

# HVAD KAN RÅDGIVERBRANCHEN LÆRE AF SOLAR DECATHLON

BILAG TIL HOVEDRAPPORT

## INDHOLD

1	Indledning	1
2	Processen og konkurrencen	2
3	Beskrivelse af huset og anvendte teknologier	3
3.1	Konstruktioner	3
3.2	Vinduespartier	5
3.3	Termoaktive lette gulv- og loftkonstruktioner	6
3.4	Ventilation	7
3.5	PVT	7
3.6	Varmepumpe	8
3.7	Styring og automatik	9
4	Konklusioner og anbefalinger	10
5	Eksempler	11

## 1 Indledning

Dette notat er et bilag til hovedrapporten "Cradle to cradle Innovation Lab – Erfaringsopsamling", og tilsammen udgør disse COWIs bidrag til slutrapporteringen for PSO Elforsk-projektet 344-060 "Bæredygtige plus-energihuse". Notatet beskriver teknologierne, som er benyttet i Solar Decathlon-konkurrencen 2012, hvor DTU deltog med huset "FOLD".

Formålet med notatet er at vurdere, hvorvidt de anvendte teknologier kan benyttes

PROJEKTNR. A051439  
 DOKUMENTNR. -  
 VERSION 1  
 UDGIVELSESDATO 10.11.2014  
 UDARBEJDET MGCH  
 KONTROLLERET PEWE  
 GODKENDT RMH

i praksis og definere eventuelle udviklingsområder.

## 2 Processen og konkurrencen

DTU deltog i den europæiske udgave af Solar Decathlon konkurrencen i 2012 med huset "FOLD", som er blevet designet og projekteret af studerende fra flere ingeniørretninger på DTU, med en overvægt af retningen Bygningsdesign og Byggeteknologi. Ledelsen af projektet lå hos Bygningsdesign, som også forestod den arkitektoniske formgivning. Der deltog ligeledes en række industrielle partnere, som bidrog med sponsorater og donationer.

Konkurrencen, der blev afholdt i Madrid, er en årligt tilbagevendende dyst imellem en række universiteter i Europa om at designe og opføre en smuk og energirigtig bolig, der vurderes efter 10 forskellige parametre. Parametrene er:

- 1 Arkitektur
- 2 Energieffektivitet
- 3 Komfort
- 4 Kommunikation og social bevågenhed
- 5 Innovation
- 6 Konstruktion
- 7 Elforbrug og produktion
- 8 Funktionalitet
- 9 Urbant design, transport og omkostningseffektivitet
- 10 Bæredygtighed

Vinderen af konkurrencen er holdet med flest point samlet set. Parametre kan i øvrigt fungere som god inspiration for rådgivere i den indledende designfase til at sikre en holistisk tilgang til et givent projekt, sådan som flere bæredygtighedsværktøjer forsøger sig.

Huset på i alt 66,5 m<sup>2</sup> blev samlet og testet på DTU's område i forløbet op til konkurrencen og efterfølgende blev det skilt ad og transporteret til Madrid, hvor konkurrencen løb af stablen i to uger i september 2012. Herefter blev huset atter skilt ad og transporteret til Danmark, hvor det pga. uoverensstemmelser mellem projektdeltagerne stod opmagasineret i containere i en periode på 8 mdr.

Huset blev samlet igen på sin endelige destination ved Grundfos i Bjerringbro i sommeren 2013, hvor det har stået siden. En række målinger af bl.a. tæthed og energiforbrug er foretaget på denne placering.

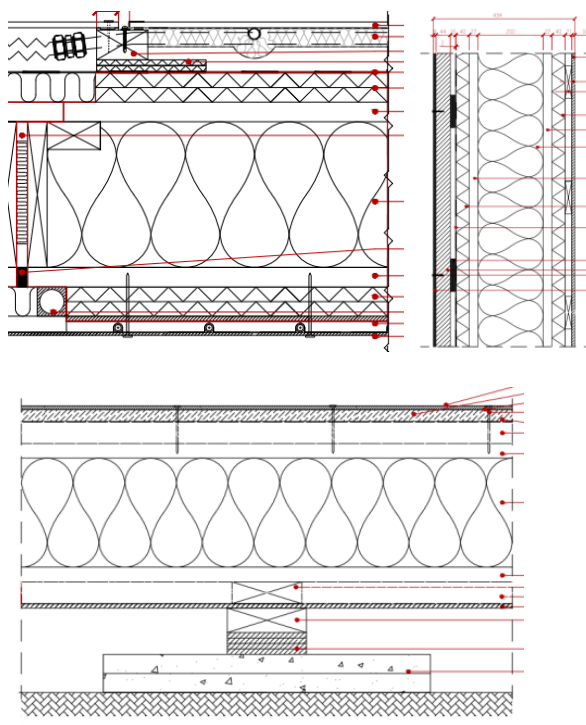
### 3 Beskrivelse af huset og anvendte teknologier

#### 3.1 Konstruktioner

##### Beskrivelse

For at kunne transportere FOLD til Madrid var det vigtigt, at have en let konstruktion for at gøre transporten så nem og miljøvenlig som mulig. Vægge, tag og terrændæk er opbygget som lette trækonstruktioner, med henblik på at holde vægten nede. Opbygningen er anderledes end traditionelle danske løsninger som f.eks. mursten og beton, men er dog kendt og anvendt på det danske marked.

En let konstruktion har den ulempe, at den termiske masse for huset er relativ lille, hvilket gør at huset ikke kan oplagre den samme mængde energi i bygningsdele, som en tung bygning kan. Dette resulterer i større temperaturvariationer, idet luften må optage en større del af energien fra eksterne og interne varmebelastninger.



Figur 1: Detaljetegninger af konstruktioner. Oppefra: tag, ydervæg, terrændæk.

##### Innovationselement

I konstruktionsopbygningen kombineres et traditionelt produkt med et nyt. Ydervægge, tag og terrændæk er opbygget af 200 mm almindelig Rockwool imellem et lag Aerowool på begge sider på hver 40 mm. Denne løsning giver i alt 280 mm svarende til ca. 340 mm almindelig isolering, hvilket giver en reduktion af konstruktionsstykkelsen på ca. 60 mm. Se Tabel 1 for materialetykkelser.

Tabel 1: Konstruktionsopbygning

Ydervæg		Terrændæk		Tag	
Materiale	Tykkelse, [mm]	Materiale	Tykkelse, [mm]	Materiale	Tykkelse, [mm]
Træbeklædning	9	Træbeklædning	12	Træbeklædning	9
Hulrum	30	Varmefordelingsplade	0,5	Varmefordelingsplade	0,3
Aerowool	40	Gulvvarmeplade	22	Loftvarmeplade	15
Kertoplade	27	Masonitplade	3	Krydsfiner	8
Rockwool flexsystem batts	200	Aerowool	40	Aerowool	40
Kertoplade	27	Kertoplade	27	Kertoplade	27
Aerowool	40	Rockwool flexsystem batts	200	Rockwool flexsystem batts	200
Hulrum	45	Kertoplade	27	Kertoplade	27
Rockpanel	8	Hulrum	40	Aerowool	40
		Aerowool	40	Rockpanel	8
		Krydsfiner	8		
I alt	426		419,5		374,3
I alt med almindelig isolering	485		478,5		433,3

## Erfaringer og videreanvendelse

Både ydervægge, tag og terrændæk har en lav U-værdi på 0,09 W/m<sup>2</sup>K, men stadig en relativ lille tykkelse på 374-426 mm. Det er dog en beregnet og ikke målt værdi. Siden huset er blevet skilt ad og samlet igen flere gange, er tætheden blevet meget dårlig jf. blower door-test i 2013, som viste et resultat på 4,5-5,6 l/s/m<sup>2</sup>, sammenlignet med kravene i BR10 for lavenergibyggeri på max. 1,0 l/s/m<sup>2</sup>.

Siden FOLD-huset blev bygget har Rockwool valgt at fjerne Aerowool fra markedet, da de vurderede, at produktet ikke kunne blive økonomisk bæredygtigt. Der er dog alternative kompaktiseringsprodukter såsom vakuumisolering og isoleringsplader i hårdt skum med varmeledningsevner på hhv. 0,007 og 0,02 W/mK.

Kompaktisolering er oplagt på steder, hvor der ikke er meget plads samt hvis man ønsker at bygge meget slanke konstruktioner, men hvis produkterne ikke efterspørges, så producerer producenterne dem ikke.

De lette trækonstruktioner har en lille termisk masse, og det vil være fordel for indeklimaet af have en tungere konstruktion, f.eks. af betonelementer. Her opstår et

klassisk dilemma: betonkonstruktioner er godt for indeklimaet og energiforbruget, men indeholder meget bunden energi. Trækonstruktioner giver et mere ustabil indeklima, der kræver mere regulering og energi, men indeholder meget lidt bunden energi og er derfor et bæredygtigt materiale. I den praktiske projektering vil det være et valg mellem at anvende lette eller tunge konstruktioner. Specifikt bør det bæredygtige element inkluderes i overvejelserne.

## 3.2 Vinduespartier

### Beskrivelse

Vinduesarealet i den ene ende af bygningen er 34,8 m<sup>2</sup> og 20,3 m<sup>2</sup> i den anden. Vinduespartierne går fra gulv til loft og er opbygget af en række små vinduer. De to vinduesfacader har en gennemsnitlig U-værdi på 1,04 W/m<sup>2</sup>K, hvoraf glasset har en U-værdi på 0,9 W/m<sup>2</sup>K. Der er ingen solafskærmning installeret.

Der er ét ovenlysvindue i huset på 0,74 m<sup>2</sup> med solafskærmning.

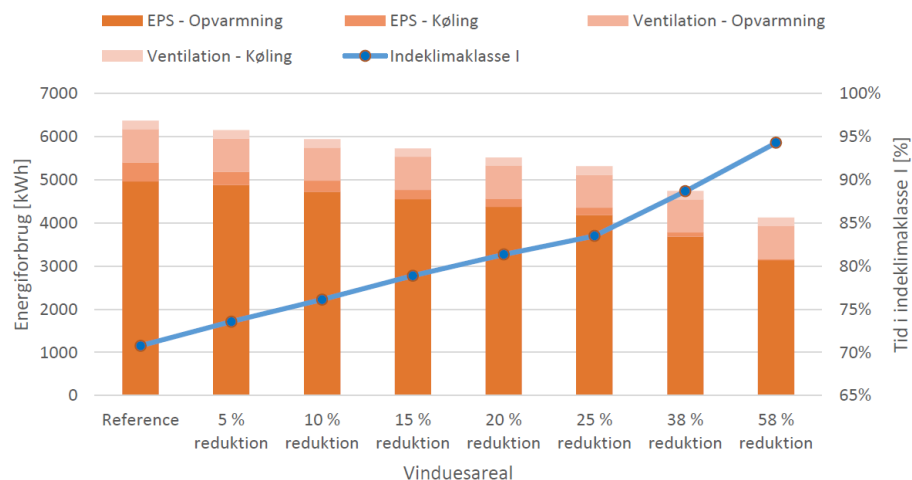
### Innovationselement

I designet af bygningen, var det hensigten, at den skulle kunne drejes i forhold til verdenshjørnerne afhængigt af hvor i verden, bygningen blev opført. For danske forhold har det vist sig, at det samlede energiforbrug til opvarmning og køling er lavest, når bygningens største vinduesparti er nordvendt. I tillæg hertil opnår denne orientering flest timer inden for indeklimaklasse 1.

### Erfaringer og videreanvendelse

Vinduesarealet er relativt stort i forhold til gulvarealet (ca. 90%) og er årsag til en stor del af energiforbruget. Studerende på DTU har lavet en analyse af energiforbrug og indeklima i forhold til vinduesarealet, se Figur 2. Hvis vinduesarealet reduceres med 25 %, vil energiforbruget til varme, køling og ventilation reduceres med 25 %, mens den procentvise andel af tid i indeklimaklasse 1 vil forøges med 18 %. Hvis vinduesarealet reduceres yderligere, vil energiforbrug reduceres og indeklima forbedres tilsvarende, men det vil da have en for stor negativ indflydelse på dagslysforholdene og oplevelsen af bygningen.

Analysen er interessant, da den visualiserer sammenhængen mellem energiforbrug og indeklima og den, eller en tilsvarende analyse, kunne evt. bruges i den tidlige designfase af nye bygninger.



Figur 2: Simuleret energiforbrug ved reduktion af vinduesarealet samt angivet procentvise tid i indeklimaklasse 1.<sup>1</sup>

Selvom de store vinduesarealer vender mod nord og de mindre mod syd resulterer det i Danmark i et øget kølebehov. Der er ingen solafskærmning og i de tidlige morgentimer og sene aften timer er nordfacaden eksponeret over for den lavtstående sol.

### 3.3 Termoaktive lette gulv- og loftkonstruktioner

#### Beskrivelse

I FOLD er der gulvvarmeslanger fra Uponor Gulvvarmesystem i både gulv og loft. Rumopvarmning foregår udelukkende via varme i gulvet, mens køling foregår fra loftet og fra gulvet i perioder med spidsbelastning.

#### Innovationselement

Opvarmning med gulvvarme er ikke nyt, men køling fra lofter i boliger er ikke standard på nuværende tidspunkt.

#### Erfaringer og videreanvendelse

I det oprindelige design var det meningen, at et borehul skulle være den primære varmekilde for rumopvarmning og rumkøling i FOLD. Som FOLD fungerer i dag, foregår opvarmningen og kølingen vha. en reversibel varmepumpe, der får el-energi fra PVT-modulerne.

Det har vist sig, at anlægget ikke har kunnet følge med det store kølebehov, der opstod i Madrid pga. de store vinduer uden solafskærmning, hvorfor der er målt meget høje rumtemperaturer. Det bør overvejes om man skal holde et forøget fokus på kølebehovet i kommende boliger pga. den høje isoleringsgrad og uhen-sigtsmæssig udnyttelse af passiv solvarme.

<sup>1</sup> Andersen og Schøtt, 2014: "Analyse af et plus-energihus for optimering af HVAC-system", bachelor-projekt, DTU.

Det er vigtigt, at være opmærksom på risikoen for kondens på køleslangerne, særligt fordi bygningens både bærende og ikke-bærende konstruktioner er af træ.

## 3.4 Ventilation

### Beskrivelse

Ventilationen i FOLD består af et mekanisk balanceret ventilationsanlæg udført som opblandingsventilation. Indeklimastrategien er, at anvende de termoaktive konstruktioner til at regulere rumtemperaturen, mens ventilationsanlæggets hovedformål er at sørge for at regulere CO<sub>2</sub>-koncentrationen og den relative luftfugtighed.

Der er desuden installeret automatisk styret oplukning af ovenlysvinduet samt udvalgte vinduer i vinduespartierne, når der er et kølebehov.

### Innovationselement

Anlægget er et ventilationsaggregat af typen Nilan Compact P+JVP, som allerede findes på markedet. Ventilationen er koblet sammen med resten af husets systemer via varmepumpen, der opvarmer eller nedkøler ventilationsluften alt afhængig af behov. Varmepumpen får leveret vand til at drive cyklussen fra varmtvandsbeholderen, som opvarmes af energi fra PVT panelerne, og suppleres med energien fra et elektrisk varmelegeme, hvis energimængden ikke er tilstrækkelig.

### Erfaringer og videreanvendelse

Ventilationsanlægget er i drift året rundt og har et betydeligt elforbrug. Der kunne anvendes en større andel naturlig ventilation og frikøling, særligt i et land som Danmark. I Madrid var der ikke de samme muligheder for frikøling pga. de højere temperaturer.

I FOLD undlod man at installere en lyddæmper på ventilationen, hvilket gjorde at der forekommer meget støj fra kanalerne, hvilket ikke er anbefalelsesværdigt i en boligenhed.

## 3.5 PVT

### Beskrivelse

Bygningens tag er beklædt med PV/T-moduler opdelt i fem felter af hensyn til transport af bygningselementer. Hver del er 2,3 m bred og af en varierende længde fra 6-8,8 m. Derudover hælder taget i to retninger, hhv. 8 og 16 °. Rent teknisk består PVT-anlægget kun af to dele, én som opvarmer brugsvand og én som køler PVT-modulerne. Sidstnævnte var oprindeligt også tiltænkt at skulle føre overskudsvarme tilbage i borehullet.

### Innovationselement

Fordelen ved PVT er, at man producerer både el og varmt vand i samme panel, og man kan dermed udnytte sparsomt tagareal bedre. Den termiske del af modulerne

producerer ikke ligeså meget varmt vand som normale solvarmeanlæg, da noget af solindstrålingen går til elproduktionen, men solcellerne har typisk en højere virkningsgrad, da de afkøles af den termiske del. Der produceres ca. dobbelt så meget varmeenergi som elektricitet.

PVT panelerne var produceret til at være frostsikre ved benyttelse af et "drain back" system. Dermed er det ikke nødvendigt at tilsætte en antifrost væske, hvilket ydermere gør systemet mere miljøvenligt og effektivt.

### Erfaringer og videreanvendelse

Den termiske del af PVT panelerne var i en lang periode ude af drift siden FOLD blev genopført hos Grundfos. Panelerne gik i stykker under transporten tilbage fra Madrid, eller under opbevaringen inden huset blev genopført. Derfor producerede PVT panelerne i denne periode udelukkende elektricitet som et traditionelt solcelleanlæg. Den termiske del er igen i drift under sommeren 2014.

Det har vist sig, at der var en fejl i den elektriske sammenkobling af solcellepanelerne, der gav anledning til såkaldte "hotspots" i glaspladen, og som forårsagede størstedelen af de opståede revner i modulerne. Panelerne producerer stadig strøm, men nødvendigvis med en nedsat effektivitet.

Når der produceres elektricitet og varmt vand samtidig, vil den maksimalt opnåede temperatur blive mindre end ved almindelige solvarmepaneller.

PVT panelerne har potentiale som metode til natkøling.

## 3.6 Varmepumpe

### Beskrivelse

Varmepumpen er af mærket Daikin og er reversibel, så den både kan opvarme og køle bygningen. Væsken imellem varmepumpen og varmeveksleren består af en 40 % glykol/vand blanding. Skiftet imellem opvarmning og køling vil oftest ske i overgangsperioden i forår/efterår. Skiftet skal foretages manuelt af brugerne, men kan opsættes til automatisk at skifte afhængigt af inde- og udetemperaturen.

Den maksimale opvarmningskapacitet er 8,73 kW og kølekapaciteten er 7,1 kW. COP for opvarmning er 2,74 og 2,41 for køling.

### Innovationselement

Den oprindelige idé var, at varmepumpen skulle hente energi fra et borehul i jorden ved siden af bygningen, men ifølge reglerne i Solar Decathlon konkurrencen var det ikke tilladt at lave huller i jorden. Derfor blev jordvarmeveksleren "simuleret" ved hjælp af en vandtank, hvor vandet ved hjælp af en varmepumpe blev holdt på den temperatur vandet ville have haft fra jordslangerne. Dette var baseret på en beregning af jordvarmeveksleren for Madrid.



### Erfaringer og videreanvendelse

Den termiske del af PVT modulerne var igen i drift over sommeren 2014. I drift, optager og afleverer varmepumpen på sin nuværende placering ved Grundfos i Bjerringbro energi fra og til luften. Det oprindelige design med en jordvarmeveksler er ikke blevet udført.

## 3.7 Styring og automatik

### Beskrivelse

Huset har en anseelig mængde elektronisk udstyr, der bruges til at styre husets drift, såsom sensorer, kontrolenheder, hubs osv.

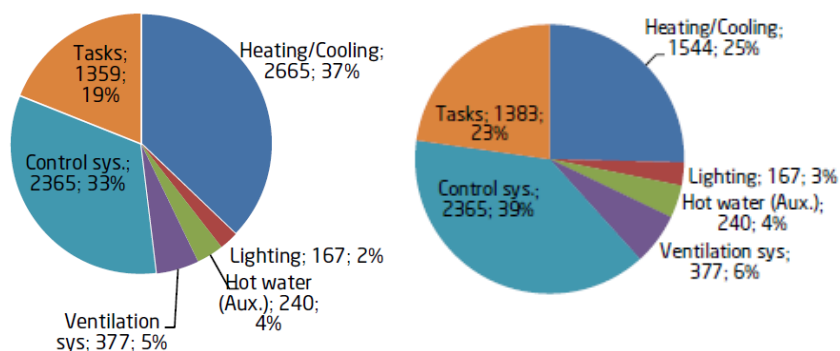
### Innovationselement

Dette udstyr afgiver en del varme og for at dette ikke skal belaste husets indeklima, er der bygget et teknikrum i huset, der er afskærmet fra opholdszonen med en skillevæg med samme isoleringsgrad, som var det en ydervæg.

### Erfaringer og videreanvendelse

Der har været gode erfaringer med at lave et separat teknikrum, der er adskilt fra resten af huset med en ydervæg.

Energiforbruget i konkurrenceperioden er blevet målt og beregnet og viser, at huset har et elforbrug til styring og automatik, som ligger på mellem 33-39% af bygningen samlede energiforbrug afhængig af om borehullet simuleres eller ej. Se fordeling af energiforbrug i figurene herunder.



Figur 3: Energiforbrug i FOLD. Tv. er vist forbruget med chiller (simulerer borehul) og th. er forbruget vist uden chiller.

At energiforbrug til styringssystemer er så stort skyldes til dels, at huset er relativt lille og har dermed få kvadratmeter at fordele energiforbruget på, og derfor må det overvejes at anvende mindre komplicerede og energikrævende styringssystemer i meget små huse, såsom enfamiliehuse. Avancerede styringssystemer er mere egnede til større bygninger, såsom kontorer, hvor gevinsten ved at anvende disse styringssystemer er større end omkostningerne.

## 4 Konklusioner og anbefalinger

- › **Konstruktioner:** En tungere konstruktion med større termisk masse vil give et mere stabilt indeklima og kunne reducere energiforbrug til opvarmning og køling. Dette kan delvist opnås ved brug af faseskiftende materialer (PCM). I praksis er det dog vigtigt at vægte fordele og ulemper i forhold til bæredygtighed med materialeanvendelsen som udgangspunkt.
- › **Vinduer:** De store vinduesarealer tilfører huset en høj arkitektonisk værdi, men bidrager samtidig til et stort varmetab og en stor varmebelastning fra solindstråling. Vinduesarealet kunne i FOLD med fordel reduceres med mindst 25 %, der ville give et reduceret energiforbrug og en forbedring af indeklimaet, men uden at det forringer dagslysforhold væsentligt. Generelt viser arbejdet at der er en sammenhæng mellem vinduesareal og overholdelse af det termiske indeklima, hvor der ved beregninger laves en parametervariation på vinduesareal. Denne fremgangsmåde er direkte anvendelig for rådgiverbranchen. Valg af glastype med høj lystransmission og god samlet u-værdi er også væsentlig
- › **Termoaktive konstruktioner:** Køleslanger i loftet kunne ikke opfylde det større kølebehov i Madrid. Det bør overvejes om man skal holde et forøget fokus på kølebehovet i kommende boliger pga. den høje isoleringsgrad og uhenigtsmæssig udnyttelse af passiv solvarme. Ved lette konstruktioner med træ er det vigtigt, at være opmærksom på risikoen for kondens på køleslangerne, særligt for bygningens konstruktioner.
- › **Ventilation:** I små huse som enfamiliehuse kan der med fordel anvendes en hybridløsning inden for ventilation, hvor mekanisk vinterventilation kombineres med naturlig sommerventilation. I FOLD kunne en større andel naturlig ventilation være med til at sænke energiforbruget til køling og ventilation. Generelt viser projektet, at en kombination af mekanisk ventilation med varmegenvinding vinter og naturlig ventilation med især nattekøling sommer, vil være at foretrække.
- › **PVT moduler:** Kombinationen af solceller og solvarme er stadig en interessant løsning, men der kræves videreudvikling på området for at sikre optimal og driftssikker produktion. Systemet vil formentlig ikke kunne opvarme et hus alene.
- › **Varmepumpe:** Jordvarmepumpen er en standardløsning, der kan fungere både som opvarmningskilde og passivkøleenhed. Høj kvalitets luft / vand varmepumper er dog også interessante og normalt mere økonomiske end jordvarmeanlæg.
- › **Styring og automatik:** "Keep it simple". Energiforbrug af styringssystemer fylder relativt meget i energiregnskabet for små bygninger, og det må derfor anbefales at udforme meget simple systemer til bygninger som FOLD. Større bygninger som f.eks. kontorhuse får større gavn af komplicerede styringssystemer og her er typisk også driftspersonale til at kontrollere og optimere. Der

er dog en udvikling undervejs, som reducerer energibehovet for styringssystemer væsentligt, så en fremtidig brug stadig vil være muligt.

## 5 Eksempler

COWI arbejder allerede i dag med mange nye teknologier og deltager i både forsknings- og udviklingsprojekter for at bevare og opnå kendskab til senest udviklede teknologier. Samtidig benytter COWIs rådgivere i så vid udstrækning som muligt, de nye teknologier i reelle projekter, og i det følgende nævnes nogle af de væsentligste.

### Green Lighthouse (2009) – Kontorejendom



- > Lysoptimering
- > Solceller og solvarme
- > Hybrid ventilation
- > Automatisk solafskærmning
- > PCM
- > LED-belysning
- > Borehuller
- > Solkøling
- > Adsorptionsvarmepumpe
- > Termoaktive dæk

### Pakhuset (2014) – Kontorejendom



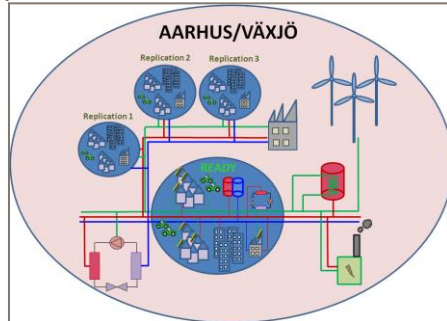
- > Havvandskøling
- > Termoaktive dæk
- > Naturlig ventilation
- > Varmepumper
- > LED-belysning

### Viborg Rådhus (2011) – Kontorejendom



- > Solceller
- > Solvarme
- > Hybrid ventilation
- > Termoaktive dæk
- > Udvendig solafskærmning
- > LED-belysning
- > Borehuller
- > Grundvandskøling
- > Adsorptionsvarmepumper

### READY-project: Århus/Växjö (2014-2018) – EU udviklings- og demonstrationspro- jekt



- > Udvikling af PVT-moduler
- > Solceller
- > Renovering af boliger og kontorer
- > Energilagring
- > Varmepumper
- > Smart grid
- > Energieffektive køkkener