



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Energineutralt byggeri

Definition og fremtidig rolle i samfundet

Svendsen, Svend; Lund, Henrik; Heiselberg, Per Kvols

Publication date:
2014

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Svendsen, S., Lund, H., & Heiselberg, P. K. (2014). *Energineutralt byggeri: Definition og fremtidig rolle i samfundet*. SBI forlag.

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.

ENERGINEUTRALT BYGGERI

DEFINITION OG FREMTIDIG
ROLLE I SAMFUNDET



TITEL	Energineutralt Byggeri - Definition og fremtidig rolle i samfundet
UDGAVE	1. udgave
UDGIVELSEÅR	2014
FORFATTERE	Svend Svendsen Henrik Lund Per Heiselberg
REDAKTION	Svend Svendsen Henrik Lund Per Heiselberg
SPROG	Dansk
SIDETAL	40
ISBN	978-87-563-1612-5
LAYOUT	Louise Kragelund, Novagraf A/S
TRYK	Novagraf A/S
UDGIVER	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

Layout og trykning af denne publikation er gjort mulig med ALECTIA Prisen 2010, der blev tildelt Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri af ALECTIA Fonden.

Tak til forskere og ph.d.-studerende i ZEB, hvis viden inden for energineutralt byggeri har bidraget til denne publikation. De fulde bidrag kan findes i det publicerede materiale på www.zeb.aau.dk.

Tak til centerets Advisory Board for input og kommentarer.

Tak til Søren Dyck-Madsen, Det Økologiske Råd og Prof. Inger Andresen, NTNU, Norge for gennemlæsning og kommentarer til indholdet.

Publikationen er udarbejdet under Strategisk Forskningscenter for Energineutralt Byggeri (www.zeb.aau.dk). Centeret består af et forskningssamarbejde mellem forskningsinstitutioner og private virksomheder. Blandt forskningsaktiviteterne er 17 ph.d.-projekter. Forskningscenteret er etableret med støtte fra Det Strategiske Forskningsråd, Programkomiteen for Bæredygtig Energi og Miljø.



CENTERETS PARTNERE ER:

Aalborg Universitet (AAU)
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Teknologisk Institut (TI)
Statens Byggeforskningsinstitut (SBI)
Danfoss A/S
VELUX A/S
Saint-Gobain ISOVER A/S
Affald VarmeAarhus
Dansk Byggeri, Alufacadesektionen

CENTERETS STYREGRUPPE:

Per Heiselberg, AAU, Centerleder
Mary-Ann Knudstrup, AAU
Anna Marszal, AAU
Svend Svendsen, DTU
Søren Østergaard Jensen, TI
Kim Wittchen/Søren Aggerholm, SBI
Peter Andersen, Danfoss
Karsten Duer, VELUX
Susanne Højholdt/Erling Jessen, ISOVER
Mette Rude, Affald VarmeAarhus
Carsten Pedersen, Dansk Byggeri

FORORD

Denne publikation indgår i en række udgivelser fra Det Strategiske Forskningscenter for Energieutralt Byggeri. Formålet med udgivelserne er at fremme den forskning, som centret er engageret i.

Videnskabelige artikler og ph.d.-afhandlinger kan ofte være vanskelige at læse for folk uden for forskningsmiljøet. Det har derfor været vores hensigt at udgive publikationer, som kunne fungere som appetitvækkere for den igangværende såvel som afsluttede forskning, og derved give læseren et indblik i indholdet af de forskellige afhandlinger og rapporter. Hermed håber vi at skabe øget interesse for forskningsresultaterne og bidrage til en bredere formidling af disse inden for bygningsområdet.

Forskningsaktiviteterne er sammenfattet og præsenteret i følgende tre publikationer:

- Energieutralt byggeri
 - Definition og fremtidig rolle i samfundet
- Energieutralt byggeri
 - Designprincipper og byggede eksempler for enfamiliehuse
- Energieutralt byggeri
 - Tekniske løsninger

Nærværende publikation beskæftiger sig med at definere og uddrage de kendetegnende karakteristika i energieutralt byggeri, såvel som at beskrive den rolle, det pågældende byggerikoncept kan spille i fremtidens samfund med et energisystem, som er hundrede procent baseret på vedvarende energikilder. Denne og øvrige udgivelser, såvel som publicerede ph.d.-afhandlinger, rapporter og artikler, er tilgængelige på centrets hjemmeside - www.zeb.aau.dk.

Svend Svendsen, Redaktør,
Prof. Danmarks Tekniske Universitet
Per Heiselberg, Centerleder,
Prof. Aalborg Universitet

INDHOLD

INTRODUKTION

- Introduktion 8
- Energinutralt byggeri 9

ROLLE I FREMTIDENS

VEDVARENDE ENERGISYSTEM

- Integreret del af energisystemet 12
- Fremtidens varmforsyning 13
- Geografisk varmeplanlægning 14
- Samspil med energisystemet 16

ROLLE I FREMTIDIG UDVIKLING AF BYGGERIET

- Rolle i forhold til byggeriets udfordringer 20
- Investeringer i vedvarende energi 21
- Forbedring af bygningens drift 22
- Forbedring af indeklimaet 23
- Forbedring af bygningens holdbarhed 24

ENERGINEUTRALT BYGGERI - BOLIG FOR LIVET

- Bolig baseret på aktivhusprincipper 28
- Energikoncept 30
- Energibalance 32
- Indeklima 34

REFERENCER

38



INTRODUKTION



INTRODUKTION

8

For at realisere visionen om at skabe et samfund, som er uafhængigt af fossile brændstoffer inden 2050, er det nødvendigt med en betydelig reduktion af energiforbruget og en stigning i produktionen af vedvarende energi i de kommende år. Udviklingen i energiforbruget i byggesektoren er i den henseende af afgørende betydning, da denne udgør en tredjedel af det totale energiforbrug i Danmark, og da det er påvist, at der her er et stort reduktionspotentiale [Wittchen 2004]. Udnyttelse af potentialet kræver meget mere end en gradvis forøgelse af energieffektiviteten. Et vigtigt bidrag hertil er udviklingen af integrerede bygningskoncepter, som udnytter de bedste energieffektiviserings tiltag og vedvarende energi som kompensation for energi brugt fra fossile energikilder, hvorved der opnås en neutral fossil energibalance. I dag er det nødvendigt at producere den vedvarende energi i nærheden af bygningen for at opnå energineutralitet, men dette krav vil blive mindre, efterhånden som produktionen af vedvarende energi øger sin andel i energiforsyningsystemet, hvilket er illustreret i Fig. 1.

KONCEPTETS FORDELE OG VÆRDIER

Ud over de generelle samfundsmæssige fordele, som en nedbringelse af udledningen af drivhusgasser og en reduktion i afhængigheden af fossile brændstoffer medfører, vil ZEB-konceptet også medføre fordele for:

- Husejeren, ved at sikre en reduktion af husets driftsomkostninger og forbedre dets indeklima.
- Byggesektoren, ved at udvikle nye og mere intelligente teknologier, komponenter og materialer og derved stimulere til teknisk og økonomisk vækst i sektoren.
- Energiforsyningsystemet, ved at forbedre systemets fleksibilitet og evnen til at tilpasse sig til flere vedvarende energikilder, samt ved at reducere behovet for back-up-løsninger i et system, som udelukkende anvender vedvarende energi.

BETINGELSERNE FOR DEN ENERGINEUTRALE BOLIG OVER TID

Bygningen er som udgangspunkt designet med et meget lavt energibehov

Forsyning af vedvarende energi fra nettet.

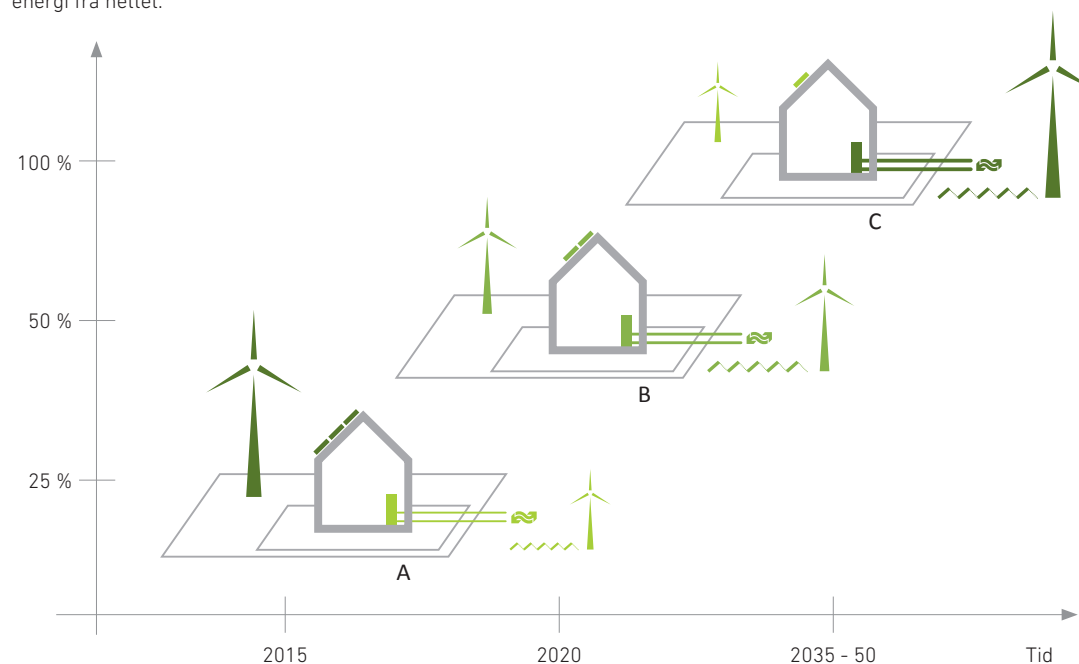


Fig. 1

- A I 2015 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet begrænset. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen og/eller på grunden.
- B I 2020 er mængden af tilgængelig vedvarende energi fra nettet større. Bygningen kan gøres energineutral ved egenproduktion af energi (el og varme) på bygningen og/eller ved produktion af energi i lokalområdets ejerlav.
- C I 2035 forventes det, at bygningsmassens energibehov kan dækkes af vedvarende energi fra nettet. Desuden kan der suppleres med egenproduktion (el og varme).

ENERGINEUTRALT BYGGERI

Energinetralt byggeri (Zero Energy Buildings, ZEB) omfatter bygninger, som er designet til at have et lavt energibehov og således, at energibehovet kan dækkes af fossilfri energikilder. Det baseres således på en optimal kombination af energibesparelser og tilførsel af vedvarende energi fra elektriske, termiske og/eller biogasbaserede ledningsnet eller fra et vedvarende energiforsyningssystem på stedet.

Energinetralt byggeri karakteriseres også ved et godt indeklima hvad angår temperatur, luftkvalitet, dagslys og akustik, såvel som en høj arkitektonisk kvalitet, hvor der lægges vægt på respekten for brugeren af bygningen.

Målet er at fjerne de problemer, der er forbundet med brugen af fossil energi ved at skifte til et fuldt ud fossilfrit energiforsyningssystem. Der bør hovedsageligt udvikles langsigtede løsninger, men i processen bør der også tages højde for overgangen fra det nuværende til det fremtidige energiforsyningssystem. Den optimale løsning vil afhænge af den givne sammenhæng.

ENERGINEUTRALT BYGGERI I HOVEDTRÆK

Et energinetralt byggeri er forbundet til et energiforsyningsnet og balancerer sit fossilbaserede primærenergiforbrug sådan, at den vedvarende primærenergiproduktion tilført energiforsyningsnettet er på samme niveau som den fossile primærenergi hentet fra energiforsyningsnettet.

En årlig fossilbaseret primærenergibalance i omegnen af 0 kWh/(m² a) vil typisk føre til, at en stor del af den vedvarende energiproduktion, som foregår på stedet, vil blive udvekslet med nettet. Derfor producerer det energinetralt byggeri energi, når betingelserne er til stede, mens det bruger energi fra nettet den øvrige del af tiden.

Det energinetralt byggeri designes altid med et meget lavt

energibehov, der kan inddeles i følgende kategorier:

- **Bygningsrelateret**, dvs. til opvarmning, køling, ventilation, pumper og ventilatorer og andre tekniske serviceinstallationer
- **Brugerrelateret**, dvs. til madlavning, varmt brugsvand, belysning, husholdningsmaskiner, kontormaskiner osv.
- **Opførelse og vedligehold**, dvs. energiforbrug ifm. nye og udskiftede bygningsmaterialer og installationer over bygningens livscyklus, såvel som energiforbrug ved opførelse, vedligehold, renovering og nedbrydning af en bygning.

På baggrund af erfaringer fra nyere forskningsaktiviteter i Danmark og på internationalt niveau vil det være rimeligt at opstille følgende mål for energibehovet i energinetralt byggeri:

BYGNINGSRELATERET (BOLIG)

- Opvarmning 10-12 kWh/(m² a)
- Varmt brugsvand 10-13 kWh/(m² a)
- Elektricitet 5 kWh/(m² a)

BYGNINGSRELATERET (KONTOR)

- Opvarmning 4-5 kWh/(m² a)
- Varmt brugsvand 4-5 kWh/(m² a)
- Elektricitet 20 kWh/(m² a)

BRUGERRELATERET

- Elektricitet (kontor) 20 kWh/(m² a)
- Elektricitet (bolig) 20 kWh/(m² a)

OPFØRELSE OG VEDLIGEHOLD

- Nyopførelse, vedligehold, renovering og nedbrydning 25 kWh/(m² a) [Berggren et al. 2013]

Der findes i øjeblikket ingen standarddefinition på energinetralt byggeri. Fig. 2 angives et lille antal eksempler på typiske definitioner, som foreløbigt er i brug.

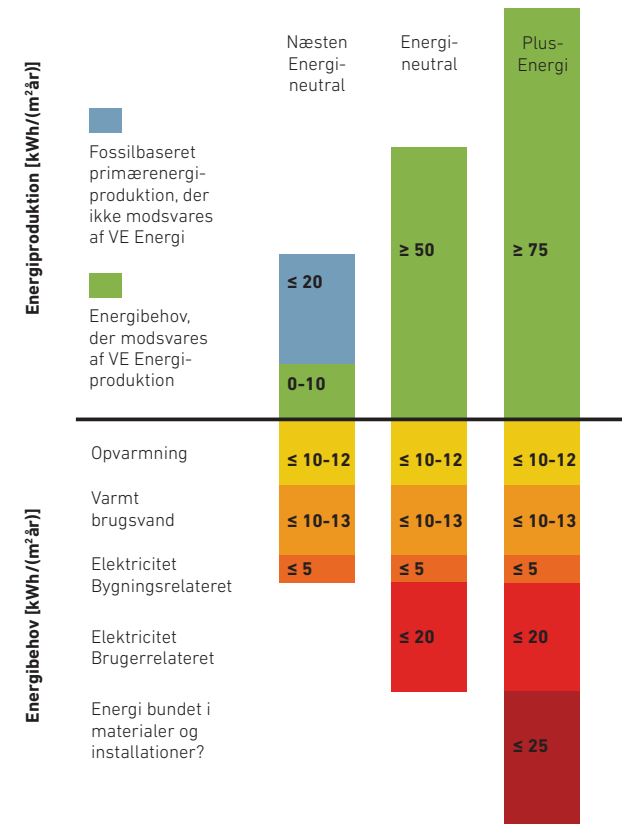


Fig. 2. Energinbalance for Næsten Energinetralt, Energinetralt og Plus-Energi. Til at udregne energibalancen for Næsten Energinetralt anvendes forskellige primærenergifaktorer, som afhænger af energikilden. Disse faktorer kan variere over tid, og man bør derfor orientere sig om de gældende regler.



ROLLE I FREMTIDENS

VEDVARENDE ENERGISYSTEM

INTEGRERET DEL AF ENERGISYSTEMET

12

Det bedste design af energineutralt byggeri kan kun opnås, hvis byggeriet ses i sammenhæng med det fremtidige energiforsyningssystem, hvori det forventes at indgå. Derfor har centrets forskningsbaserede analyse af det energineutrale byggeris fremtidige rolle taget udgangspunkt i en overordnet systemtilgang til fremtidens energiforsyning. Formålet har været at identificere og sætte tal på vigtige aspekter af det energineutrale byggeri i forhold til opfyldelsen af den danske regerings langsigtede plan for etablering af et fossilfrit energiforsyningssystem inden udgangen af 2050.

På baggrund af design- og analyseforslag til fremtidens 100% vedvarende energisystemer har centrets forskning fremhævet det energineutrale byggeris rolle og lagt vægt på følgende aspekter:

Energibehovet i både eksisterende og nyt byggeri skal nedsættes i forhold til det nuværende niveau. Energibesparelses tiltag i byggeriet er et vigtigt element i alle nyere planer for ændring af det nuværende energiforsyningssystem baseret på fossile brændstoffer til et fremtidigt energiforsyningssystem baseret på 100% vedvarende energi inden 2050. Centerets forskning konkluderer, at et passende mål vil være nedskæring af energibehovet i bygninger med 50% i gennemsnit i tidsrummet 2030-2050 [Lund 2014].

Det resterende varmebehov bør dækkes gennem en kombination af fjernvarmeforsyning i bymæssig bebyggelse og individuelle varmepumper i byggeri i ikke-bymæssige områder. I det overordnede perspektiv vil den bedste løsning være at kombinere en gradvis udvidelse af fjernvarmeforsyningen med individuelle varmepumper i de øvrige områder. I det langsigtede perspektiv med et energiforsyningssystem baseret 100% på vedvarende energi vil både fjernvarmesystemet og varmepumper bidrage til en øget effektivitet i det overordnede system, og med hensyn til pris er varmepumper omtrent på samme niveau

som fjernvarmeforsyning. Sidstnævnte er dog stærkt afhængig af afstanden til fjernvarmesystemets ledningsnet. Dette aspekt er også blevet undersøgt, og konklusionen er, at den optimale løsning ville være, at fjernvarmeforsyningen dækker ca. to tredjedele af varmebehovet, mens individuelle varmepumper dækker resten.

Ved gennemførelse af sådanne analyser er det Geografiske Informationssystem (GIS) værktøjer uundværlige. Et ph.d.-projekt [Nielsen 2014] har omhandlet videreudvikling og brug af en metode til bedømmelse af varmebehovet i et byggeri, reduktionspotentialer og udgifterne forbundet med gennemførelsen af disse reduktioner. Metoden, som kaldes et varmeatlas, anvender oplysninger fra det danske Bygnings- og Boligregister (BBR) til beregning af varmeforbruget i byggeri; disse oplysninger er baseret på oplysninger om byggeriets type, alder og anvendelse. Varmeatlassen giver oplysninger om den individuelle husstand. Eksempler på anvendelse af værktøjet er illustreret i de efterfølgende afsnit.

Et andet ph.d.-projekt [Marszal 2012, Lund et al. 2011] har undersøgt udvekslingen af elektricitet mellem ledningsnettet og det energineutrale byggeri. Konklusionen her er at en sådan udveksling kan være både negativ og positiv for energisystemet og derfor bør håndteres på integreret systemniveau. Derudover er der ofte både et element af udjævning af energiudvekslingen mellem individuelle bygninger og et element af stordriftsfordele. Af disse grunde bør ubalancer håndteres på systemniveau snarere end i den enkelte bygning. Typisk vil solcelleenergi på bygninger skabe en positiv ubalance, fordi solcellerne producerer om dagen, hvor elforbruget er højt og el-produktionen er dyr, mens vindenergi vil skabe en negativ ubalance, fordi vindkraft også producerer om natten, hvor el-forbruget er lavt og el-produktionen derfor relativt billig.



FREMTIDENS VARMEFORSYNING

13

Forskningsprojektet CEESA, som var finansieret af Det Strategiske Forskningsråd, fremlagde i 2011 et konkret forslag til, hvordan regeringens målsætning om etablering af et fossilfrit energiforsyningssystem inden udgangen af 2050 kan føres ud i praksis. CEESA var baseret på et tidligere forslag fremsat af Ingeniørforeningen i Danmark (IDA) i 2006.

På baggrund af CEESA-scenariet og ved brug af samme software, har centerets forskere analyseret og modelleret de marginale udgifter forbundet med varmeproduktion i et sådant fremtidigt bæredygtigt energiforsyningssystem. De marginale varmeudgifter er defineret ved omkostningen ved at forsyne et yderligere varmebehov i det samlede system og repræsenterer således omkostningen ved ikke at spare på bygningernes varmebehov. De marginale udgifter er fastsat for to niveauer af fjernvarme. Resultaterne fremgår af diagrammet, illustreret ved den grønne kurve (52% fjernvarmeandel) og den lilla kurve (66% fjernvarmeandel).

Som udgangspunkt medfører en nedgang i varmebehovet også en nedgang i de samlede udgifter til hele energiforsyningen. Men fordelen ved at spare en enkelt energienhed reduceres, efterhånden som et stigende antal besparelser gennemføres. Dette har at gøre med mængden af mulig kraftvarme og industriel overskudsvarme m.m. i det samlede system. Disse ressourcer er relativt billige, og når de er brugt, vil et eventuelt yderligere varmebehov efterhånden kræve et stigende antal varmepumper og/eller varmekedler foruden yderligere investeringer i produktionskapacitet. Desuden vil solenergi og geotermisk energi blive udnyttet bedre i forbindelse med lavenergibyggeri, som har en mere jævn fordeling af varmebehovet over året. I diagrammet sammenlignes de marginale udgifter til varmeproduktion med de marginale udgifter til en reduktion i varmebehovet. Her er det vigtigt at lægge mærke til, at investeringernes størrelse er stærkt afhængig af, om de energibesparende tiltag foretages i eksisterende byggeri, eller om der er

tale om yderligere investeringer i nyt eventuelt energineutralt byggeri. Hvad angår eksisterende byggeri, afhænger investeringerne af, om disse foretages alene med henblik på at reducere energibehovet, eller om de er en integreret del af et renoveringsarbejde, som alligevel skulle iværksættes. Diagrammet viser marginaludgifterne for alle tre typer byggeri. Eventuelle produktionsenheder i energineutralt byggeri (solcelle- eller soltermiske enheder) er inkluderet i produktionsudgifterne.

Som det fremgår af diagrammet findes den billigste løsning for hele systemet når det gennemsnitlige varmebehov per enhed i både eksisterende og nyt byggeri reduceres fra det aktuelle niveau på 120 kWh/m² til ca. 60 kWh/m² i 2050 (inkl. varmt brugsvand).

Den billigste måde at opnå denne reduktion på ca. 50% er ved at gennemføre besparelse i nybyggeri samt i eksisterende byggeri i forbindelse med at bygningerne renoveres alligevel. Gennemførelse af energibesparelser i bygninger, som ikke renoveres er dyre og bør undgås.

Det resterende varmebehov bør dækkes af en kombination af fjernvarme i bymæssig bebyggelse og individuelle varmepumper i ikke-bymæssig bebyggelse ved at kombinere en gradvis udvidelse af fjernvarmeforsyningen med individuelle varmepumper i de resterende områder. Den passende andel for fjernvarmeforsyningen afhænger af det gennemsnitlige varmebehov i byggeriet, og den optimale løsning synes at være en fjernvarmedækning på ca. to tredjedele, hvor varmepumper dækker resten. Som vist i diagrammet bør den nuværende fjernvarmeandel på 52% hæves til et niveau på ca. 2/3.

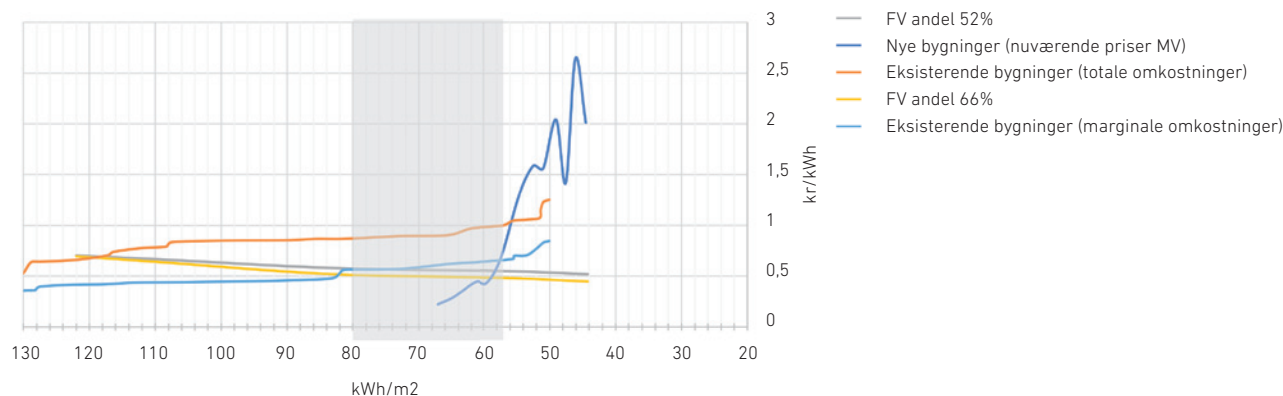


Fig. 3. Marginale udgifter til henholdsvis varmeproduktion og til reduktion af varmebehov [Lund et al. 2014].

GEOGRAFISK VARMEPLANLÆGNING

14

Energiforbrugets geografiske spredning er en vigtig faktor ved valg af forsyningsform og energiteknologi til et byggeri, da udgifterne til varmforsyning påvirkes af byggeriets beliggenhed. I nyere danske undersøgelser [Dyrelund et al. 2008] er der udviklet en metode til bedømmelse af varmebehovet i et byggeri samt for reduktionspotentialer og de udgifter, som er forbundet med sådanne reduktioner. Metoden kaldes et varmeatlas. Et af centerets ph.d.-projekter [Nielsen 2014] har videreudviklet metoden, som kan forbinde geografisk viden om et byggeri og dets varmforsyning med dets beliggenhed i det samlede energiforsyningsystem. Hovedfokus var på udvikling af værktøjer til det geografiske informationsystem GIS, til geografisk varmeplanlægning. Følgende eksempler illustrerer brugen.

EKSEMPEL GEOGRAFIENS BETYDNING

En god beliggenhed i forhold til fjernvarmeforsyningen er først og fremmest afhængig af, om der er et stort varmebehov i et bestemt område, kombineret med adgang til lokale varmeresourcer. Disse ressourcer er ofte baseret på spildvarme fra strømproduktion, affaldsforbrænding og industriproduktion og kan udnyttes til at sænke varmeprisen i områder med fjernvarme. Prisen på fjernvarme i områder med adgang til denne type ressourcer er ofte meget lavere end prisen på de individuelle alternativer som findes i det samme område.

Fig. 4 viser et eksempel på et fjernvarmeområde [Nielsen and Möller 2012a]. GIS-værktøjet baserer sig som udgangspunkt på de eksisterende fjernvarmeområder i Danmark samt på samfundsøkonomiske udgifter. Udgiften til varmeudregnes for hvert enkelt område på basis af de teknologier og brændstoffer, som aktuelt anvendes - her illustreret ved de grå områder. De røde og blå områder er ikke tilsluttet fjernvarme, så de udgør de potentielle områder. Hvorvidt det vil være rentabelt at forsyne disse områder med individuel opvarmning eller fjernvarme afhænger af den totale pris på fjernvarme, inklusiv

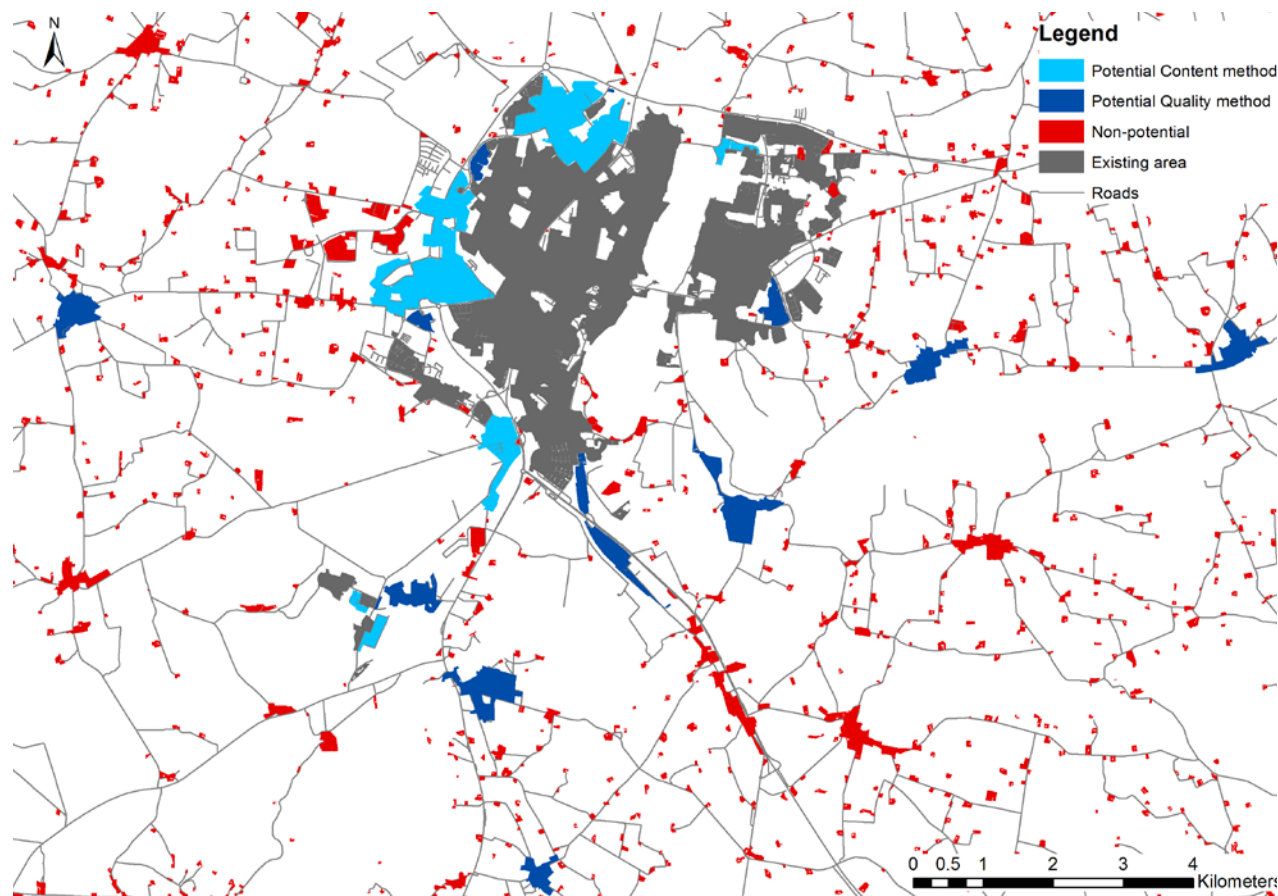


Fig. 4. Kort over fjernvarmepotentialet (eksempel fra Vi-borg).

etablering af forsyningsledninger til de potentielle områder, sammenlignet med prisen på individuel forsyning. GIS-værktøjet bruges til at udregne udgifterne og udpege de områder, hvor det vil være økonomisk rentabelt at etablere fjernvarme.

Modellen angiver således grænserne mellem individuel og kollektiv varmforsyning. I et varmforsyningsperspektiv kunne modellen udvides til at udpege fjernvarmeområder med et lavt primærenergiforbrug.

EKSEMPEL**ENERGINEUTRALT BYGGERI I FJERNVARMEOMRÅDER**

Energinetralt byggeri indbefatter produktion af vedvarende energi og kunne som eksempel være tilsluttet fjernvarmenettet og have solvarmepaneller på taget. Nyttetværdien af overskydende varmeproduktion fra energineutralt byggeri i forskellige typer af fjernvarmesystemer er undersøgt i centeret. Ved simulering af den overskydende varmeproduktion fra solvarmepaneller på energineutralt byggeri i typiske fjernvarmeområder i Danmark er det vist at overskydende varme i mange systemer kan bidrage til at sænke produktionen fra fossile brændstoffer og andre brændbare materialer som fx biomasse. Derudover er det i fjernvarmeområder, hvor varmebehovet i sommermånederne allerede dækkes af vedvarende energi, vigtigt også at indføre sæsonbestemt oplagring af varme for at udnytte produktionen fra det energineutrale byggeri [Nielsen and Möller 2012b]. Fig. 5 viser eksempelvis, hvordan det specifikke brændstofforbrug reduceres ved, at der opføres energineutralt byggeri i scenarie A1, indføres kollektiv solenergi sammen med opførelsen af energineutralt byggeri i A2, og ved at der indføres langtidslagring i A3. Den økonomiske rentabilitet er ikke undersøgt, og heller ikke brugen af solceller monteret på taget.

EKSEMPEL**VARMEBESPAESELSE I BYGGERI I FJERNVARMEOMRÅDER**

Et andet eksempel knytter sig til de mål, som den danske regering har sat for, at det danske samfund skal basere sig 100% på vedvarende energi i 2050. Et led i ændringen hen imod et vedvarende energiforsyningssystem er at iværksætte varmebesparelsetiltag i den eksisterende bygningsmasse. Det sker ofte, at rentabiliteten i varmebesparelser bedømmes på grundlag af kortsigtede beslutninger baseret på tilbagebetalingstiden for investeringer sammenlignet med den aktuelle varmepris. Herved opnås en lang tilbagebetalingstid på varmebesparende tiltag i en stor del af det byggeri i Danmark, der ligger i fjernvarmeområder med en lav varmepris. Ofte afspejles langtids-

udgifterne ikke i varmepriserne, og da varmebesparende tiltag er langsigtede, bør beslutningen baseres på langsigtet planlægning, som tager reinvesteringer i produktionskapacitet og distributionsudstyr i betragtning.

De langsigtede fordele er blevet undersøgt i centeret i et konkret tilfælde, nemlig fjernvarmeområdet Aarhus, hvor varmebesparelser på 50% indføres gradvist indtil år 2050. Resultaterne viser, at fordelene ved at indføre varmebesparende tiltag er store; især er besparelserne på brændstoffer og produktionskapacitet betydelige i Aarhus som konkret eksempel. Fig. 6

Specifikt brændselsforbrug

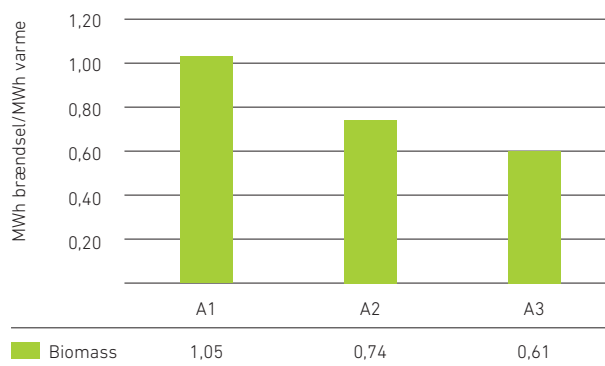


Fig. 5 Eksempel på scenarie A fra [Nielsen and Möller 2012b] der viser det specifikke brændselsforbrug med energineutralt byggeri i scenarie A1, kollektiv solenergi sammen med opførelsen af energineutralt byggeri i A2, og langtidslagring i A3

viser den aktuelle nettoværdiudregning, som sammenfatter alle disse besparelser. I "Ref"-scenariet iværksættes ingen energibesparende foranstaltninger, mens der i "Lavt-", "Medium-" og "Højt"-scenarierne indføres forskellige varmebesparende tiltag. Resultatet viser, at i alle scenarier med energibesparende tiltag er de økonomiske udgifter lavere end i referencescenariet. I andre fjernvarmeområder vil resultaterne være anderledes, afhængig af produktionsenhederne i det pågældende område, men i områder med dyre marginalproduktionsenheder ville det ofte være fordelagtigt at indføre varmebesparende foranstaltninger på længere sigt [Nielsen 2014].

Økonomiske udgifter

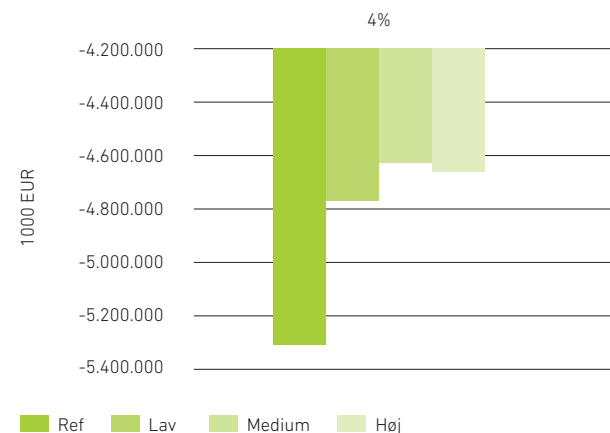


Fig. 6 Aktual nettoværdi fra 2016-2070 i fire scenarier med forskellige grad af varmebesparelser. I "Ref." implementeres ingen varmebesparelser, hvorimod der i "High" implementeres 50% besparelse i opvarmningsbehovet.

SAMSPIL MED ENERGISYSTEMET

16

For energineutralt byggeri vil kombinationen af et reduceret energibehov og varme- og elektricitetsproduktion på stedet for at opnå en neutral fossil energibalace medfører at der fra time til time vil være forskel mellem behov og produktion, og det må overvejes, hvordan denne forskel skal håndteres. Hvordan løser man for eksempel den udfordring, at et energineutralt byggeri udveksler meget store mængder elektricitet med det offentlige net? Bør byggeriet selv kompensere for behovet for udveksling af energi, eller bør udfordringen løses på et overordnet niveau?

EKSEMPEL

KVANTIFICERING AF ENERGIUD-VEKSLING

Centerets har i sin forskning kvantificeret behovet for udveksling via følgende fire typer energineutralt byggeri:

- PV ZEB: Energineutralt byggeri med et relativt lille behov for elektricitet og med solcelleinstallationer.
- Vind ZEB: Energineutralt byggeri med et relativt lille behov for elektricitet og med en lille vindmølle på egen grund.
- PV-Varme ZEB: Energineutralt byggeri med et relativt lille behov for varme og elektricitet og med solcelleinstallation i kombination med solfanger, varmepumpe og varmelagring.
- Vind-Varme ZEB: Energineutralt byggeri med et relativt lille behov for varme og elektricitet og med vindmølle i kombination med solfanger, varmepumpe og varmelagring.

Byggeriet "Bolig for livet" - et enfamilieshus opført i Lystrup ved Aarhus - blev brugt til at kvantificere forholdet mellem varme- og elektricitetsbehov. Dette beskrives mere detaljeret i et senere afsnit.

Huset har følgende energibehov på årsbasis:

- Varmt brugsvand: 18,3 kWh/m² (66 MJ/m²)
- Rumopvarmning: 15 kWh/m² (54 MJ/m²)
- Elektricitet til husets drift: 6,7 kWh/m²
- Elektricitet til husholdningen: 13,2 kWh/m²
- PV elektricitetsproduktion: 29,1 kWh/m²

- Solvarmeproduktion: 11 kWh/m² (40 MJ/m²)
- Varmepumpens produktion: 22,4 kWh/m² (81 MJ/m²)

På grundlag af ovenstående data er følgende forudsætninger opstillet for "PV-Varme ZEB":

- Varmebehov: 6,3 MWh/år,
- Elektricitetsbehov: 3,8 MWh/år,
- Solvarme: 2,1 MWh/år,
- PV produktion: 5,5 MWh/år,
- Varmepumpe: konverterer 1,7 MWh/år til 4,2 MWhth, dvs. med et COP på 2,5.

Derudover inkluderes varmelagringskapacitet på 17 kWh, svarende til en dags gennemsnitligt varmebehov, for at udligne variationerne i forbrug af varmt vand og solvarmeproduktion.

PV-Solar Thermal-Heat Pump

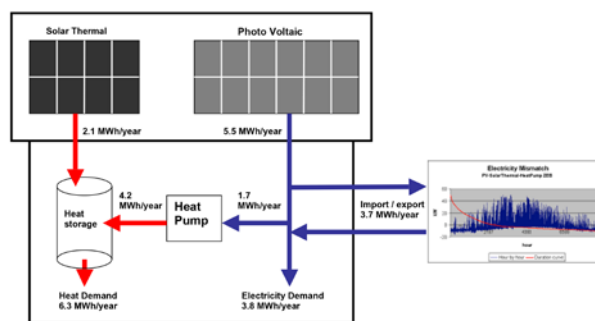


Fig. 7. Principdiagram for PV-Varme ZEB med et forventeligt årligt netto-varme- og elektricitetsbehov på nul, men med en betydelig udveksling af elektricitet. Elektricitetsudvekslingen udgør ca. 2/3 af produktionen og er beregnet som det gennemsnitlige bidrag fra en energineutral bygning på det samlede niveau.

De samme tal anvendes for Vind-Varme ZEB, hvor PV-produktionen blot erstattes med en vindmølle. Det kunne være en lille

vindmølle på egen grund eller en andel i en større vindmølle, afhængig af den anvendte definition på energineutralt byggeri. Energifordeling for disse to typer energineutralt byggeri er opstillet i figur 7 og 8. De øvrige to typer, dvs. PV ZEB og Vind ZEB, er baserede på de samme tal, eksklusiv varmebehov, dvs. et elektricitetsbehov på 3,8 MWh/år og en tilsvarende solcelle- eller vindproduktion.

Wind-Solar Thermal-Heat Pump ZEB

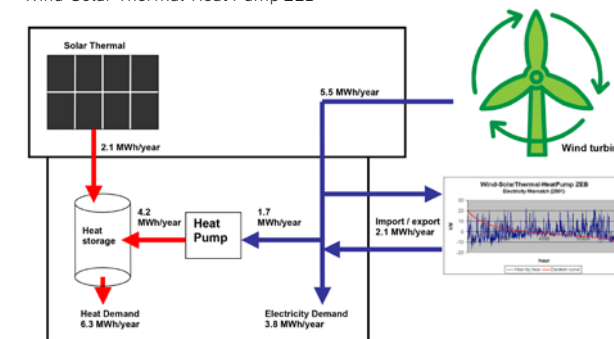


Fig. 8. Principdiagram for Vind-Varme ZEB med et forventet årligt netto-varme- og elektricitetsbehov på nul, men med en betydelig udveksling af elektricitet. Elektricitetsudvekslingen udgør ca. 40% af produktionen og er beregnet som det gennemsnitlige bidrag fra en energineutral bygning.

EKSEMPEL

TILTAG TIL OPTIMERING AF UDVEKSLING

Tiltag på bygningsniveau kunne bestå i enten fleksibel efterspørgsel eller energilagring. En optimering af det samlede energiforsyningsystem forudsætter, at udveksling ikke håndteres på individuelt bygningsniveau, men på et mere overordnet niveau således at risikoen for suboptimering minimeres.

I forhold til energilagring er en løsning på bygnings niveau ikke økonomisk rentabel sammenlignet med lagring på et overordnet niveau. På energisystemniveau kan den samme indregu-

lering af vindkraftt også gøres til en lavere pris, for eksempel ved ændring af reguleringen af eksisterende små CHP-anlæg; ved indførelse af meget store varmepumper i eksisterende CHP anlæg og i fjernvarmeforsyningen; ved brug af elektricitet i transportsektoren; eller ligefrem ved indførelse af elektricitetslagringssystemer som fx Com pressed Air Energy Storage (CAES). Der kan således spares penge ved at håndtere disse problematikker på et overordnet niveau.

“Fleksibel efterspørgsel” bør indføres på bygningsniveau, men ikke med det formål at udligne behovet for udveksling i den individuelle bygning. I stedet bør “fleksibel efterspørgsel” stræbe efter at bidrage til at kompensere for mange bygningers samlede udveksling på systemniveau. Den individuelle bygningens indflydelse udlignes på det overordnede niveau. Dette kan sammenlignes med designet i et strømforsyningssystem. Kraftværker designes ikke til at kunne imødekomme behovet hos et antal forbrugere ganget med den enkelte forbrugers maksimumforbrug. Hvis det var tilfældet, ville der ske en stor overinvestering i forsyningsledninger og kraftværker. Det samme gør sig gældende for differencer, som opstår som følge af ændringer i elektricitets efterspørgsel og PV eller vindenergiproduktion på individuelt bygningsniveau. Udvekslingen med en bygning kompenseres delvist af udvekslinger med andre bygninger, og forsøg på at kompensere for hver enkelt bygningens behov vil medføre situationer, hvor der i den ene bygning oplades et batteri, samtidig med at der i en anden bygning aflades et batteri, hvilket blot vil medføre unødvendige tab og betydelig overinvestering og ineffektiv systemdrift. Det er imidlertid det, der sker i fx Tyskland, hvor der pga. specielle feed-in tariffer for egetforbrug af PV-elektricitet installeres individuelle batterier.

Man risikerer også at øge problemet. Dette er for eksempel illustreret ved den blå kurve i fig. 9 og 10, som viser variationen i elektricitetsbehovet i Vestdanmark i en uge i februar 2001. Som det fremgår, er elektricitetsforbruget højt i dagtimerne og

lavt om natten og i weekenderne. Ud fra en elektricitetsforsyningsbetragtning er en udveksling, som sænker behovet om natten og hæver det om dagen, negativ, da den vil hæve behovet for strømforsyningskapacitet såvel som produktionen fra dyre kraftværker i spidsbelastningsperioder og kun spare på produktionen fra mindre dyre enheder i grundbelastningsperioder. Af samme grund skaber udveksling, der resulterer i det modsatte, en positiv effekt for systemet. Derfor bør udveksling med energineutralt byggeri ikke nødvendigvis fjernes, og hvis investeringer i fleksible behovs- og langringssystemer foretages på bygningsniveau for at minimere udvekslingen, vil dette blot gøre situationen værre.

Fig. 9 og 10 sammenligner udvekslingen af strøm for henholdsvis PV ZEB og Vind ZEB, med et årligt elektricitetsbehov på 3,8 MWh. Udvekslingen er vist på det overordnede niveau og repræsenterer ca. 1 million energineutrale bygninger. Forskellen mellem bygningernes elektricitetsbehov og PV-produktion resulterer generelt i en positiv udveksling for systemet, fordi solcellerne producerer om dagen, hvor el-forbruget er højt og el-produktionen er dyr, mens vindenergi vil skabe en negativ ubalance, fordi vindkraft også producerer om natten hvor el-forbruget er lavt og el-produktionen derfor relativt billig. Denne diskussion tager dog ikke højde for mulige begrænsninger i det lokale forsyningsnet, som kan medføre at der er behov for en mere lokal udligning mellem produktion og behov.

Eksemplet illustrerer, hvor vigtigt det er at design og drift af energineutralt byggeri sker i sammenhæng med det overordnede energiforsyningssystem for sikre den mest effektive og mindst kostbare integration af kombinerede tiltag for energieffektivitet og vedvarende energi. Hvis denne integration håndteres uden at tage det generelle energiforsyningssystem i betragtning, er det sandsynligt, at dette fører til overinvesteringer og ineffektiv drift på det individuelle bygningsplan, såvel som i det generelle system totalt set.

Electricity demand and the mismatch of approx. 1 million PV-ZEB (19-25 February 2001)

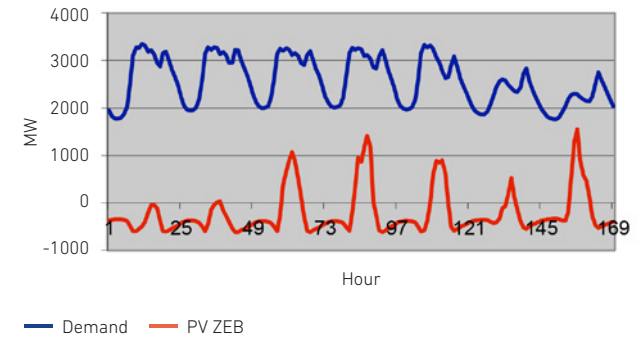


Fig. 9. Udvekslingen af strøm fra ca. 1 million PV ZEB, sammenlignet med timeudsving i elektricitetsbehovet i Vestdanmark i februar 2001 [Lund et al. 2011]

Electricity demand and the mismatch of approx. 1 million Wind-ZEB (19-25 February 2001)

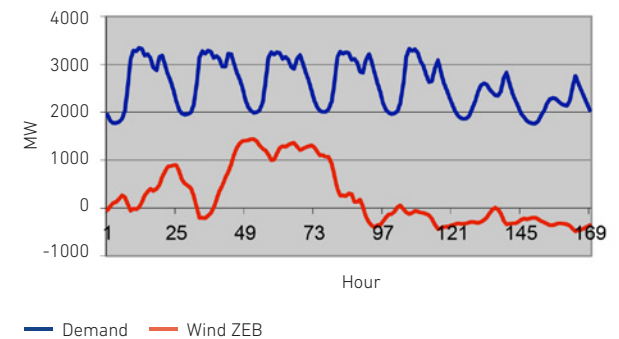


Fig. 10. Misforholdet på ca. 1 million energineutrale bygninger sammenlignet med timeudsving i elektricitetsbehovet i Vestdanmark i februar 2001 [Lund et al. 2011]



ROLLE I FREMTIDIG

UDVIKLING AF BYGGERIET

ROLLE I FORHOLD TIL BYGGERIETS UDFORDRINGER

20

Energineutralt byggeris rolle i samfundet er at reducere den relativt store andel af det totale energiforbrug, som er et resultat af byggeri og bygningsdrift.

Energibesparelser i byggeriet er fordelagtige og nødvendige for omlægningen af de nuværende energisystemer til fossilfri energisystemer, både i forhold til reducerede investeringer i og forbedret drift af bygningens varmforsyningssystem og af de øvrige vedvarende energiforsyningssystemer. Behovet for forbedrede energiforhold i bygninger og opnåelse af nødvendige energibesparelser medfører stigende omkostninger til bygningens klimaskærm, vinduer og tekniske installationer. Dette kan der kompenseres for ved at udvikle nye løsninger, som kombinerer forbedringer i både energidnyttelse og holdbarhed.

I energineutralt byggeri bliver energiforbruget og de vedvarende energiforsyningssystemer relativt set mere følsomme over for funktionsfejl, som er forårsaget af fejl i design-, konstruktions- og driftsprocesserne. Derfor kan indførelsen af energineutralt byggeri med fordel kombineres med større grad af industrialisering af byggesektoren. En sådan omstilling af byggesektoren kunne have en meget stor positiv effekt for både samfundet og forbrugerne. Bygningernes kvalitet kan forbedres og dokumenteres gennem kontrol, hvis produktionen af byggeriet i højere grad er industrialiseret.

Energibesparende design og teknologi forbedrer også ofte indeklimaet i en bygning. Energineutralt byggeri kan på denne måde spille en positiv rolle i forhold til brugerne af byggeriet såvel som for samfundet.

Disse potentielle fordele for samfundet, som det energineutrale byggeri giver beskrives kort og illustreres med eksempler i det følgende.



INVESTERINGER I VEDVARENDE ENERGI

I omstillingen fra energiforsyningssystemer baseret på fossilt brændstof til fossilfrie vedvarende energiforsyningssystemer, er det nødvendigt med store investeringer i produktions- og distributionssystemerne. Behovet for elektricitet og varme i spidsbelastningsperioder i samfundet er bestemmende for størrelsen af og udgifterne til de nye vedvarende energiforsyningssystemer. I energineutralt byggeri vil udgifterne til rumopvarmning være meget lave. Derfor kan de ekstra udgifter forbundet med energineutralt byggeri måske modsvares af lavere investeringer i nye vedvarende energiforsyningssystemer.

I områder med fjernvarme vil fossilt brændstof og biomasse blive afløst af jordvarmeanlæg og centrale solvarmesystemer, så vel som af andre nye varmekilder. I områder uden fjernvarme kan byggeriet opvarmes ved hjælp af varmepumper som drives af elektricitet baseret på vedvarende energikilder. I begge områder kan det eksisterende byggeri energireoveres eller erstattes af nyt energineutralt byggeri forud for investeringerne i det fuldt udbyggede fossilfrie energiforsyningssystem. Herved muliggøres en reduktion i investeringerne til de nye vedvarende energisystemer.

EKSEMPEL VALG AF VARMEFORSYNING

Et af centerets ph.d.-projekter [Nielsen, 2014] har forsket i indflydelsen fra energibesparende tiltag på fjernvarmeforsyningens udbredelse. Ved hjælp af GIS har man analyseret de samfundsøkonomiske udgifter forbundet med enten fjernvarmeforsyning eller varmepumper til eksisterende boligområder overalt i Danmark. Fig. 11 viser et eksempel på analysens resultater på et kort over den nordlige del af Sjælland. Kortet viser, at i de røde områder er udgifterne til varmepumper lavest, mens det i de orange områder er fjernvarme, som er mindst omkostningstung, udregnet efter det nuværende varmebehov. Hvis varmebehovet reduceres til omkring niveauet for næsten energineutralt byggeri, vil fjernvarme fortsat være rentabelt i

de grønne områder.

Når fjernvarme er den bedste mulighed i hovedparten af disse områder, beror det på adskillige faktorer, hvoraf de vigtigste er de lave produktionsomkostninger for varme samt den høje bebyggelsestæthed. Analysen er baseret på den nuværende fjernvarmeforsyning og ikke den fremtidige fjernvarmeforsyning med lavere temperaturer med brug af flere vedvarende energikilder; denne kunne også gøre det rentabelt at introducere fjernvarme i nogle af de røde og orange områder.

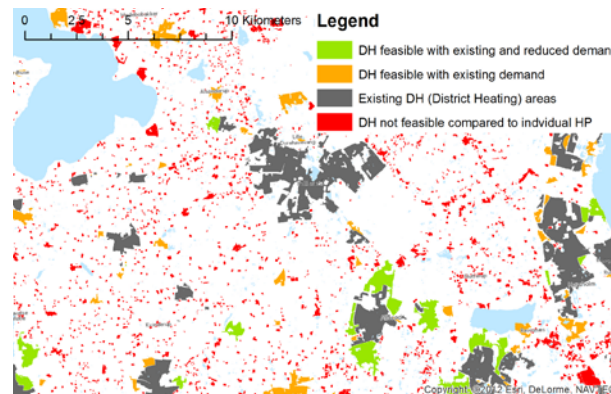


Fig. 11. Fordeling af varmeforsyningsløsninger i forhold til samfundsøkonomiske udgifter [Nielsen 2014].

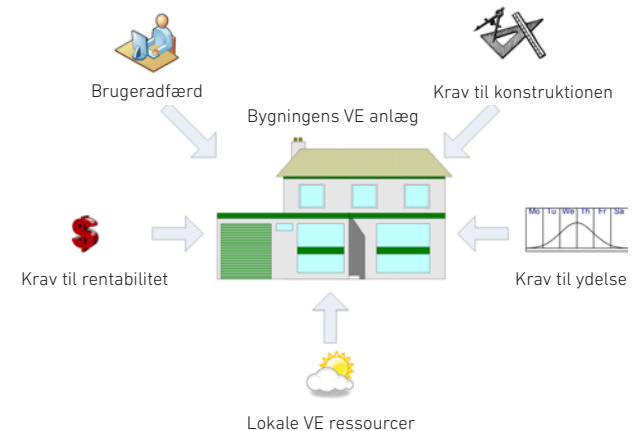
EKSEMPEL OPTIMAL VEDVARENDE ENERGISYSTEM FOR BOLIGER

I et andet ph.d.-projekt [Milan, 2014] er der udviklet en metode til design af den økonomisk set mest optimale vedvarende energiforsyningsløsning for energineutrale boliger.

I forhold til dagens fossile energiforsyningsløsninger, der typisk er baseret på en energikilde, må vedvarende energiløsninger

til energineutralt byggeri ofte baseres på en række forskellige kilder, som solstråling, vind, biomasse, osv. Tillige er kilderne meget varierende i tid, hvilket der må tages hensyn til både i forhold til at kunne matche bygningens behov, men også i forhold til udveksling af energi med energiforsyningsnettet. Udvekslingen skal på årsbasis være i balance, men den eksporterede energi skal også have en kvalitet svarende til det leverede og kunne håndteres i energiforsyningsnettet. Også de økonomiske forhold er væsentligt forskellige for vedvarende energiløsninger, hvor investeringsomkostningerne ofte er høje, mens de årlige driftsomkostninger (inkl. brændsel) er meget lave.

Alle disse forhold skal tages i betragtning i udviklingen af den optimale vedvarende energiløsning for hver enkelt tilfælde, idet denne vil være afhængig af de lokale vedvarende energikilder, af energiforbrugsprofilen og bygningens udformning og af de økonomiske muligheder og begrænsninger.



FORBEDRING AF BYGNINGENS DRIFT

22

Et meget lille behov for rumopvarmning gør det muligt at bruge meget lave temperaturer i opvarmningssystemet, hvilket er en fordel for styringen af de gulvvarmesystemer, som almindeligvis bruges i boligbyggeri. Denne kan gøres selvkontrollerende ved brug af vandtemperaturer, som ligger nogle få grader over rumtemperaturen.

Muligheden for at opvarme byggeri ved hjælp af meget lave temperaturer er en betydelig fordel for fjernvarmesystemerne, da der vil ske et mindre varmetab fra ledningsnettet, og det vil være muligt at anvende spildvarme ned til 30°C. Det er også en fordel mht. varmepumpernes effektivitet.

Energiforbruget i byggeri har været domineret af forbruget til rumopvarmning, men i energineutrale byggerier kan behovet for rumopvarmning være lavere end energiforbruget til varmt brugsvand. Derfor bliver varmforsyningen til energineutralt byggeri mere ensartet hen over året. Dette er en stor fordel for driften af vedvarende energiforsyningssystemer, som derved bedre kan tilpasse produktionen af energi efter energiforbruget.

EKSEMPEL LAVTEMPERATUR FJERNVARME

I fjernvarmesystemer baseret på vedvarende energikilder skal forsyningstemperaturen reduceres, for både at tilgodese bygningernes fremtidige lavere energiforbrug og for at udnytte den øgede vedvarende energimængde, som bliver til rådighed ved en lavere temperatur.

Et af centerets ph.d.-projekter [Brand 2013] har fokuseret på mulighederne for forsyning af varmt brugsvand uden øget risiko for legionella bakterier eller tab af funktionalitet ved en forsyningstemperatur på 50°C/25°C.

Projektet har udviklet en løsning, der gør det muligt at opnå en

brugsvandstemperatur på 47°C ved 50°C forsyningstemperatur og med en tilhørende returtemperatur på 20°C, og at det er muligt at komme fra systemtomgang (ingen tapning over længere tid) til 40°C brugsvandstemperatur på 11 sekunder.

For at opnå tilstrækkelig afkøling er det foreslået, at fjernvarmevandet ledes igennem gulvvarmen på badeværelset, inden vandet ledes tilbage til fjernvarmeverket. Derved reduceres det termiske ledningstab. Yderligere reduceres ventetiden for det varme brugsvand, idet brugsvandstationen bliver forsynet med varmt fjernvarmevand også uden for perioder med tapning af varmt brugsvand.

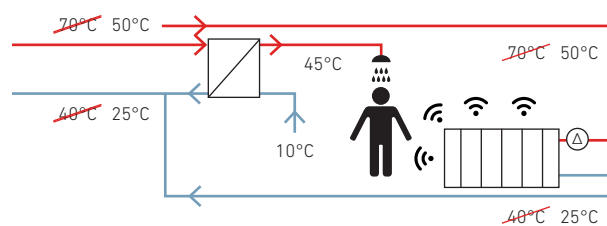


Fig 12. Koncept for produktion af varmt brugsvand ved lavtemperaturfjernvarme.

EKSEMPEL OPTIMAL STYRING AF VARMESYSTEM

I et andet ph.d.-projekt [Tahersima 2012] er der fokuseret på udvikling af avanceret styring af opvarmningssystemer til varmepumper både i forhold til sikring af optimal fremløbstemperatur og i forhold til varierende priser på elektricitetsmarkedet. Til sikring af den minimale fremløbstemperatur i varmesystemet blev der udviklet en 2-niveau hierarkisk styring, se fig. 13. Det er hypotesen, at den minimale fremløbstemperatur forekommer, når mindst en ventil er fuldt åben det meste af tiden. Det øverste niveau styrer den optimale fremløbstemperatur, mens det lavere styringsniveau kontrollerer rumtemperaturen.

En andel del af projektet fokuserede på at integrere hensyn til forventninger til vejret og elektricitetspriser i styringen. I dette tilfælde justerede det øverste niveau setpunktet for rumtemperatur inden for fastsatte grænser for gennem udnyttelse af bygningens termiske masse at flytte elektricitetsforbruget til det økonomisk mest fordelagtige tidspunkt. Denne styringsform er tillige meget vigtig i forhold til optimal udnyttelse af vedvarende energi i fremtiden smarte energisystem.

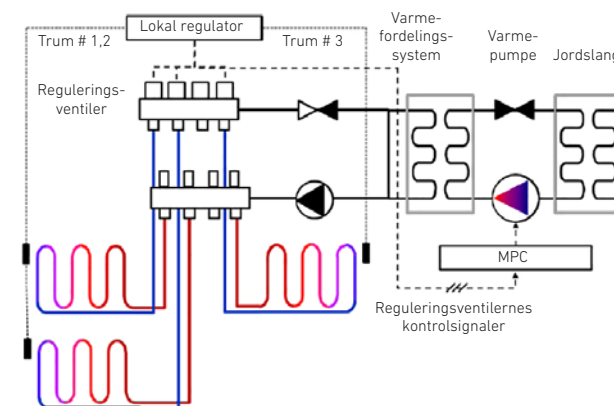


Fig. 13. 2-niveau hierarkisk styring til sikring af minimal fremløbstemperatur i varmesystem.

FORBEDRING AF INDEKLIMAET

Ubehag på grund af temperatursvingninger fjernes i energineutrale bygninger, fordi

- vinduers og klimaskærmes indendørs overfladetemperaturer ligger tæt på rumtemperaturen, og lokalt ubehag som følg af varmestråling på kolde overflader fjernes, og
- temperaturen på indstrømningsluften fra ventilationssystemer med meget effektiv varmegenvinding ligger tæt på rumtemperaturen, og træk forekommer ikke.

Meget fine dagslysforhold forekommer i energineutralt byggeri, fordi dagslysfaktorerne i rummene skal være høje for at spare energi til elektrisk belysning.

Der er mulighed for meget høj luftkvalitet på basis af høj ventilationsgrad i energineutralt byggeri, fordi mekaniske ventilationssystemer med effektiv varmegenvinding så vel som systemer med lavt tryktab og effektive ventilatorer er nødvendige for at reducere energiforbruget.

De akustiske forhold forbedres i energineutralt byggeri, idet støjgener via vinduer reduceres ved brug af tredobbelte termoruder. Støj fra ventilation reduceres også, fordi der anvendes lavtrykssystemer.

EKSEMPEL DYNAMISKE FACADER

I sammenligning med statiske facader kan velvære og energidnyttelse i kontorbygninger forbedres ved brug af dynamiske facader med de rigtige styringsstrategier. To ph.d.-projekter i centret har beskæftiget sig med dette emne [Winther 2012 og Liu 2014], idet de har brugt en eksisterende kontorbygning som udgangspunkt for deres undersøgelser.

Fig. 14 viser de tidsmæssige procentdele for de forskellige indeklimakategorier specificeret ifølge EN 15251. Den samlede tidsmæssige procentdel for velværekategori I og II blev øget fra

21% til 64% af de beboede timer gennem hensigtsmæssige styringsstrategier. Derudover blev kategori IV, som ikke anbefales, reduceret til 7% af brugstiden.

Energiforbruget blev samtidigt reduceret med mere end 60%, hvilket viser, at intelligent facadestyring på samme tid kan medføre både energibesparelser og et forbedret indeklima. Fig. 15 viser også, at det vil være umuligt at nå målsætningen i 2015 og 2020 for energibehov i kontorbyggeri uden brug af intelligent facadestyring.

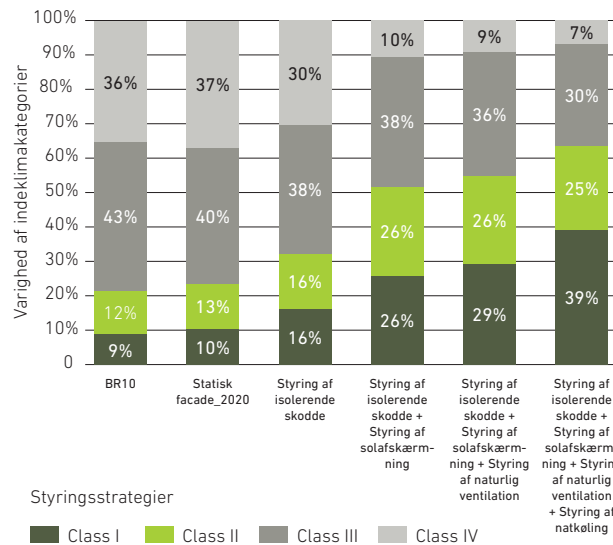


Fig. 14. Forskellige indeklimakategoriens procentvise andel ved forskellige styringsstrategier.

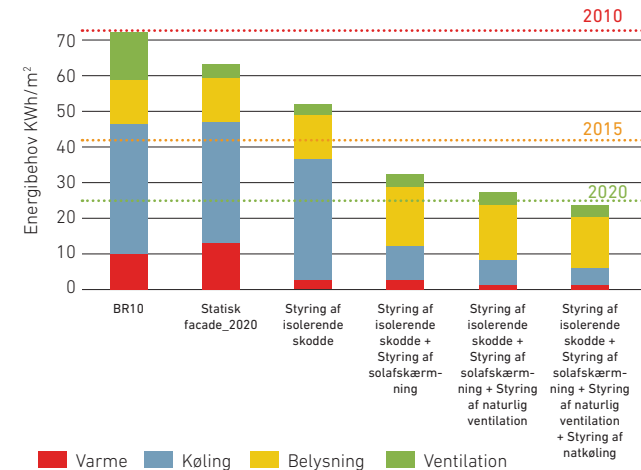


Fig. 15. Kontorbygningens energiforbrug ved forskellige styringsstrategier.

FORBEDRING AF BYGNINGENS HOLDBARHED

24

Efterhånden som der bliver brug for udvikling af klimaskærme, vinduer og byggeservicesystemer (HVAC-systemer) med forbedret energiudnyttelse til energineutralt byggeri, kan holdbarheden samtidig forbedres ved brug af nye løsninger, som er baseret på 'reparerbarhedsprincippet'.

For eksempel kan der i isoleringen i et fladt tag indbygges små luftkanaler, som muliggør fordampning af fugt i tilfælde af en utæthed, som opdages og udbedres. Herved er det endvidere muligt at undgå yderligere varmetab forårsaget af, at fugten breder sig i isolationsmaterialet.

Ikke-forseglede tredobbelte termoruder med brede luftmellemlerum kan muliggøre brug af effektive og vejrbeskyttede isolations-skodder og solafskærmning i luftmellemlerummen for at sænke varmebehovet om natten og behovet for afkøling om dagen. Men brugen af ikke-forseglede ruder forlænger også vinduernes holdbarhed, da problemer med utætheder i ruderne forsegling elimineres.

EKSEMPEL REPARERBAR TAGKONSTRUKTION

Et af centerets ph.d.-projekter [Lauritsen 2014] studerede en ny type konstruktion af flade tage baseret på 'reparerbarhedsprincippet'. Isolering med et system af 3 cm x 3 cm luftkanaler gjorde det muligt at opdage utætheder i taget ved at måle den relative luftfugtighed i kanalerne og udtørre fugten ved hjælp af luftstrøm. Denne konstruktion ses i en prøveopstilling i figuren til højre. Konceptet er med succes blevet afprøvet i to testbygninger.

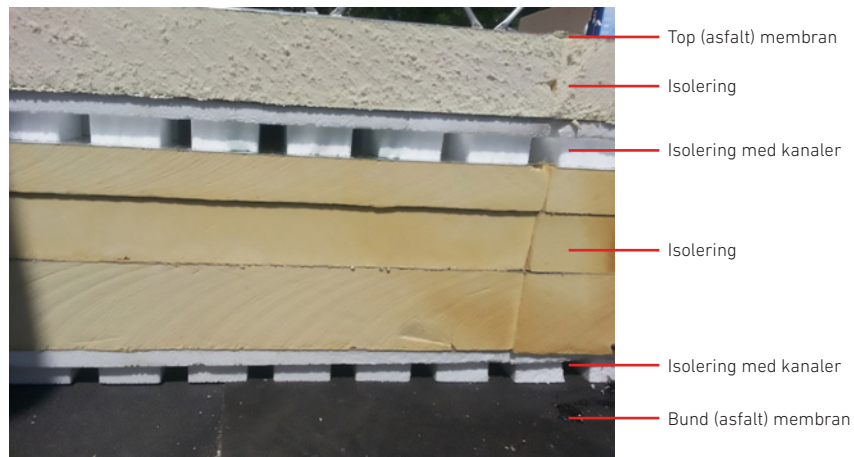
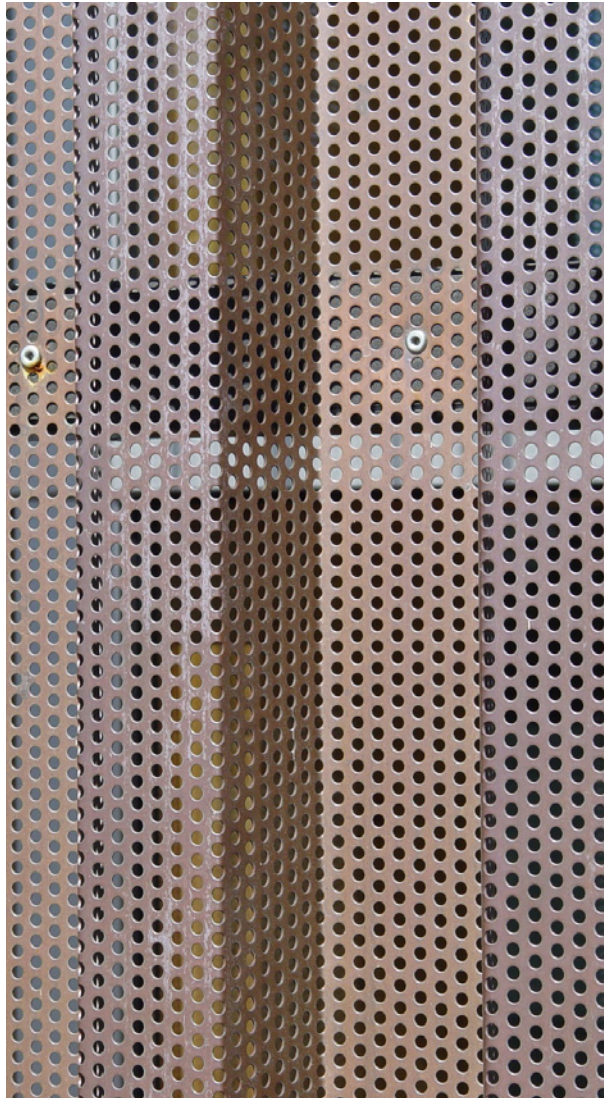


Fig. 16. Tværsnit i ny tagkonstruktion forberedt for reparerbarhed under anvendelse af små luftkanaler i isoleringen for detektering og udtørring af fugt.





ENERGINEUTRALT BYGGERI

BOLIG FOR LIVET

BOLIG BASERET PÅ AKTIVHUSPRINCIPPER

28

"Bolig for livet" er blandt den første generation af energineutrale boliger bygget i Danmark og er bygget efter Aktivhus principperne (www.activehouse.info), og dermed med fokus på at kombinere parametre som Energi, Miljø og Indeklima til en helhedsløsning.

Et aktivhus bidrager til en bæredygtig udvikling i forhold til:

- At skabe balance mellem energiforbrug og -produktion.
- Det liv der leves i huset, indeklima, funktion og sundhed.
- At skabe oplevelser i og omkring huset.

Byggeriet af 'Bolig for livet' har været et vigtigt skridt på vejen mod en ny vision for fremtidens byggerier, der har vist, at det er muligt at reducere CO₂-udslip gennem energieffektivisering og anvendelse af vedvarende energi - uden at gå på kompromis med indeklimaet.

"Bolig for livet" blev udviklet af VELUX-gruppen og VELFAC i samarbejde med aart-arkitekter og Esbensen Rådgivende Ingeniører. Boligen er på 190 m² i 1 ½ etage, stod færdig i 2009 og var i et år beboet af en testfamilie.

ENERGI

Energibehovet er søgt minimeret gennem optimering af bygningsdesign og gennem anvendelse af velisolerede konstruktioner med minimale kuldebroer. Størrelse og placering af vinduer er bestemt i forhold til solens position på himlen, i forhold til energioptimering og i forhold til beboernes behov. Tagudhæng mod syd skygger for den høje sommersonne og giver adgang for den lave vintersol. Boligens aktive facade med skodder og solgardiner regulerer efter behov varme, lysindfald og privathed. Afhængig af vinduestype kan optimale skodder og solgardiner reducere varmetabet i kolde vinternætter med op til 34%. Lysningspanelerne forbedrer linjetab samt formidler lyset langt ind i rummet. I vinterperioden sikrer et balanceret mekanisk ventilationssystem med effektiv varmegenvinding for frisk luft.

Om sommeren, hvor der er behov for både frisk luft og passiv køling, erstattes dette med naturlig ventilation, hvorved energiforbruget til ventilation kan reduceres betydeligt. Integreret intelligent styring minimerer energibehovet via styring af facader, lys, ventilation og varme.

I "Bolig for livet" produceres mere energi end der forbruges. Energibehovet til bygningens materialer, opførelse og drift dækkes af vedvarende energi:

- Solfangere producerer varmt brugsvand.
- En varmepumpe producerer rumvarme og supplerende varmt brugsvand.
- Solceller genererer strøm til boligen.
- Energioptimerede vinduer med lav U-værdi sikrer tilførsel af passiv solvarme.

Solfangerne udgør et areal på 6,7 m² og er placeret i nederste del af tagfladen. Solfangerne dækker 50-60% af den årlige brugsvandsopvarmning. Varmepumpeanlægget supplerer med den resterende del. Derudover anvendes solfangerne også som tilskud til rumopvarmningen. Varmepumpen optager energien fra den omgivende luft ved hjælp af et luftmodul, som er placeret uden for huset. Det installerede anlæg kombinerer energien fra solfangeren og udeluften og derved reduceres den samlede årlige driftsomkostning. Ca. 50% af rumvarmebehovet dækkes af passive solvarme. Den øvrige del leveres via en kombination af gulvvarme og radiatorvarme. Der anvendes gulvvarme i alle fællesrum og radiatorvarme i værelserne, således at varmen her hurtigt kan reguleres. Føringsveje er projekteret så korte som muligt af hensyn til tryk- og varmetab og vandet cirkuleres med energisparepumper. Samtidig anvendes lavest mulige fremløbstemperatur af hensyn til virkningsgrader på henholdsvis solvarme og varmepumpevarme, samt det lavest mulige varmetab i installationerne. Polykrystallinske solceller (50 m²) integreret i husets sydvendte tagflade dækker husets elforbrug til drift af tekniske installationer og husholdningssels.

MILJØ

Materialerne i huset er valgt med fokus på, at de skal belaste miljøet så lidt som muligt. Der er i høj grad brugt naturmaterialer, som er med til at skabe et godt indeklima samt robuste materialer, der kræver et minimum af vedligeholdelse og har en lang levetid.

INDEKLIMA

Komfort og indeklima optimeres gennem bygningsdesign med fokus på gode dagslysforhold, adgang til frisk luft, acceptable temperaturforhold, god kontakt mellem inde og ude, samt i forhold til valg af materialer og vedligehold.

I "Bolig for livet" er dagslysindtaget optimeret for at reducere brugen af elektrisk lys og er dobbelt så stort som i et typisk lavenergibyggeri. Vinduerne er placeret i alle fire facader samt i taget for at sikre et godt, naturligt lys. Vinduer og døre, der går til gulv, sikrer god kontakt mellem inde og ude og får rummene til at virke større, mens vinduer til loftet sammen med tagvinduerne sikrer dagslys langt ind i alle rum. Alle ovenlysvinduer har dynamiske solafskærmninger indvendigt og udvendigt.

Sensorer sikrer, at ventilationssystemerne ikke ventilerer mere end nødvendigt af hensyn til optimering af energiforbruget, men sikrer samtidig at en god luftkvalitet opretholdes. Bygningens intelligente facader sikrer sammen med varmeanlægget i vinterperioden og naturlig ventilation i sommerperioden acceptable temperaturforhold. I store perioder af året regulerer naturlig ventilation bygningens indeklima ved hjælp af styret luftskifte gennem vinduerne. Luftens bevægelse kan udnyttes optimalt, fordi alle rum har vinduer i mere end én retning, og der er højt til loftet i en del af boligen. Højden i boligen hjælper med til at skabe termisk opdrift med store energibesparelser til følge.



Foto: Adam Mørk

ENERGIKONCEPT

30

SOLFANGERE (AREAL: 6,7 M²).

- Solfangere dækker 50-60% af opvarmningen af varmt brugsvand, og bidrager samtidigt til forbedring af varmepumpens effektivitet.
- Varmt brugsvandsproduktion: 2,100 kWh/år (beregnet).
- Bidrag til varme produktion (varmepumpe): 4,200 kWh/år (beregnet).

SOLVARMEPUMPE

- Høj effektiv solvarmepumpe udnytter varme fra solfangerne selv i koldt og overskyet vejr og leverer varmt vand til gulvvarmesystemet.
- Energiproduktion: 4,200 kWh/år (beregnet).

GULVVARME

- Gulvvarmesystem opvarmer huset med varmt vand fra solvarmepumpen.

VARMT VANDSTANK

- Lagrer opvarmet vand fra solfangere og varmepumpe, udjævner belastningsvariationer og leverer varmt vand til opvask, bad og gulvvarme.

SOLCELLER (AREAL: 50 M²)

- Et system af solceller (polykrystallinske) producerer elektricitet til tekniske installationer (varmepumpe, ventilation, pumper, osv.), husholdningsapparater og belysning.
- Solcelleproduktion: 5,500 kWh/år.
- Forbrug husholdning og lys: 2,700 kWh/år.

INDEKLIMASTYRING

- Et centraliseret automatisk styringssystem styrer huset med henblik på at minimere forbruget af elektricitet og varme. Systemet kontrollerer naturlig og mekanisk ventilation, indvendig og udvendig solafskærmning og sikrer at lyset slukker når rummet forlades.

OVENLYSVINDUER

- Ovenlysvinduerne har 3-lags super lavenergiruder og en U-værdi på $U = 1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Udformningen af inddækninger reducerer kuldebroer og sikrer tilførsel af dagslys langt ind i boligen.
- Ovenlysvinduer bruges også i forbindelse med naturlig ventilation.

FACADE VINDUER

- Facadevinduerne har slanke profiler og er med 3-lags super lavenergiruder og har en U-værdi på $U = 0.9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.
- Det totale vinduesareal i boligen svarer til ca. 40% af gulvarealet (mod typisk 20-25%).
- Facadevinduer bruges også i forbindelse med naturlig ventilation.
- Udformningen af inddækninger reducerer kuldebroer og sikrer tilførsel af dagslys langt ind i boligen.

SOLSTRÅLING I SOMMERPERIODEN

- Store udhæng mod syd afskærmer mod sommersolen midt på dagen og reducerer behovet for solafskærmning og køling.

SOLSTRÅLING I VINTERPERIODEN

- Omtrent 50% af rumvarmebehovet dækkes af passiv solvarme fra facadevinduer og ovenlys.

NATURLIG VENTILATION

- Naturlig ventilation tilfører frisk luft til boligen i hele sommerperioden og styres af sensorer for at sikre optimal drift.
- Anvendelsen af naturlig ventilation erstatter mekanisk ventilation en stor del af året og resulterer i betydelige energibesparelser.

MEKANISK VENTILATION MED VARMEGENVIN-DING

- Om vinteren tilføres frisk luft til boligen med et behovsstyret balanceret mekanisk ventilationssystem, der sikrer en

effektiv varmegenvinding af afkastluften.

- Luften tilføres rummene med lav hastighed for at undgå risiko for træk.

ISOLERING

- Isolering i vægge og tag er optimeret og kuldebroer minimerede.
- U-værdi ydervægge: $0.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (395 mm isolering)
- U-værdi tag: $0.07 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (540 mm isolering)
- U-værdi of terrændæk: $0.07 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (500 mm isolering)

INDVENDIG SOLAFSKÆRMNING

- Indvendig solafskærmning leverer bedre isolering om natten og muliggør udnyttelse af vinduernes varmetransmitterende egenskaber samtidig med at krav til visuel komfort og privathed opfyldes.

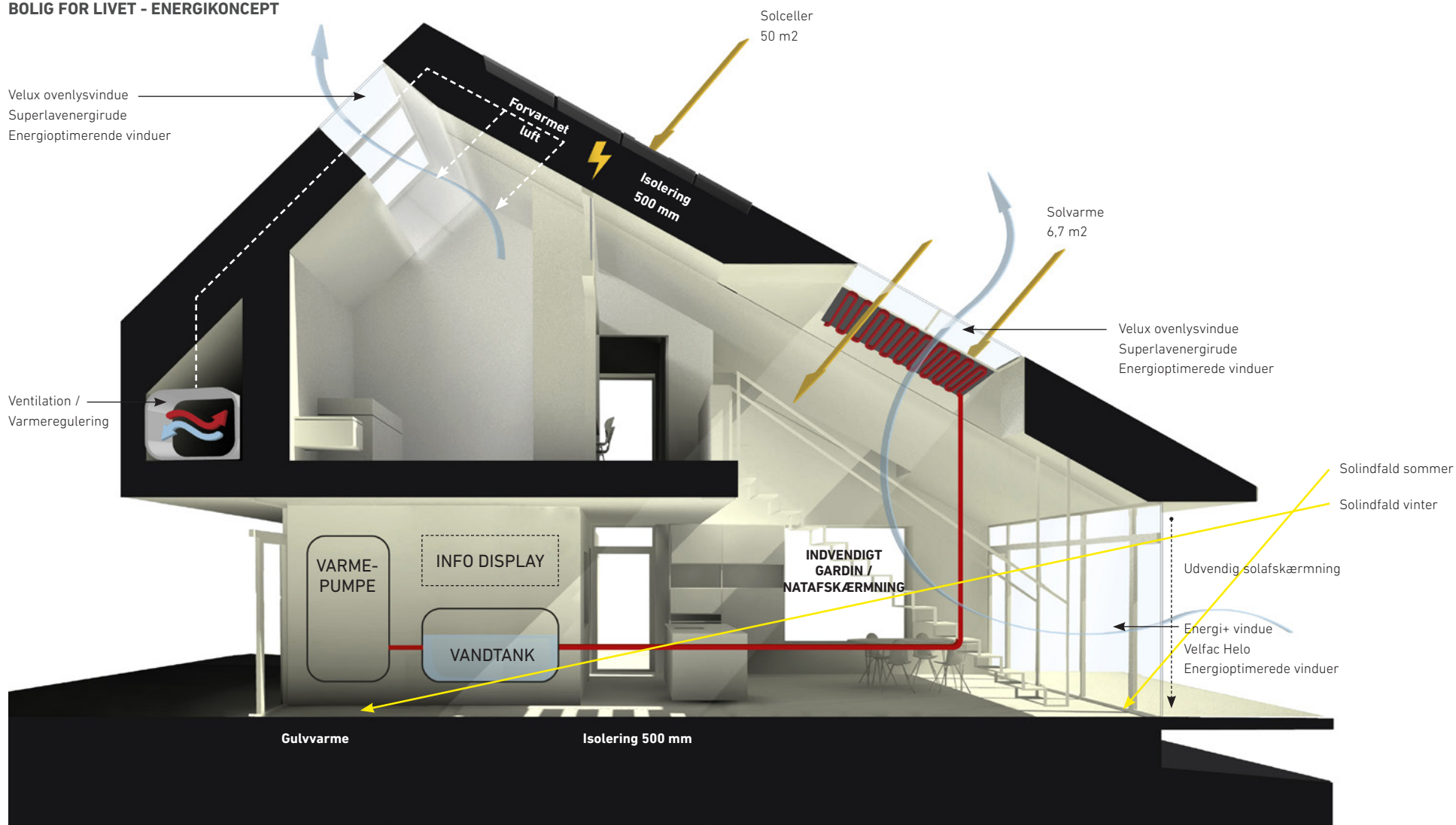
UDVENDIG SOLAFSKÆRMNING

- Den udvendige solafskærmning er en del af den aktive facade, som automatisk styrer lysindfald og varmetransport gennem vinduerne.
- Udvendig solafskærmning forhindrer passiv solvarme i at medføre overophedning af boligens opholdsrum.

UDFORMNING

- Husets arkitektur er baseret på en traditionel 1 ½ plans løsning med saddetag. En asymmetrisk rygning sikrer plads på den sydvendte tagflade til solceller, solfangere og ovenlys for optimal energiproduktion.

BOLIG FOR LIVET - ENERGIKONCEPT



ENERGIBALANCE

32

"Bolig for livet" er en energineutral bolig opført som en del af Model Home 2020-projektet. Boligen er projekteret til på årsbasis at producere mere vedvarende energi, end det forbruger. Det betyder, at energi til produktion af byggematerialer og opførelse (beregnet med Beat 2002) vil blive "tilbagebetalt" med den overskydende energiproduktion inden for en 30-50 årig periode. Grafen viser den projekterede energibalancel for "Bolig for livet" i leveret og produceret energi. Energooverskuddet er beregnet til 9,4 kWh/m²/år inkl. forventet el-forbrug til husholdning. Øvrige energiforbrug og energiproduktion er beregnet iht. det danske bygningsreglement.

Huset styres således, at el- og varmekonsumet minimeres. Om sommeren anvendes den automatisk styrede, naturlige ventilation til udluftning. I opvarmningssæsonen anvendes mekanisk ventilation med varmegenvinding.

Intelligent styring regulerer ud- og indvendige solafskærmninger og sørger for at optimere varme- og lysindtag samt slukker lyset, når rummet forlades.

I praksis vil energiforbruget ofte være anderledes end beregnet iht. bygningsreglementet - nogle forbrug vil være højere

og andre forbrug vil være mindre - og afhængig af familiens vaner og hverdagspraksis, af styrings-systemerne og af husets konstruktion.

Også i "Bolig for livet" var energiforbrugene anderledes end beregnet. For eksempel var familiens elektricitetsforbrug til lys og husholdning væsentligt lavere end forventet - 2 W/m² i stedet for 3,5 W/m² gulvareal.

På den anden side viste varmekonsumet sig at være væsentligt højere. Målinger og interviews med beboerne gjorde det muligt at identificere de væsentligste forklaringer på dette:

- Familien foretrak en lidt højere temperatur end forventet, og det betød, at den forudindstillede temperatur blev hævet fra 20°C til 23°C.
- Familien har ikke udnyttet potentialet for passive solvarme fuldt ud, da de ofte anvender solafskærmningen for at forhindre indkig fra forbipasserende.
- Familien har tilbragt mere tid end forventet i hjemmet på grund af en nye baby, hvorfor blandt andet natsenkning af temperaturen måtte fjernes.
- Produkterne og teknologien fungerede ikke optimalt fra begyndelsen. Det tager tid at justere systemerne, så de passer til huset og familiens behov.

Tilsvarende resultater er fundet i en række andre lavenergiboliger og det er vigtigt at disse erfaringer anvendes:

- I designfasen gennem anvendelse af mere realistiske forudsætninger ved projektering og beregning af forventet energiforbrug. Det gælder for eksempel valg af indetemperatur-niveau, hvor det er velkendt, at de fleste familier foretrækker 22-23°C i stedet for 20°C, og det gælder for eksempel anvendelse af solafskærmning, som af beboerne primært styres i forhold til opnåelse af komfort (privathed, undgå blænding, osv.) og ikke i forhold til optimering af energibehov.
- I opførelses- og driftsfasen, hvor det er afgørende ved idrift-

Energibehov og produktion

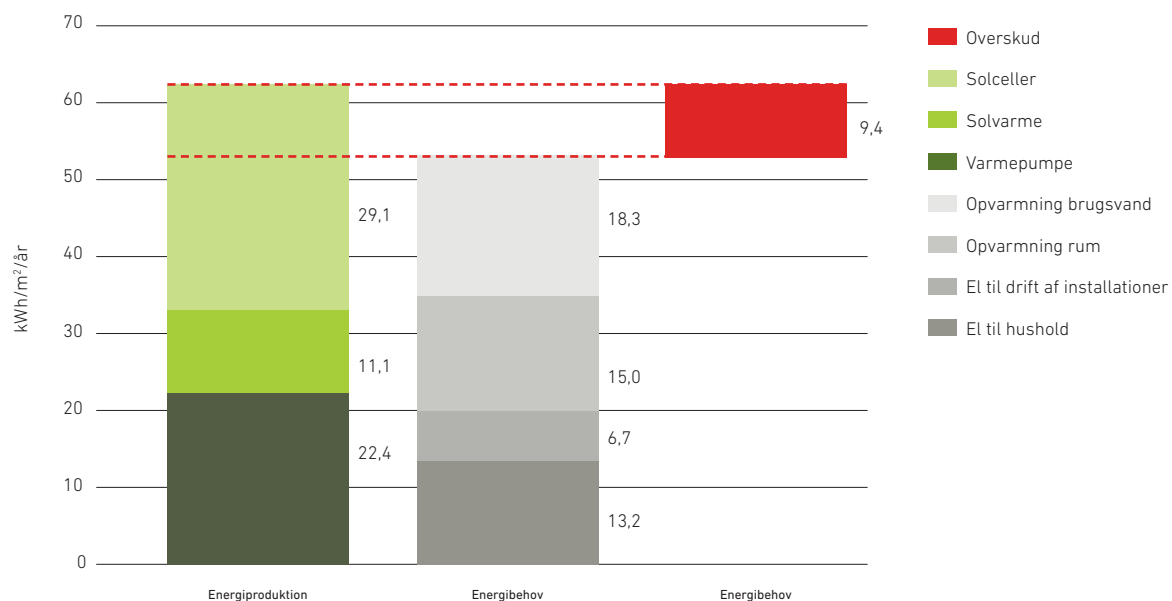


Fig. 17. Projekteret energibehov og -produktion i "Bolig for livet".

sætning at sikre optimal funktion af systemer og styring samt løbende i den første brugsperiode at tilpasse funktion, styring og drift i forhold til beboernes behov og ønsker.



INDEKLIMA

34

At give beboerne god komfort har været det vigtigste aspekt i "Bolig for livet". Fremtidens hus skal være rart at opholde sig i og omkring. Det må ikke være for varmt om sommeren og ikke for koldt om vinteren. Det skal være fleksibelt, så det giver plads til både fællesskab og til ro og fordybelse.

"Bolig for livet" er designet til at udnytte så megen passiv energi som muligt. Passiv energi i form af højt dagslysniveau, passiv varme fra solen samt ventilation og køling via termisk opdrift og vindpåvirkning af facaderne.

DEN AKTIVE FACADE

I "Bolig for livet" opnås en god komfort ved hjælp af den aktive facade. En aktiv facade:

- Der selv regulerer, hvor meget lys og varme der kommer ind gennem vinduerne.
- Der selv lufter ud, så der altid er et sundt og komfortabelt indeklima i huset.
- Der ændrer sig efter årstid og behov ved enten at være åben og dermed lukke lyset og varmen ind eller at være lukket for at skærme mod solen eller holde på varmen om natten.

OPVARMNING OG NEDKØLING

Temperaturen i de enkelte rum kan reguleres selvstændigt, så den tilpasses aktiviteten i rummet. Om sommeren kan huset selv afskærme for solen og lufte ud, så der ikke bliver for varmt indendørs.

VENTILATION

Om vinteren tilføres frisk luft via et mekaniske ventilationsanlæg med en effektiv varmegenvinding. Anlægget er behovsstyret, så det tilpasser sig de aktuelle ventilationsbehov i rummene. Luften indblæses i de "rene" rum (værelser og stue/opholdsrum) og udsuges i de "urene" rum (køkken, toiletter og bryggers). Træk i forbindelse med lufttilstrømningen fra det mekaniske ventilationsanlæg undgås ved at indblæse med

lave lufthastigheder i opholdszonen. Samtidig er der på ventilationsanlægget indbygget varmeflader, så indblæsning med utilsigtet kold luft undgås.

Om sommeren tilføres frisk luft gennem naturlig ventilation, der er styret af sensorer i huset, så der ikke ventileres mere end nødvendigt, og der samtidig opretholdes et godt indeklima. Hermed opnås en betydelig energibesparelse.

Luftindtag for den naturlige ventilation er placeret højt, så indtagsluften når at blande sig med rumluften, inden opholdszonen nås.

TERMISK INDEKLIMA I BOLIGEN

Fig. 18 viser det termiske indeklima i boligen gennem et helt år. En meget stor del af årets er den termiske komfort i den bedste kategori. I vinterperioden er der dage med lave temperaturer. Dog stiger temperaturen ofte i eftermiddagstimerne sandsynligvis på grund af passiv solvarme. I sommer perioden er der kun enkelte dage med høje temperaturer.

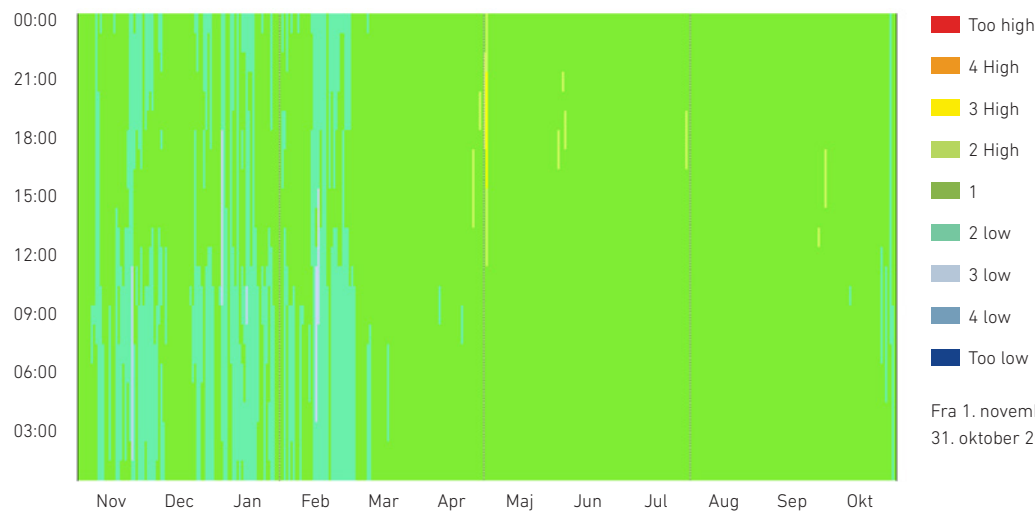


Fig. 18. Termisk indeklima for hver time gennem et år for køkken/alrum [Foldbjerg et al 2012].

Fig. 19 viser, at udluftning gennem vinduerne spiller en betydelig rolle i forhold til opretholdelse af komfort. Vinduerne holdes generelt lukket i vinterperioden og udluftning gennem disse er således ikke årsag til de lave temperaturer. I overgangsperioden er naturlig ventilation aktiv og vinduerne åbne en stor del af dagtimerne, mens de i sommerperioden næsten er åbne hele tiden og i mange nætter udnyttes muligheden for natkøling af boligen. Med undtagelse af nogle få perioder er det muligt at køle bygningen tilstrækkeligt med naturlig ventilation og opretholde komfortable temperaturer i sommerperioden.

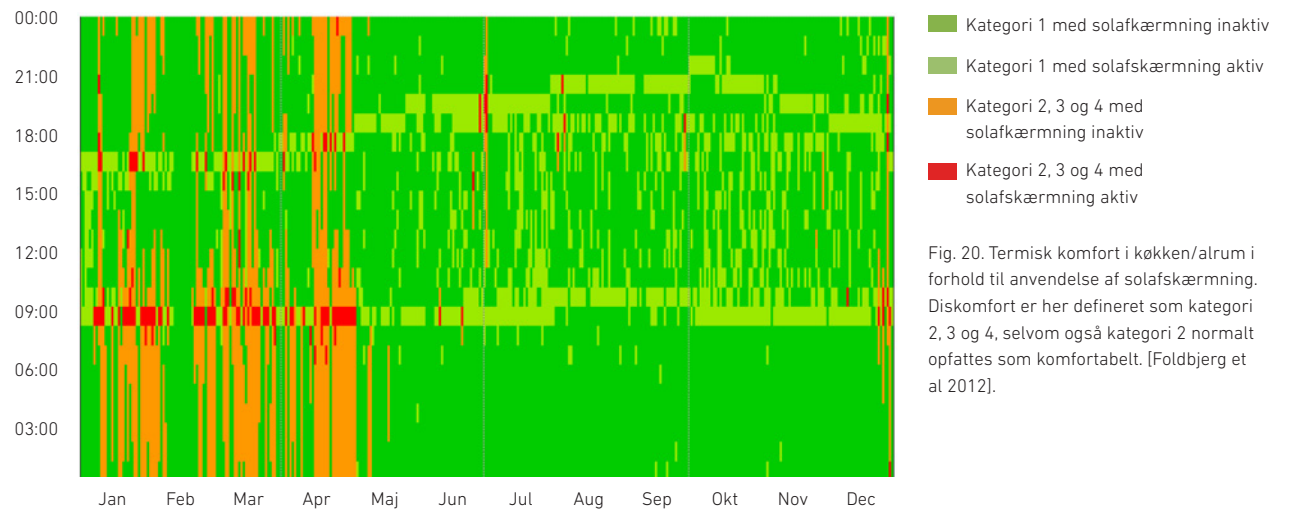
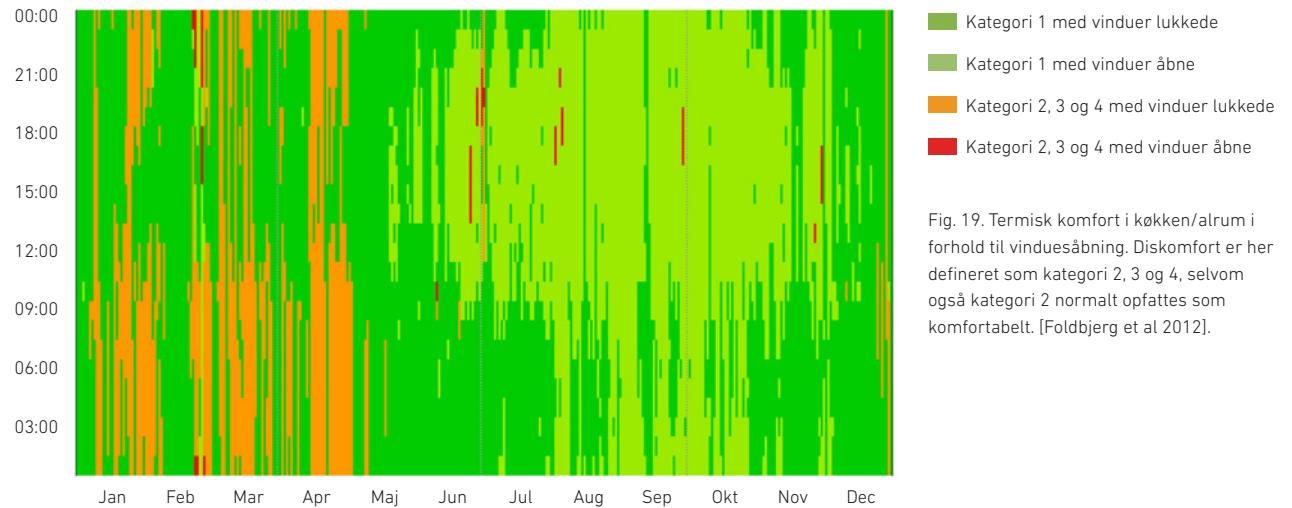
Fig. 20 viser anvendelse af solafskærmning i forhold til opnåelse af termisk komfort. Det ses at brugen af solafskærmning er størst i dagtimerne april til september, og solafskærmningen medvirker derfor til at opretholde en komfortabel temperatur. Desuden benyttes solafskærmningen til at forhindre blænding og sikre privathed.

FAMILIENS OPLEVELSE

Familien har nydt den store mængde dagslys, også i vinterperioden. Det betød, at de brugte mindre elektrisk lys i dagtimerne, dvs. mindre el-forbrug og at der således var et mindre bidrag derfra til den skønnede varmemængde.

Familien oplevede skiftet fra naturlig ventilation til mekanisk ventilation (i vinterperioden) som en mangel på frisk luft, hvorfor de af og til tilsidesatte det automatiske styringssystem og åbnede vinduerne selv.

Familien syntes, at det tog nogen tid at konfigurere styringen, for at få teknologi og styringssystem tilpasset til deres behov og ønsker.





REFERENCER



REFERENCER

38

PH.D. AFHANDLINGER (KAN DOWNLOADES FRA WWW.ZEB.AAU.DK)

Brand, M., 2014.

Heating and Domestic Hot Water Systems in Buildings Supplied by Low-Temperature District Heating. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Galiotto, N., 2014.

A Holistic Methodology for Sustainable Renovation towards Residential Net-Zero Energy Buildings. Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet.

Iqbal, A., 2014.

Calculation methods for natural ventilation through centrepivot roof windows. Statens Byggeforskningsinstitut. Aalborg Universitet, København.

Lauritsen, D., 2014.

Durability of future energy efficient building components. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Le Dréau, J., 2014.

Energy flow and thermal comfort in buildings - Comparison of radiant and air-based heating & cooling systems. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Liu, M., 2014.

Modelling and control of intelligent glazed façade. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Marszal, A.J., 2012.

Life cycle cost optimization of a BOLIG+ zero energy building. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Milan, C., 2014.

Choosing the right technologies - a model for cost optimized design of a renewable supply system for residential zero energy buildings. Institut for Energiteknik. Aalborg Universitet.

Mortensen, A., 2014.

Energy renovation of Danish single-family houses - An investigation of barriers and motivation factors. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Nielsen, S., 2014. Spatial Heat Planning and Heat Demand Reductions in Buildings. Institut for planlægning. Aalborg Universitet.

Pavlov, G., 2014.

Building Thermal Energy Storage. Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Tahersima, F., 2012.

An integrated control system for heating and indoor climate applications. Institut for Elektroniske Systemer, Aalborg Universitet.

Winther, F.V., 2012.

Intelligent glazed facades - an experimental study. Institut for Byggeri og Anlæg. Aalborg Universitet.

Olesen, G.G.H. 2014.

A Model Enquiry of Sustainable Homes - of Model Home 2020. Institut for Arkitektur og Medieteknologi, Aalborg Universitet.

PUBLIKATIONER FRA FORSLNINGSCENTERET

Lund, H. Marszal, A. Heiselberg, 2011.

P. Zero Energy Buildings and Mismatch Compensation Factors. Energy and Build-ings, Vol 43(7), pp. 1646-1654, July 2011.

Lund, H., 2010.

The Role of Sustainable Buildings in 100% Renewable Energy Systems. Proceeding from e-nova international congress 2010 Sustainable Buildings: Design - Operation - Evaluation. University of Applied Science Bur-ge-land, Pinkafeld 11-12 November 2010.

Nielsen, S., Möller, B. 2012a.

GIS Based Analysis Of Future District Heating Potential In Denmark, Conference paper for the 13th international symposium on district heating and cooling September 2012, Copenhagen, Denmark.

Nielsen, S., Möller, B. 2012b.

Excess heat production of future net zero energy buildings within district heating areas in Denmark, Energy, Volume 48, Issue 1, December 2012, Pages 23-31, ISSN 0360-5442, 10.1016/j.energy.2012.04.012.

Lund, H. et al, 2014.

Heat Saving Strategies in Sustainable Smart Energy Systems. Aalborg Universitet, Institut for planlægning. Publication Series 2014-1.

ANDRE PUBLIKATIONER

Berggren, B., Hall, M., Wall, M.

LCE Analysis of Buildings - Taking the Step Towards Net Zero Energy Buildings. Energy and Buildings 62 (2013), 381-391.

Dyrelund, A., Lund, H., Möller, B., Mathiesen, B.V., Fafner, K., Knudsen, S., Lykkemark, B., Ulbjerg, F., Laustsen, T.H., Larsen, J.M. & Holm, P. 2008. Varmeplan Danmark. Aalborg Universitet.

Foldbjerg, P., Worm, A., Asmussen, T., Feifer, L., 2012. Strategies for controlling thermal comfort in a Danish low energy building: System configuration and results from two years of measurements. AIVC Conference, København, oktober 2012.

Wittchen, K., 2004.

Vurdering af potentialet for varmebesparelser i eksisterende boliger. SBI Dokumentation 057, 2004.

