenen når soveværelset forlades).

A.2.3 Relativ luftfugtighed (RF)

På samme måde som for evaluering af CO₂-niveauet benyttes DS/EN 15251 til vurdering af den relative luftfugtighed, hvor kategori II skal overholdes.

Vurdering af relativ luftfugtighed iht DS/EN 15251

I DS/EN 15251 optræder også fire kategorier for fugt. Overholdelse af disse kategorier medtages i undersøgelsen. Kategorier er vist i tabellen herunder.

Kategori	Relativ luftfugtighedsværdier
I	30-50 %
II	25-60 %
III	20-70 %
IV	<20 og >70 %

Tabel A.0.3: Anbefalede relativ luftfugtighedsværdier fra DS/EN 15251.

Kontrol af RF<45%

RF<45% vurderes, da det anbefales i [SBI196] at dette kan overholdes i minimum en måned om året, da støvmider dør, når den relative luftfugtighed kommer under 45%. Ved denne undersøgelse søges efter, om der i boligen har været en sammenhængende måned hvor RF<45%. Tilladelig afvigelse er 10 timer i løbet af perioden.

Kontrol af RF>75%

RF>75% vurderes, da der her er risiko for problemer i konstruktionerne. Der tillades RF>75% i højst 1% af tiden. [SBI224]

Overskridelse af grænseværdier

Ved vurdering af RF vurderes desuden antallet af perioder, hvor RF i 24 sammenhængende timer overskrider kategori II.

A.2.4 Ventilation

I analysen af atmosfærisk komfort vil ventilationsmængden blive sammenholdt med både CO₂ og relativ luftfugtighed, for at bestemme om der i boligen er en sammenhæng imellem de forskellige trin ventilationsanlægget kører på og eventuelle afvigelser på vurderingskriterierne for CO₂ og relativ luftfugtighed. Ved at analysere grafer med disse værdier vurderes det om ventilationsmængden er tilstrækkelig samt hvorvidt det er muligt at nedjustere luftskiftet fra 0,5 h⁻¹, som er gældende i dag (=0,35 l/s pr m² opvarmet etageareal).

A.3 Dagslys

Ved vurdering af dagslysforhold i husene tages der udgangspunkt i kravene fra bygningsreglement 2008 [BR08]. Her står bl.a. i "afsnit 6.5.1. Generelt":

Bestemmelse	Vejledning
STK. 1 Arbejdsrum, opholdsrum, beboelsesrum og fælles adgangsveje skal have tilfredsstillende lys, uden at det medfører unødvendig varmebelastning.	(6.5.1, STK. 1) Tilfredsstillende lys skal vurderes i sammenhæng med de aktiviteter og arbejdsopgaver, som planlægges i rummet. Kravet om dagslys skal ses i sammenhæng med almene sundhedsmæssige aspekter af dagslyset. Mængden af dagslys har endvidere indflydelse på behovet for kunstig belysning.

Og slås der op under *dagslys* i afsnit 6.5.2 findes følgende bestemmelse og vejledning:

Bestemmelse	Vejledning
STK. 1 Arbejdsrum, opholdsrum i institutioner, undervisningslokaler, spiserum samt beboelsesrum skal have en sådan tilgang af dagslys, at rummene er vel belyste. Vinduer skal udføres, placeres og eventuelt afskærmes, så solindfald gennem dem ikke medfører overophedning i rummene, og så gener ved direkte solstråling kan undgås.	(6.5.2, STK. 1) I arbejdsrum kan dagslyset i almindelighed anses for at være tilstrækkeligt, når rudearealet ved sidelys svarer til mindst 10 pct. af gulvarealet eller ved ovenlys mindst 7 pct. af gulvareal, forudsat at ruderne har en lystransmittans på mindst 0,75. De 10 pct. og 7 pct. er vejledende ved normal placering af bygningen samt normal udformning og indretning af lokalerne. Såfremt vinduestypen er ukendt på projekteringstidspunktet, kan omregning fra karmlysningsareal til rudeareal ske ved at multiplicere karmlysningsarealet med faktoren 0,7. Rudearealet skal forøges forholdsmæssigt ved reduceret lysgennemgang (fx solafskærmende ruder) eller formindsket lysadgang til vinduerne (fx ved tætliggende bygninger). Dagslyset kan ligeledes anses for at være tilstrækkeligt, når det ved beregning eller måling kan eftervises, at der er en dagslysfaktor på 2 pct. ved arbejdspladserne. Ved bestemmelse af dagslysfaktoren tages der hensyn til de faktiske forhold, herunder udformningen af vinduesudformning, rudens lystransmittans samt rummets og omgivelsernes karakter. Der henvises til By og Byg Anvisning 203: Beregning af dagslys i bygninger samt SBI-anvisning 219: Dagslys i rum og bygninger, 2007.

Ved vurdering af resultaterne fundet i dette projekt vil en **dagslysfaktor på 2%** også blive brugt som en minimumsgrænse for dagslysfaktoren, men hvis forholdene skal vurderes som gode dagslysforhold, bør dette kunne opnås **hele vejen ind gennem rummet** og altså ikke kun i områder, der kan betragtes som arbejdspladser. På denne måde vil dybden af rummet også kunne medtages i vurderingen, da dybe rum bør have større eller højere placerede vinduesarealer end smalle rum.

Metode til bestemmelse af dagslysfaktor er beskrevet i rapporten *"Komforthusene - Målinger og analyse af indeklima og energiforbrug i 8 passivhuse 2008-2011"*

A.4 Akustisk indeklima

Ved vurdering af målinger af støj fra ventilationsanlægget og efterklangstider i husene er der taget udgangspunkt i *DS490, Lydklassifikation af boliger*, da der i BR08 henvises til et funktionskrav heri, som er opfyldt ved opnåelse af klasse C.

Følgende uddrag fra BR08 er taget fra kapitel 6.4 *Akustisk indeklima* afsnit 6.4.2 *Boliger og lignende bygninger benyttet til overnatning*.

Bestemmelse	Vejledning
STK. 1 Boliger og lignende bygninger benyttet til overnatning og deres installationer skal udformes, så de, som opholder sig i bygningerne, ikke generes af lyd fra rum i tilgrænsende bolig- og erhvervsenheder, fra bygningens installationer samt fra nærliggende veje og jernbaner.	(6.4.2, STK. 1 - STK. 4) Boliger omfatter i denne forbindelse også hoteller, kollegier, pensionater, kroer, klublejligheder, kostskoler, sygehjem, plejehjem, døgninstitutioner og lignende bygninger, der benyttes til overnatning. Som fællesrum forstås fx fælles opholdsrum for flere boliger, trapperum eller gange. Funktionskravet for boliger anses for opfyldt, når de udføres som klasse C i DS 490, Lydklassifikation af boliger.

I udbudsmaterialet brugt til Komforthusene blev følgende krav til akustikken i huset sat:

Lydkrav

Der skal tages hensyn til bygningens lydmæssige formåen i projektet, så huset fremstår som et komfortabelt hus at leve i efterfølgende. Her skal specielt tages hensyn til de interne lydproblematikker, såsom efterklangstid.

Ved alle konstruktionssamlinger, installationer og gennemføringen skal husets lydmæssige formåen sikres.

Ses der på definitionerne af hhv klasse B og klasse C i DS 490 findes følgende formuleringer: [DS490]

4.2

Lydklasse B

Lydklasse med tydeligt bedre lydforhold end byggelovgivningens minimumkrav for boliger. Beboere bliver kun i begrænset omfang forstyrret af lyd eller støj.

4.3

Lydklasse C

Lydklasse svarende til intentionerne i byggelovgivningens minimumkrav. Op til mellem 15 % og 20 % af beboerne kan forventes at blive forstyrret af lyd eller støj.

Ved sammenholdelse af kravene i udbudsmaterialet og definitionerne af klasse B og C, vælges det i måleprojektet at stille et krav om opnåelse af niveau B.

Fremgangsmåden for målingerne af støj og efterklangstider er beskrevet i rapporten *"Komforthusene - Målinger og analyse af indeklima og energiforbrug i 8 passivhuse 2008-2011"*.

A.4.1 Krav til støj fra tekniske installationer

Ved vurdering af støj fra tekniske installationer, som i alle Komforthusene vil være støj fra ventilationsanlæg/kompaktaggregater, kompressorer, pumper mm, gælder følgende: [DS490]

Grænseværdier for støj fra tekniske installationer gælder for den enkelte installation og er relateret til umøblerede rum med lukkede vinduer og døre. Hvis målingerne foretages under andre rumforhold, foretages korrektioner i overensstemmelse med [1] i bibliografien.

I tilfælde af lavfrekvent støj bør det A-vægtede lydtrykniveau i det lavfrekvente område, $L_{pA,LF}$, ikke overstige 25 dB om dagen (kl. 07-18) eller 20 dB aften og nat (kl. 18-07). I lydklasse A og B bør overholdes grænseværdier, der er 5 dB lavere. Grænseværdier for lavfrekvent støj er relateret til en særlig målemetode, se [4] i bibliografien.

Kravene til maksimale grænseværdier for støj fra tekniske installationer er angivet i Tabel A.0.4.

Rumtype	Målestørrelse	Klasse A i dB	Klasse B i dB	Klasse C i dB	Klasse D i dB
I beboelsesrum og køkkener samt i fælles opholdsrum	$L_{Aeq,T}$	20	25	30	35

Tabel A.0.4. Støj fra tekniske installationer. Grænseværdier angivet som højeste værdier for A-vægtet, ækvivalent lydtrykniveau. [DS490]

A.4.2 Krav til efterklangstider

Kravene til efterklangstider i DS 490 er angivet i Tabel A.0.5. Ved vurdering af resultaterne benyttes kravene til "fælles opholdrum".

Rumtype	Klasse A <i>T</i> i s	Klasse B <i>T</i> i s	Klasse C <i>T</i> i s	Klasse D <i>T</i> i s
I trapperum og gange med adgang til mere end 2 boliger eller erhvervsenheder, ved 500 Hz, 1000 Hz og 2000 Hz	1,0	1,0	1,3	1,3
I gange i plejehjem og lignende, hvor gangarealet i nogen grad anvendes til ophold, ved 500 Hz, 1000 Hz og 2000 Hz	0,9	0,9	0,9	0,9
Fælles opholdsrum, ved 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz og 4000 Hz	0,6	0,6	0,6	Ingen krav
NOTE – I fælles opholdsrum er grænseværdien 0,9 s ved 125 Hz				

Tabel A.0.5. Krav til efterklangstid. Grænseværdier angivet som højeste værdier i hvert oktavbånd. [DS490]

A.5 Vurderingskriterier oversigt

Nedenstående tabel giver et samlet overblik over de parametre der vurderes i forbindelse med indeklimaet i Komforthusene.

		Maks. afvigelse	
	Kriterium	Måned	År
Termisk			
Generel vurdering	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
Overtemperatur	25 °C	10 %	10 %
	26 °C	100 h	100 h
	27 °C	25 h	25 h
Undertemperatur	20 °C	100 h	100 h
	19 °C	25 h	25 h
Atmosfærisk			
CO ₂	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
	Klasse II	8 h i træk	-
Relativ fugtighed	Klasse II	12 og 25 %	3 og 5 %
	Klasse II	24 h i træk	-
	70%< ϕ <30%	24 h i træk	-
	ϕ <45%	1 måned i træk på nær 10 timer	-
	ϕ >75%	1 %	-
Dagslysfaktor	2 % ved bagmur	-	-
Akustik			
Efterklang	Kat B	-	-
Tekniske installationer	Kat B	-	-

Tabel A.0.6: Oversigt over vurderingskriterier for indeklima.

A.6 Energiforbrug

Til vurdering af husets energiforbrug genereres en rapport med data for energi brugt til rumopvarmning, opvarmning af varmt brugsvand samt det totale el-forbrug således, at fordelingen mellem de forskellige forbrug fremgår.

Da måleudstyret i huset også bruger el, vil dette blive fratrullet det totale el-forbrug. En oversigt over målte forbrug ses i rapporten *"Komforthusene - Målinger og analyse af indeklime og energiforbrug i 8 passivhuse 2008-2011"*.

A.7 Overholdelse af passivhus-kriterierne

For at kontrollere, om husene overholder passivhus-kriterierne vil de nødvendige data for energiforbrug til rumopvarmning og det primære energiforbrug, dvs det totale el-forbrug, blive medtaget i separat datarapport på måneds- og årsbasis. Her skal det kontrolleres, om målingerne i husene viser en overensstemmelse med de beregnede værdier fundet i PHPP. Passivhus-kriterierne ses i Tabel A.0.7.

Varmebehov	15 kWh/m ² pr år
Primært Energibehov	120 kWh/m ² pr år
Lufttæthed	0,6 h ⁻¹ v. ΔP = 50 Pa

Tabel A.0.7. Passivhus-kriterierne. [PHPP2007]

Kontrol af om lufttætheden er opnået, foretages via rapporten udleveret efter blowerdoor-test af husene.

A.8 Overholdelse af passivhus-anbefalingerne

Udover kontrol af passivhus-kriterierne, som skal overholdes for at kunne blive certificeret som passivhus, undersøges det, om passivhus-anbefalingerne er overholdt i projektet. Også her oprettes der en rapport med de målte data, som sammenholdes med de opstillede anbefalinger. Anbefalingerne kan ses i Tabel A.0.8.

Varmelast	maks 10 W/m ²
Overtemperatur	maks 10 % (t<25°C)
Vinduers U-værdi	maks 0,80 W/m ² K

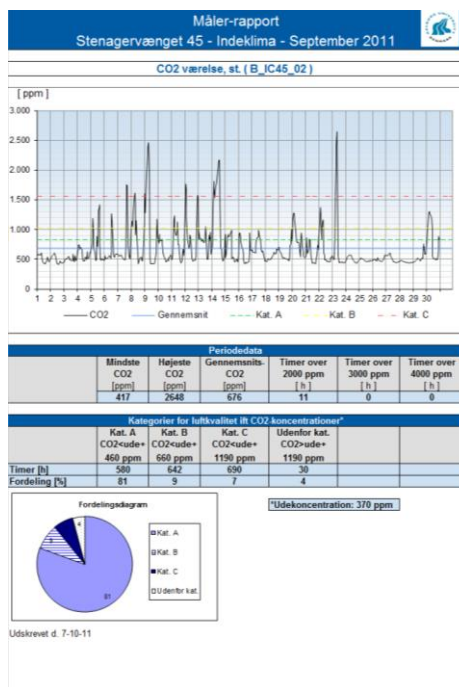
Tabel A.0.8. Passivhus-anbefalingerne. [PHPP2007]

Antallet af timer med overtemperatur tælles månedsvis, og vil blive udregnet både på månedsbasis og på årsbasis. Ifølge PHPP skal overtemperatur-timer tælles, når temperaturen er over 25°C. Endeligt vil vinduernes U-værdier blive kontrolleret i PHPP-beregningen for hvert enkelt hus.

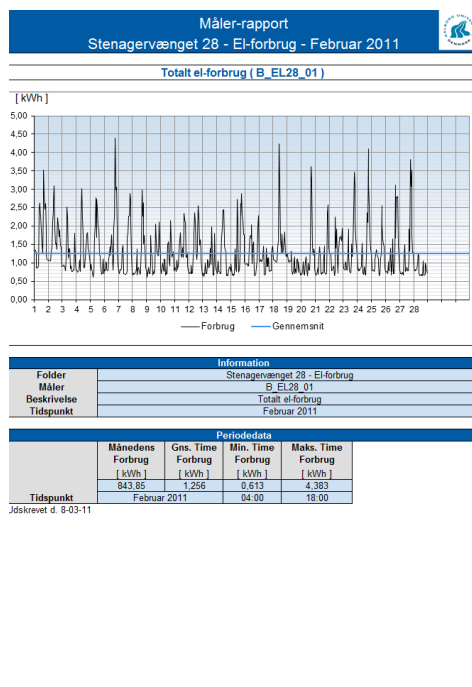
Bilag B – Målinger i husene

I dette bilag beskrives de udførte målinger, samt hvilke måleinstrumenter der er anvendt hertil. Målepunkter samt deres placering er skrevet i de husspecifikke rapporter.

Samtlige målinger er opsamlet i energistyringsprogrammet Omega EMS, hvorigennem der er lavet månedlige rapporter for alle målinger. Eksempler på disse rapporter ses af Figur B.0.1 og Figur B.0.2.



Figur B.0.1: Eksempel på CO₂-rapport.



Figur B.0.2: Eksempel på rapport vedr. totalt el-forbrug.

B.1 Indeklima

Der er i alle huse målt temperatur (T), relativ luftfugtighed (RH) og CO₂-niveau (CO₂) gennem hele projektperioden. Til disse målinger er der anvendt Eltek transmittere af typen GC-10 og GD-47EE, hvor førstnævnte kan måle T/RF og sidstnævnte T/RF/CO₂. Målere af typen GD-47EE skal tilsluttes 220V, mens GC-10 får strøm fra fire AA batterier.



Figur B.0.3: Eltekudstyr til måling af indeklima.

Måleren sender data trådløst til en datalogger af typen RX-250-AL placeret i Stenagervænget 39. Fra de 7 øvrige huse forstærkes signalerne vha. en repeater placeret i teknikrum hvis det er nødvendigt. Udstyrets præcision i intervallet -10°C til 50°C ses i den følgende tabel. På Figur B.0.3 ses

udstyret. Den store transmitter er af typen GD-47EE og den lille af typen GC-10, mens loggeren ses længst til højre.

Føler	Måleinterval	Præcision
CO ₂	0 – 5000 ppm	50 ppm + 3% af målt værdi
Relativ luftfugtighed	0 – 100%	10 – 90% RH ± 2%
		0 – 100% RH ± 4%
Temperatur	-20°C – 65°C	-5°C – 40°C ± 0,4°C
		-20°C – 65°C ± 1,0°C

Tabel B.0.1: Usikkerhed på Eltekudstyr.

B.2 Energi til rumvarme og varmt brugsvand

Ligesom med indeklima måles der energi til rumvarme og varmt brugsvand gennem hele projektperioden. Dette gøres med måleudstyr leveret fra *Brunata A/S* af typen HGQ1, se Figur B.0.4, der er typegodkendt til afregning af fjernvarme og varmeenergi i andre vandbårne varmesystemer.

Differenstemperatur	Energi
$\Delta\theta < 10 \text{ K}$	$\pm 6\% (\pm 8\%)$
$10 \text{ K} \leq \Delta\theta < 20 \text{ K}$	$\pm 5\% (\pm 7\%)$
$20 \text{ K} \leq \Delta\theta$	$\pm 4\% (\pm 6\%)$

Tabel 0.2: Usikkerhed på HGQ1 måler til varmt Brugsvand og rumvarme.



Figur B.0.4: HGQ1 måler til varmekonsum.

I Tabel 0.2 ses usikkerheden på måleren HGQ1. Tallene angivet i () gælder for målere med $q_s < 3 \text{ m}^3/\text{h}$ og $\text{flow} < 10\%$ af q_s . For mere information henvises til informationsmateriale fra *Brunata*. Målingerne er foretaget som peakmålinger, således at der er integreret over et varierende tidsrum, indtil en værdi på 1 kWh forekommer.



Figur B.0.5: Elmåler.

B.3 Elforbrug

Ud over de to førnævnte målinger måles ligeledes elforbruget. I alle huse registreres det totale el-forbrug. Herudover er der for hvert hus defineret hvilke øvrige parametre der skal registreres. Disse målepunkter findes i de husspecifikke rapporter. Hoved- og bimåler er integreret i et og samme panel, og kan ses på Figur B.0.5.

B.4 El-forbrug fra måleudstyr

El-forbruget bliver vurderet for hvert hus. Nedenstående tabel viser el-forbruget for forskelligt udstyr opstillet i husene. Eltek datalogger er kun opstillet i Stenagervænget 39. Her opsamles data for alle husene.

Udstyrsbeskrivelse	Effekt [W]
Eltek fugt-målere med ekstern strømforsyning, GS-44	0,7
Eltek temp, fugt, CO2-målere, GD-47	1,3
Brunata (uden brug af display)	3,7
Brunata (display besnyttets)	3,8
Eltek datalogger (RX-250-AL2M) logging	11,5
Eltek datalogger (RX-250-AL2M) idle	10,8
3com router	8,5
BTR-datalogger	6,0

Tabel B.0.3: Elforbrug for opstillet udstyr

Bilag C: Beregning af dagslysfaktor

Ved beregning af dagslysfaktoren i forskellige udvalgte rum er der hovedsageligt målt belysningsstyrker i opholdsrum som stue og køkken/alrum. Målemetoden følger anvisningerne i SBI-anvisning 219, Dagslys i rum og bygninger, [SBI219].

C.1 Definition af dagslysfaktor

Dagslysfaktoren (DF) beregnes som forholdet mellem belysningsstyrken [lux] i et punkt indenfor i rummet (E_{inde}) og belysningsstyrken [lux] målt samtidigt i det fri (E_{ude}) i et vandret plan med fri horisont og jævnt overskyet himmel.

$$DF = \frac{E_{\text{inde}}}{E_{\text{ude}}}$$

Dagslysfaktoren angives i %.

C.2 Bestemmelse af dagslysfaktor

Ved bestemmelsen af dagslysfaktoren blev der foretaget samtidige målinger af belysningsniveauet inde og ude på en dag med jævnt overskyet himmel. Målingerne indendørs blev foretaget i en højde på 0,85 m over gulvet langs med en linie gående vinkelret ud fra vinduet til bagvæg/modstående væg i rummet. I nogle tilfælde er der også foretaget målinger mellem to vægge, hvis området imellem disse er centralt i rummet.



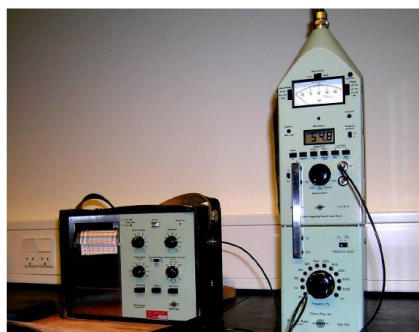
Figur C.1. Måling af dagslys i Komforthusene.

Bilag D: Måling af efterklangstider og støj fra ventilationsanlæg

Målingerne af efterklangstid og støj fra ventilationsanlægget foretages som beskrevet i [DS490] samt [Hyldgård]. Alle målingerne er alle foretaget i tomme huse med dørene til de tilstødende rum lukket i. Dette er den korrekte måde at måle støj fra tekniske installationer. Efterklangstiden er ligeledes målt i tomme rum og afhænger af overfladerne i rummet. Normalt bør denne måling foretages i et møbleret rum [SBI217], hvilket kan resultere i en mindre efterklangstid, da møblerne ofte vil have en støjdæmpende virkning.

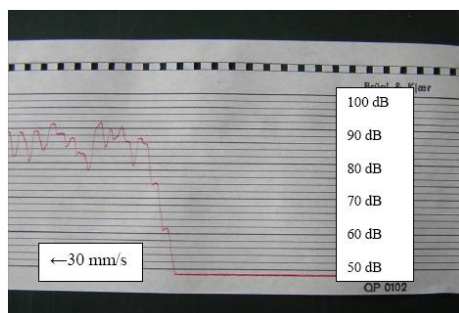
D.1 Bestemmelse af efterklangstid

Efterklangstiden er defineret som den tid, det tager lydtrykniveauet at falde 60 dB. Efterklangstiden for et rum er afhængig af lydens frekvens, og måles derfor i hvert oktavbånd. Til måling af efterklangstider opstilles en lydtrykmåler med oktavbåndsfilter i rummet. Desuden bruges en lydkilde, der brat kan afbrydes. Lydkilden udsender oktavbåndsfiltreret støj. Udstyret brugt i målingerne ses på figur D.1.



Figur D.1. Udstyr til måling af efterklangstid. Fra venstre lydkilde, lydgenerator, skriver og lydtrykmåler. [Hyldgård]

Efterklangstiden måles som nævnt for alle oktavbånd (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz og 8000 Hz). Efter hver måling fremkommer et print fra skriveren, som vist i figur D.2. Heraf bestemmes efterklangstiden for de enkelte oktavbånd.



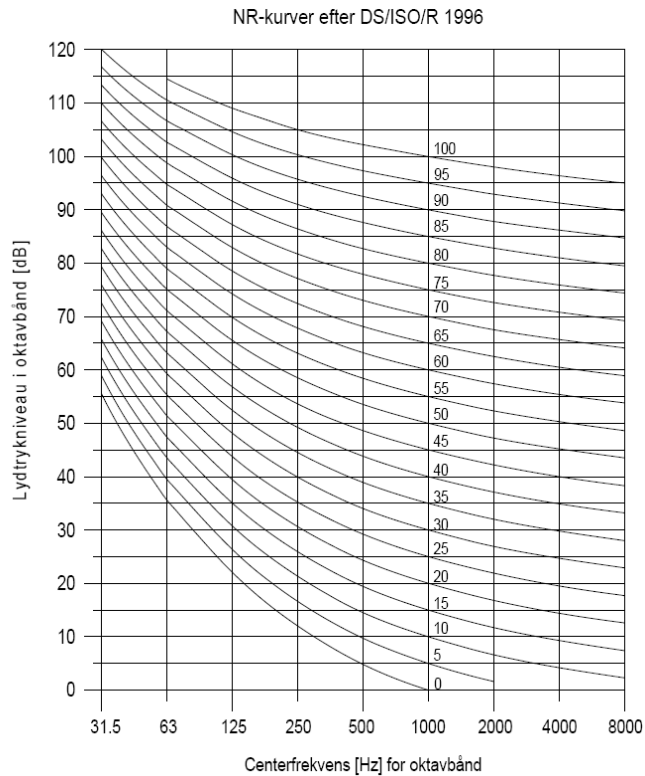
Figur D.2. Eksempel på print fra måling af efterklangstid. [Hyldgård]



Figur D.3. Måling af efterklangstid i Komforthusene.

D.2 Måling af støj fra ventilationsanlæg

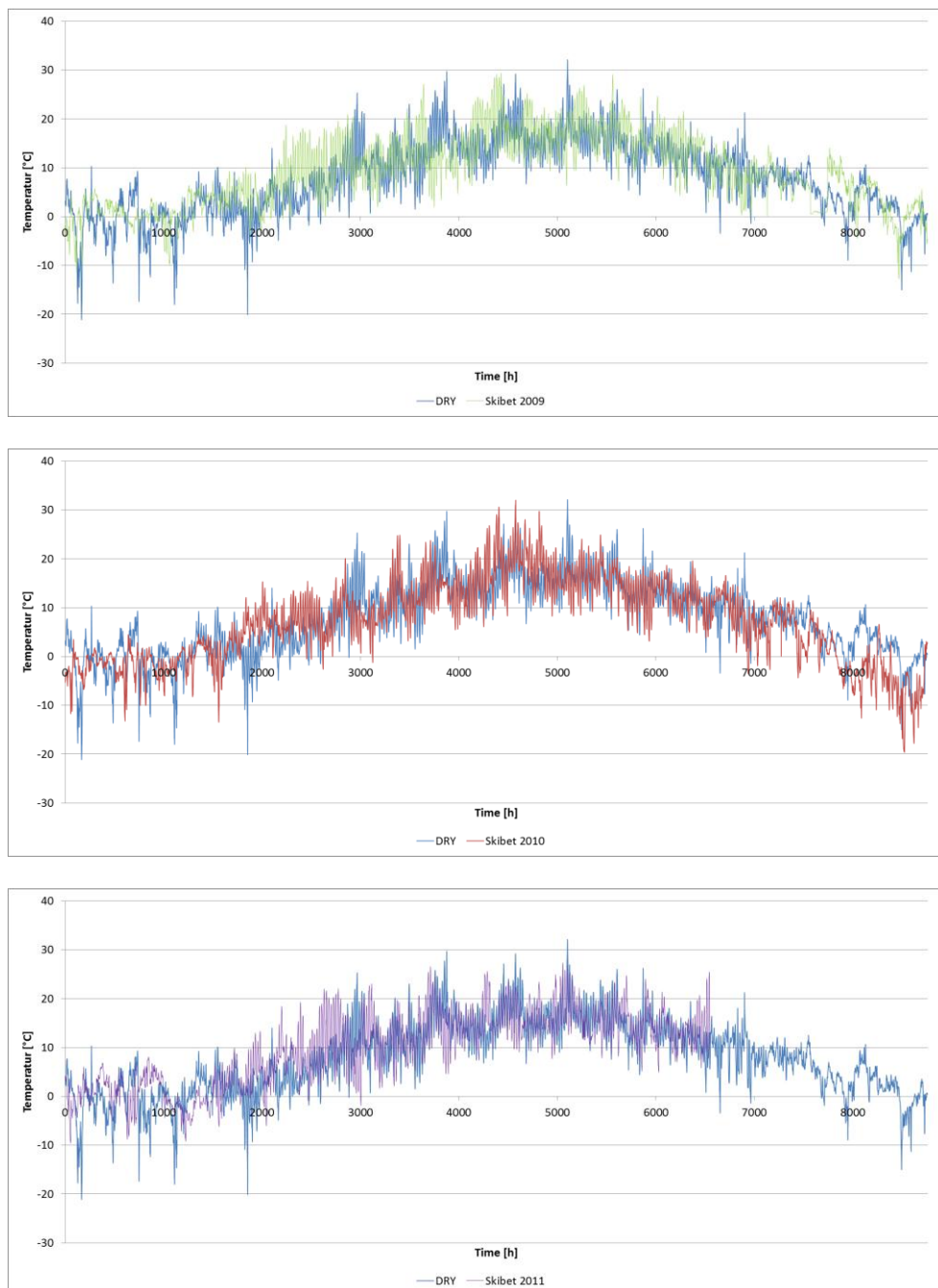
Målingerne af støj fra ventilationsanlægget er foretaget i husets stue eller køkken-alrum. Lydtrykniveauet måles for oktavbånd mellem 31,5 Hz og 8000 Hz. Aflæsningerne noteres i et NR-diagram således, at NR-kurve også kan aflæses, hvis dette ønskes. Ved vurdering af resultaterne ses dog kun på aflæsningerne målt i dB, da det er denne angivelse der benyttes i DS490. Eksempel på NR-diagram ses i figur D.4.



Figur D.4. NR-diagram. [Hyldgård]

Bilag E: Sammenligning af vejrdata (DRY & Skibet)

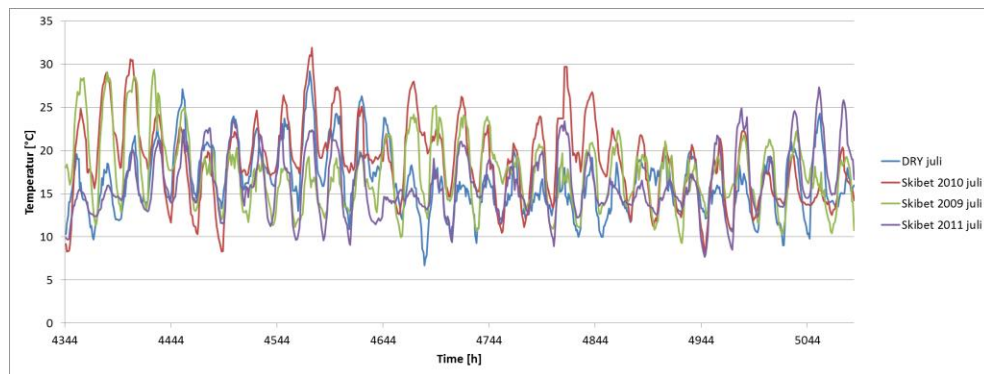
Den målte udetemperatur i vejrstationen i Skibet er her på figurerne vist sammen med DRY (Design Reference Year). Sammenligningen er foretaget for at illustrere forskellen mellem et standard vejrdatasæt og reelle målinger.



Figur E.1: Sammenligning mellem DRY og vejrdata fra skibet i hhv 2009, 2010, 2011.

Overordnet passer de målte vejrdata sammen med temperaturen i DRY, men der er dog afvigelse i forskellige perioder fra år til år.

På næste figur ses et uddrag fra juli måned i alle de tre målte år, samt juli i DRY. Denne måned er valgt som eksempel, da mange huse har problemer med overtemperatur i juli 2010.

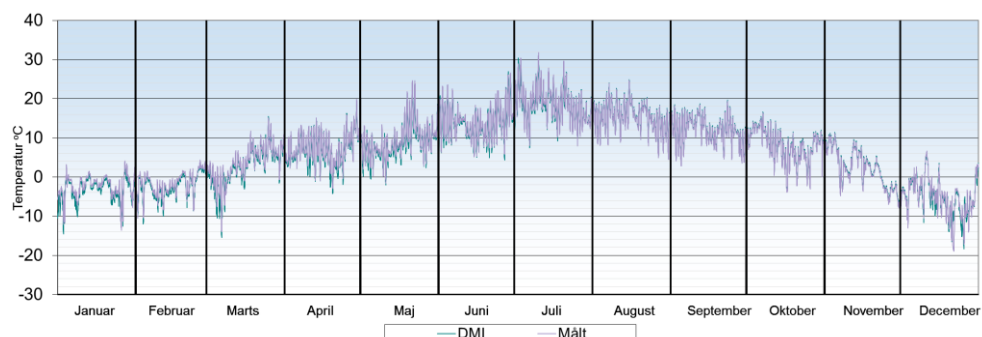


Figur E.2: Sammenligning mellem DRY og vejrdata fra skibet i juli måned.

Det ses, at temperaturen fra DRY ligger under de målte værdier i en del af måneden. Juli 2010 har de højest målte temperaturer flere steder i måneden, hvilket er en del af forklaring for de høje temperaturer indendørs i husene. Juli 2010 har en gennemsnitstemperatur på 18,8 °C, hvilken er markant højere end de andre målte år som ligger på 17,4 °C og 16,1 for henholdsvis 2009 og 2011. I DRY ligger gennemsnitstemperaturen på 16,4 for juli måned.

Bilag F: Sammenligning af vejrdata (DMI-Billund & Skibet)

Den målte udetemperatur i vejrstationen i Skibet er på figur F.1 vist sammen med målte vejrdata fra Skibet. Sammenligningen er foretaget for at illustrere forskellen mellem et DMI vejrdatasæt og reelle målinger, da DMI-målingerne fra Billund er brugt til at generere vejrdata til Meteonorm.



Figur F.1: Sammenligning af vejrdata for 2010 målt i Skibet og i Billund.

Tabel F.1 viser forskellen i månedsmiddelværdier for de to målestationer. Det fremgår af tabellen, at forskellen er minimal og hele året ligger tæt på måleusikkerheden på temperaturføleren i Skibet jf “Bilag B – Målinger i husene”.

	Skibet	DMI-Billund	Forskel
Januar	-2,4	-3,5	1,1
Februar	-1,7	-2,4	0,8
Marts	3,5	2,7	0,7
April	7,5	6,9	0,6
Maj	9,6	8,9	0,7
Juni	14,3	13,8	0,5
Juli	18,6	18,3	0,3
August	15,0	15,3	-0,2
September	11,7	12,0	-0,3
Oktober	7,8	8,1	-0,3
November	1,9	2,3	-0,3
December	-5,1	-5,3	0,2

Tabel F.1: Sammenligning af middeltemperaturer for 2010 målt i Skibet og i Billund.

