

SEPTEMBER 2013
EUDP JOUR. NR. 64009-0040

SOL OG FJERNVARMEDREVNE ADSORPTIONSVARMEPUMPER MED JORDLAGER

SLUTRAPPORT

SEPTEMBER 2013
EUDP JOUR. NR. 64009-0040

SOL OG FJERNVARMEDREVNE ADSORPTIONSVARMEPUMPER MED JORDLAGER

SLUTRAPPORT

PROJEKTNR. P71827/A006292
DOKUMENTNR. 1
VERSION 01
UDGIVELSESDATO 31.07.2013, ver. 2 31.10.2013
UDARBEJDET MGCH, SEM
KONTROLLERET RMH, ASE
GODKENDT RMH

INDHOLD

1	Indledning	7
2	Konklusion	9
2.1	English summary	13
3	Baggrund og formål	16
3.1	Baggrunden for projektet	16
3.2	Formål	18
4	Beskrivelse af adsorptionsvarmepumpen der er brugt i Green Lighthouse og Viborg Rådhus	19
5	Green Lighthouse	23
5.1	Resume	23
5.2	Energikoncept	24
5.3	Målinger og resultater	27
5.4	Erfaringer og anbefalinger til Viborg Rådhus	39
6	Viborg Rådhus	40
6.1	Resume	41
6.2	Energikoncept og teknologier	41
6.3	Målinger og resultater	44
7	Målinger af adsorptionsvarmepumpen	47
7.1	Kold side af ADSerne	48
7.2	Karakteristik for ADSerne	49
8	Bilag	53

1 Indledning

Denne rapport udgør slutrapporten for projektet "EUDP09-1, Sol og fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper med jordlager til etageboliger, kontor- og institutionsbyggeri - fase 2", j. nr. 64009-0040 og programområde: Sol.

Projektet er gennemført i en projektgruppe bestående af følgende partnere:

- › COWI A/S, Projektleder
- › VELUX A/S
- › Bygningsstyrelsen
- › Teknologisk Institut, Center for Køleteknik
- › Hellerup Byg A/S
- › Viborg Kommune
- › SVEDAN Industri Køleanlæg A/S
- › GeoHeat Ex Aps
- › Københavns Universitet.

Projektet er en fortsættelse af projektet "EFP06 Fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper med jordlager til etageboliger, kontor- og institutionsbyggeri - fase 1", j. nr. 3302-0061, som startede i 2006 og afsluttedes i maj 2009. Projektet blev gennemført med følgende deltagere: COWI, Energi Danmark NRGi, Ellehauge og Kildemoes (nu Ekolab), Teknologisk Institut, Køle- og Varmepumpeteknik og SVEDAN.

Fase 2 af projektet vedrører demonstration af konceptet på 2 kontorbyggerier Green Lighthouse og Viborg Rådhus. Projektet startede den 18. august 2009 og afsluttedes pr. 1. august 2013.

Henvendelse vedrørende projektet kan ske til Reto M. Hummelshøj (projektleder) på rmh@cowi.dk.

Disclaimer

EUDP and the partners of the project group do not take any responsibility for the further use of this report and the results of this project as whole or in part.

2 Konklusion

Projektet har på to prestigefyldte lavenergibygninger, Green Lighthouse på 950 m² og Viborg Rådhus på 19.360 m², demonstreret innovative koblinger mellem solvarme, jordlager og varmedrevne varmepumper.

Denne rapport fokuserer på de tekniske aspekter med disse anlæg, med fokus på det samlede energiforbrug og de fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper og den sammenhæng, de indgår i. Den handler ikke om en evaluering af de to projekter som sådan. Green Lighthouse har været demonstrationsprojektet i lille skala, så erfaringerne har kunnet overføres til Viborg Rådhus.

Projektet har været helt afgørende for at introducere de nye energikoncepter med varmedrevne varmepumper på det danske marked i pilot- og demonstrationskala. Der er dog behov for at høste flere driftserfaringer fra lignende (større) demonstrationsprojekter, før teknologien kan siges at være fuldt afprøvet og klar til almindelig brug. Erfaringerne fra de 2 første demonstrationer under nærværende projekt giver en god platform til at igangsætte yderligere demonstrationer af varmepumpekoncepter.

Det er eftervist, at de systemer, der er lagt ind i de to anlæg, kan fungere efter hensigten. Systemernes funktion er som ventet følsomme over for randbetingelser såsom fjernvarmetemperatur, afkøling i returvarmekreds, nødvendig fremløbstemperatur m.v. Målinger viser også denne følsomhed. Samtidig er det sådan, at disse randbetingelser af forskellige grunde ikke altid har været opfyldt, og det påvirker funktionen og ydelsen væsentligt. Dette har især været tilfældet for Green Lighthouse, mens randbetingelserne bedre har været opfyldt i Viborg Rådhus. Her har der til gengæld været problemer med grundvandsanlægget (forsinkelser og tilsætninger) og andre ting, som har gjort, at anlægget kun i kortere perioder har været i optimal drift med hensyn til de specielle driftsformer, der er indlagt.

En afgørende faktor er som ventet, at varmeanlægget skal dimensioneres efter lave frem- og returtemperaturer for at give optimal drift. En god afkøling er afgørende for, at varmepumpen kan afgive sin ydelse.

Green Lighthouse er et demonstrationsbyggeri, hvor man bevidst afprøvede et nyt kompliceret energianlæg. Udgifterne til videre optimering af anlægget står dog ikke mål med det sparepotentiale, der resterer i den meget energieffektive bygning. For Viborg Rådhus er der et bedre match, og kompleksiteten i systemet er relevant, selv om det også har givet, og stadig giver, udfordringer. De udfordringer og problemer, der har været i Viborg, har ikke haft nogen betydning for forsyningssikkerheden og komforten, da der er tale om ekstra funktioner, der er bygget oven på et relativt konventionelt anlæg, som man altid kan gå tilbage til.

Følgende forhold er fundet afgørende for optimal drift med fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper.

- › God afkøling på fjernvarmen på primærsiden med adsorptionsvarmepumper. Dette kan opnås ved at koble varmepumpe og supplerende varmegiver i serie. Endvidere ved kun at anvende adsorptionsmaskinerne, når der er behov, de skal ikke køre i "tomgang", da dette vil hæve returtemperaturen.
- › Styring af gulvvarmeventiler. I Green Lighthouse sendte ventilerne i periode et større flow igennem varmeanlægget på grund af øget luftskifte og varmetab gennem vinduer og handicapdør for at opretholde en komfortabel indetemperatur. Herved blev fjernvarmereturtemperaturen for høj, og varmepumpen kobledes ud.
- › Adsorptionsvarmepumpen pendler i temperatur og flow, hvilket kan give utilsigtede pendlinger i varmeanlægget. Der skal derfor være en buffertank på alle varmepumpens tre kredse og flow-begrænserventiler på fjernvarmekredsen. Det var en erfaring, der blev indhentet og rettet på Green Lighthouse og overført til Viborg Rådhus under opførelsen.
- › Adsorptionsvarmepumpens vakuum skal sikres opretholdt og tjekkes i forbindelse med idriftsættelsen.
- › Energimålinger er foretaget med almindelige varmemålere. Da temperaturer og flow i forbindelse med adsorptionsmaskiner svinger meget, fører dette til en ret stor unøjagtighed på målinger, da de temperaturfølere, der indgår, har en ret lang tidskonstant.

Hovedresultaterne for Green Lighthouse er:

- › Indkøring og optimering af drift har taget lang tid.
- › Løsningen med et solfangeranlæg, der leder overskudsvarme ned i jorden som korttidslager, synes fornuftigt og forbedrer varmepumpens drift.
- › Der er målt et lavt normaliseret energiforbrug, hvor sol- og varmepumpe dækker halvdelen af det normaliserede varmebehov.
- › Ydelsen af varmepumpen vil kunne øges, hvis temperaturen på varmesystemet frem/retur kan sænkes til 35/25°C.

- › Styringssystemerne kan optimeres yderligere og integreres for de forskellige enheder.

Hovedresultaterne for Viborg Rådhus er:

- › De ekstra funktioner, der er indlagt for varme- og eldrevne varmepumper, som henter varme i grundvandet, fungerer selvsagt kun, når alle komponenterne er i orden. Der har i indkøringsperioden siden idriftsættelsen været skiftende problemer med disse, og derfor er der kun korte perioder, hvor hele systemet har kørt som tiltænkt. Man må derfor fastholde, at forsyningsanlæg baseret på disse komponenter skal have fuld backup. Det kan ændre sig, når erfaringer i alle led er blevet sådan, at det hele virker fra den dag, bygningen bliver taget i brug.
- › Adsorptionsmaskinerne har i de perioder, hvor der har været normal drift, vist sig at virke efter hensigten, idet den relativt dårlige afkøling på fjernvarmesiden fortsat er en udfordring. Dette ventes at blive løst ved en modificeret styringsstrategi, der blandt andet indebærer, at de enkelte varmepumpemoduler "belastes" hårdere, således at tomgangskørsel undgås.
- › Adsorptionsmaskinerne har gode vilkår, idet forsyningsanlægget i praksis kræver ret lave temperaturer til gulvvarme og ventilation, og en ret høj køletemperatur.
- › Adsorptionsmaskinerne virkede ikke, da de blev idriftsat (efter at grundvandsanlægget var klar), fordi der var foretaget en forkert vakuumpumpning. Efter at leverandøren (Sortech i Tyskland) etablerede det rigtige vakuum, virkede de efter hensigten.
- › Grundvandsreservoiret er som udgangspunkt en ideel kilde (frem for borehuller og jordvarme), da der er et konstant behov for køling til serverkøling. Samtidig er temperaturen på det afkølede vand god til en adsorptionsvarmepumpe, som ikke kan virke ved de lave temperaturer (3°C og lavere), der let kan opstå med jordvarme.
- › Grundvandsanlægget har givet problemer på to måder. Dels var der en lang og forsinket indkøring, dels har der været driftsstop på grund af tekniske problemer. Det har bevirket, at varmepumperne ikke har kunnet køre, da de kun har grundvandet som kilde. Dette har ikke givet forsyningsproblemer.
- › De 4 adsorptionsvarmepumper er koblet i parallel på fjernvarmesiden, da fjernvarmetemperaturen "kun" er omkring 70°C. Ved en seriekobling ville man opnå en bedre afkøling, men temperaturen ind i maskinen bliver for lav til de sidste maskiner.
- › De 4 maskiner er koblet i serie med radiatorerne, som er placeret for at modvirke koldt nedfald fra vinduer, for at forbedre afkølingen. Dette har vist sig at være en god løsning. Der er dog her fortsat nogen indkøring.

Anbefalinger for den videre brug af fjernvarmedrevne adsorptionsmaskiner:

- › Fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper kan i fremtiden finde anvendelse inden for tre områder:
 - 1) I visse tilfælde til mindre bygninger, hvor der er behov for køling og varme, og hvor der er billig varme ved min. 65°C til rådighed.
 - 2) I stor skala som en del af forsyningscentral, der leverer fjernkøling og fjernvarme, og hvor der i perioder er varme tilovers.
 - 3) Ved større bygninger eller byggerier (mindst som Viborg), hvor der er varme og kølebehov (kontorbygninger mv.) og mulighed for etablering af jordlager eller grundvand samt "billig" varme.

I forbindelse med større bygninger er anbefalingerne følgende:

- › Det er nødvendigt med tilstrækkelig fjernvarmekapacitet til hele behovet, og kølemaskiner med luftkølere der kan levere køling. Man kan da overveje, som i Viborg, at bruge kølemaskinen til varmepumpe også, således at man kan skifte mellem varme- og eldrevet varmepumpe alt efter priserne.
- › For at anvende konceptet med borehuller (BTES) skal kølebehovet være mindst 60% af varmebehovet (målt i kWh varme og køl leveret). Ellers kan der ikke opnås tilstrækkelig opvarmning af lageret om sommeren, medmindre det gøres på anden vis.
- › Grundvandsbaserede anlæg (ATES) er som udgangspunkt bedre, men det kræver en vis størrelse for at udgifterne til drift, målinger og udsyring af filtersætninger i vandboringerne står mål med værdien af energibesparelsen. Det er enklere med borehuller rent driftsmæssigt, men dyrere i anlægsomkostninger.

2.1 English summary

The project has demonstrated innovative concepts combining solar energy, ground storage and absorption heat pumps at two sites of prestigious low energy buildings, Green Lighthouse of 950m² and the Viborg Rådhus (Viborg Town Hall) of 19,360m².

The function of the systems is proven with the intended functionality. It is observed that the system operations are sensitive to external boundary conditions such as district heating temperatures, space heating return temperature, cooling needs etc. The mentioned boundary conditions have, for various reasons, not always met the requirements resulting in a reduced performance. This has especially been the case for Green Lighthouse, while the conditions have been better at Viborg Rådhus.

Green Lighthouse is a demonstration building where a complicated new energy system intentionally was chosen for testing. A low energy consumption has been proven even with increased operation hours and higher room temperature. When adjusted to normalized working conditions the measured consumption corresponds to the expected values. The cost of further optimization of the already high performing energy system exceeds the potential saved cost an optimization would cause. Viborg Rådhus, on the other hand, has a better match between savings and cost and the complexity of the system is comprehensible, although there are some challenges. The challenges and problems at the Viborg site have had no impact on security of supply or comfort, as they occur at the extra features build on top of a relatively conventional energy system.

The following is found to be crucial for optimal performance of absorption heat pumps powered by district heating.

- › Well performing cooling of district heating on the primary side of the absorption heat pump. This can be achieved by combining multiple heat pumps in series or by using return water for supplementary heating. Furthermore, the heat pumps should only be used when there is a heat demand and not be operating at an idle state as this causes the temperature to rise.
- › Managing floor heating valves. In period in the Green Lighthouse, the valves were letting a higher flow through the heating system, due to high air change rates and need to maintain a comfortable indoor temperature. As a result of this high flow, the temperature of the return flow to the district heating grid increased, and the heat pump couldn't perform optimally.
- › There are fluctuations in the temperatures and flows in the absorption heat, which can cause fluctuations throughout the heating system. To prevent this, buffer tanks are to be placed in all the three circuits of the heat pump system and automatic flow limiting valves shall be placed in the district heating circuit. This experience from the Green Lighthouse was transferred to Viborg Rådhus during construction.
- › The vacuum in the absorption heat pump is to be secured and checked during commissioning.

- › Energy measurements were made with regular heat meters. The fluctuating temperatures in absorption heat pumps lead to uncertainties in the measurements, as the temperature gauges have a fairly long time constant.

The main findings from Green Lighthouse are:

- › Commissioning and optimization of the operation has taken a long time.
- › The solar heating system that leads excess heat to the ground which works as a short time storage seems reasonable and improves the performance of the heat pump.
- › The measured energy consumption is low and solar heating in combination with the heat pump covers about half of the heating needs at normalized operating conditions.
- › The performance of the heat pump could be improved if the inlet/return temperatures of the space heating system could be lowered to 35/25°C.
- › The control system could be further optimized and integrated for the various units.

The main findings at Viborg Rådhus are:

- › During the commissioning period, there have been certain problems with the extra features of the heat driven electricity powered heat pumps retrieving heat from the ground. In the current situations, the supply based on these technologies, should have a backup to ensure security of supply as is the case in Viborg.
- › During normal operation, the absorption heat pump has worked as intended.
- › The operation conditions for the absorption heat pump are good as the required heating temperatures to floor heating and ventilation are relatively low, and the cooling temperatures are high.
- › Due to an improperly executed vacuum pumping of the absorption heat pumps, they did not operate when first commissioned. This problem was solved by the supplier, Sortech, Germany.
- › The reservoir of groundwater is an ideal heat source as there is a constant need for cooling and server cooling. The temperature is suited for an absorption heat pump as the temperature is sufficiently high.
- › There was a delay in operation of the ground water system and there has been some technical problems causing a complete stop of operations due to blocking of filter at reinfiltration.
- › The 4 absorption heat pumps are parallel connected. One could achieve a better cooling by mounting the heat pumps in series. This cannot be done here

due to the low district heating temperatures of 70°C supply leading to unsuitably low temperatures to the last heat pumps.

- › To improve the cooling, the 4 absorption heat pumps are placed in series with the radiators which are placed to prevent down draught.

For future operation of absorption heat pumps powered by district heating the following should be considered:

- › Absorption heat pumps powered by district heating can be utilized in three cases:
 - 1) In smaller buildings with a demand for heating and cooling, and where a cheap heat source of minimum 65°C is available.
 - 2) In large scale as a part of a supplying central, which supplies low temperature district heating and cooling in periods.
 - 3) At large buildings of the size of Viborg Rådhus or larger, where there is a heating and cooling demand, and where a ground storage or groundwater aquifer is available, and there is access to a cheap heat source

For the larger buildings we recommend:

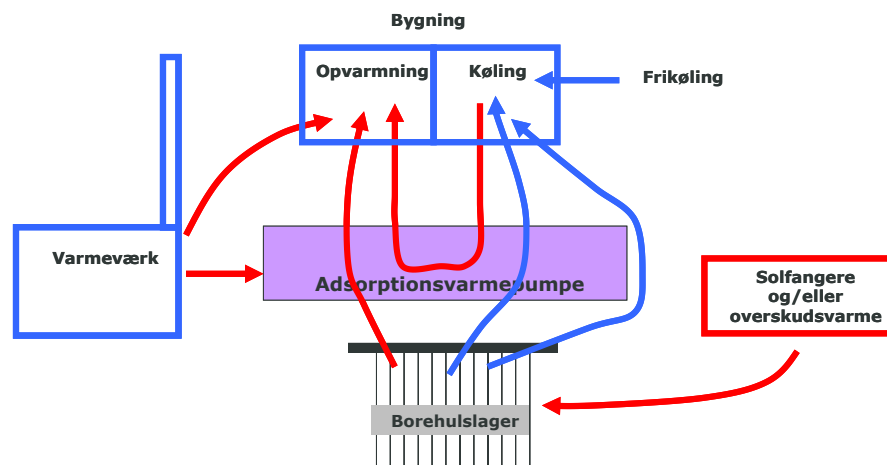
- › The heat demand and the absorption heat pump has to be covered by district heating. In Viborg, one could consider to use the electricity powered heat pumps both for heating and cooling, so that one could shift between absorption- and electric heat pumps according to the price fluctuations.
- › To ensure that the boreholes are reheated during summer, the cooling demand should at least cover 60% of the total required heating (in kWh of heating and cooling supplied), or the required heat to the borehole should be provided in a different way.
- › Utilizing ground water (ATES) is considered a better alternative for large scale sites where the energy savings is dominant compared with the cost for operation, measurement and filter cleaning. The boreholes (BTES) are simpler to operate, but have a higher construction cost.

3 Baggrund og formål

3.1 Baggrunden for projektet

3.1.1 Konceptet

Hovedideen i konceptet er at forbedre udnyttelse af fjernvarme ved at bruge fjernvarme som drivenergi i en adsorptionsvarmepumpe, der trækker vedvarende energi ud af et jordlager til opvarmning af en bygning. Ved denne udnyttelse køles jordlageret, og dette kan derfor den følgende sommer bruges til køling, enten direkte eller ved at adsorptionsmaskinen bruges som kølemaskine. Derved opvarmes jordlageret (regenereres), og det er klar til brug for varmepumpen den følgende vinter.



Figur 3.1 Varmestrømme i energikonceptet (solvarme udnyttes også direkte)

På denne måde integreres varme og køling, og der opnås store besparelser i primærenergiforbrug, herunder også elforbrug til køling, samtidig med at adsorptionsmaskinen bruges i flere timer pr. år, hvorved rentabiliteten forbedres.

3.1.2 Formål og målopfyldelse

Projektets formål er at undersøge muligheder for at anvende fjernvarmedrevne varmepumper med jordlager i Danmark og at igangsætte aktiviteter, som kunne initiere en fremtidig demonstration af konceptet.

Hovedkonklusionen fra fase 1 projektet (EFP) er, at der er vide muligheder for udnyttelse af konceptet. Det er som en del af projektet blevet klargjort, under hvilke omstændigheder konceptet er anvendeligt, herunder tekniske, økonomiske og geografiske muligheder. Der er endvidere som en del af projektet blevet arbejdet med modificeringer og udvidelser af konceptet, som øger anvendeligheden.

Anvendelse af konceptet har indgået i de deltagende firmaers aktiviteter parallelt med gennemførelse af projektet, og dette har medvirket til, at konceptet i fase 2 er blevet realiseret i to byggerier, nemlig **Green Lighthouse** ved Københavns Universitet og på det nye **Viborg Rådhus**.

Der er under fase 1 projektets gennemførelse sket en løbende udvikling på markedet, både hvad angår komponenter (borehulslager og adsorptionsvarmepumper) og anvendelse, og der er for tiden - delvist inspireret af projektet - en række initiativer i gang, og konceptet bliver overvejet i en række byggerier under planlægning.

Som et spin-off fra projektet har der været arbejdet med en række videreudviklinger af konceptet, som har vist sig gunstige, herunder samdrift med lavtemperatur solvarme.

3.1.3 Anvendelighed af konceptet

Som udgangspunkt var konceptet klart begrænset til fjernvarmeområder for bygninger, hvor der også er et kølebehov; men hovedideen er at forbedre udnyttelsen af fjernvarme og reducere elforbrug til køling. Det var også klart, at udnyttelsen ville være afhængig af de faktiske forhold i undergrunden med det udgangspunkt, at kalk var at foretrække.

Et af resultaterne er, at det oprindelige koncept har vist sig særligt egnet til (kontor) - bygninger større end 7000 m². Det har dog vist sig, at modificeringer af konceptet øger anvendeligheden, samt at ikke-optimale jordbundsforhold kan kompenseres med størrelsen på jordlageret. Endvidere er det blevet klargjort, at man med strømning af grundvand i undergrunden ofte i stedet kan udnytte dette grundvand direkte til varmepumpen til at lave et lignende koncept.

Analysen har endvidere vist, at forholdet mellem varmebehov og kølebehov er afgørende, og at det ofte er bedre at kombinere varme- og eldrevet varmepumpe og kølemaskiner for at få balance frem for at dække det hele med adsorptionenheder. Dette giver yderligere fordele i forhold til at minimere primærenergiforbrug ved at anvende en varmedrevet maskine, når der er overskudsvarme, og eldrevet maskine, når der er overskud af el eller billig el. Dette udnyttes i Viborg Rådhus, hvor der ydermere med anvendelse af termoaktive konstruktioner er mulighed for at forskyde tidspunktet mellem behov og forbrug, således at "billig" el og varme kan udnyttes.

3.1.4 Myndighedsforhold

Der er under projektets gennemførelse blevet udarbejdet en ny vejledning vedrørende Jordvarmeanlæg (Miljøprojekt Nr. 1238 2008, Jordvarmeanlæg, Teknologier og risiko for jord- og grundvandsforurening, Miljøministeriet). Denne vejledning vil gøre det lettere for myndighederne at behandle ansøgninger om borehulslagre. Fase 1-projektet har givet input til denne vejledning.

3.1.5 Økonomi

Analysen peger på, at det for det oprindelige koncept er muligt at opnå tilbagebetalingstider for merinvesteringer i konceptet sammenlignet med den traditionelle løsning på omkring 11 år. Set i sammenhæng med den lange levetid for komponenterne er dette acceptabelt. Endvidere sker der en forbedring af komponenterne, og den næste serie adsorptionsmaskiner med mixed adsorbenter med øget specifik overflade ventes at give en markant prisreduktion på maskinerne (forventet 40%), hvilket vil forbedre rentabiliteten. Forbedrede systemløsninger kan yderligere forbedre økonomien.

3.2 Formål

Projektets formål er at fremme anvendelsen af fjernvarmedrevne adsorptionsvarmepumper i Danmark - en teknologi, som vurderes at have væsentlige potentialer i forhold til at reducere energiforbrug til varme og køling i bygninger. Projektet har haft til formål at sikre en målrettet og ekstraordinær fokus på optimering, monitoring og formidling, således at de to demonstrationsprojekters succes kunne sikres, idet Viborg Rådhus bygger på resultaterne fra Green Lighthouse.

Green Lighthouse er et forsøgshus, og fokus har været at demonstrere bæredygtige energiløsninger i samspil. Løsningerne har for en stor del været nye og uprøvede, og formålet har været at teste en række af disse i lille skala. Derfor er husets kvadratmeterpris blevet relativt høj (37 mio. DKK, heraf 2-3 % til energisystemet for et hus på 950 m²).

Årsagen til den høje pris er bl.a.:

- › Mange vinduer
- › Dyr facadebeklædning og vanskelige arbejdsgange
- › Ekstraordinært mange elinstallationer.

Teknikken i Green Lighthouse har vist sig for kompliceret til så lille en bygning. På Viborg Rådhus giver det bedre mening med et kompliceret system, da der her er folk ansat til at tage sig af driften.

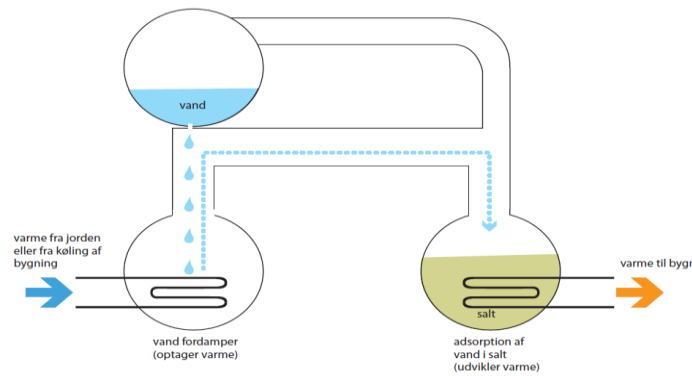
4 Beskrivelse af adsorptionsvarmepumpen der er brugt i Green Lighthouse og Viborg Rådhus

4.1.1 Adsorptionsvarmepumpen

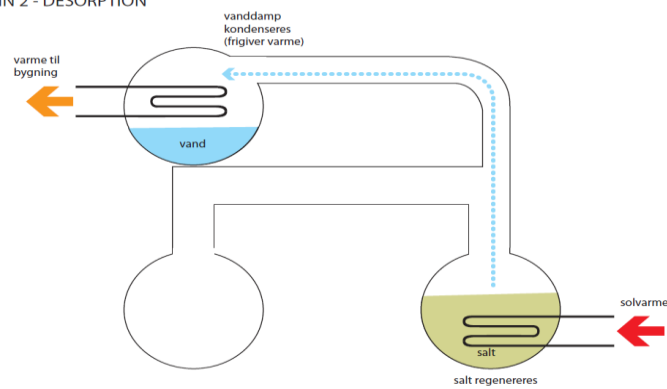
Adsorptionsmaskiner virker på samme måde som de små silicagel-poser, vi finder, når vi køber elektronik. Når silicagelen er tørret ud, kan den suge fugt fra luften. Fugten sætter sig på overfladen af det porøse stof. Sugeevnen aftager for til slut helt at stoppe, når silicagelen er fyldt med vand(molekyler). Herefter skal silicagelen regenereres med varme.

I princippet består en adsorptionsmaskine af to forbundne, evakuerede beholdere, den ene med silicagel og den anden med vand. Principopbygningen ses Figur 4.1, der også illustrerer funktionsmetoden:

TRIN 1 - ADSORPTION



TRIN 2 - DESORPTION



Figur 4.1 Princip for adsorptionsmaskinen

De maskiner der er anvendt i de to projekter er rent konkret også baseret på silica-gel, billede og specifikationer fremgår af Tabel 4.1 og Figur 4.2.

Tabel 4.1 Tekniske specifikationer for varmepumpen ACS 08 og ACS15. Effekten som varmepumpe fås ved at gange kølekapaciteten med COP+1. Den maksimale effekt, der er anført, nås kun, hvis temperaturen i borehullet er 2°C, gulvvarmen forsynes med 22°C, og fjernvarmen er 95°C

Basic performance data	ACS 08	ACS 15
Cooling capacity, max.	11 kW	23 kW
COP _{therm} , max.	0.65	0.65
Cooling capacity, nominal	8 kW	15 kW
COP _{therm} , nominal	0.60	0.60
Power consumption Ø	7 W	14 W
Operating range		
Chilled water circuit	6-20 °C	6-20 °C
Heat rejection circuit	22-37 °C	22-37 °C
Driving heat circuit	55-95 °C	55-95 °C
Cooling capacity	5-11 kW	10-23 kW

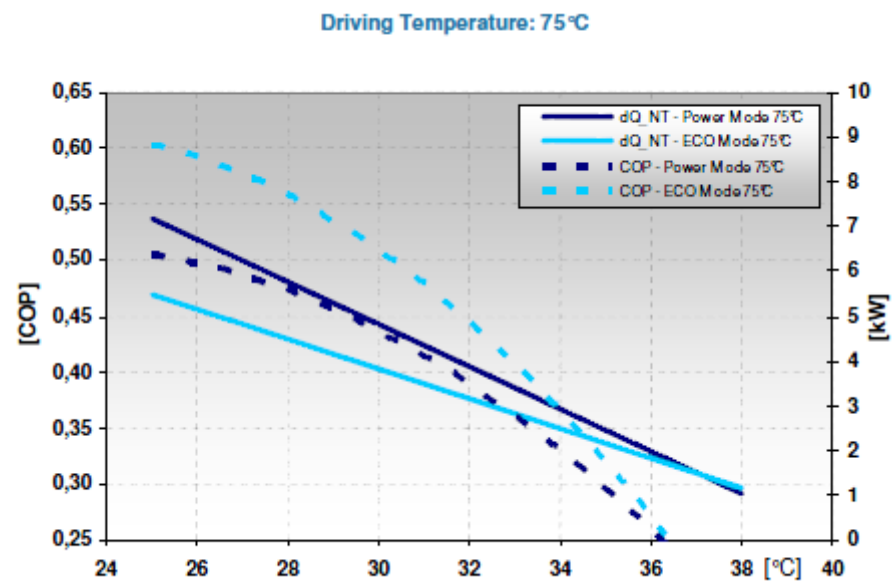


Figur 4.2 *Sortech ACS08, hvoraf der er installeret en i Green Lighthouse, og ACS15 til højre, hvoraf der er installeret 4 i Viborg Rådhus*

COP (coefficient of performance) for denne maskintype drevet som varmepumpe er defineret som: Den varme, der leveres til gulvvarme, divideret med den fjernvarme, der aftages af maskinen. Al varmen udnyttes i bygningen. COP afhænger af en række ting:

- › Temperaturen på fjernvarmen. Den skal være mindst 65°C, og jo højere jo bedre, dog ikke over 95°C.
- › Temperaturen på returen fra gulvvarme og den nødvendige fremløbstemperatur. Returen skal være så lav som muligt, under 30°C og helst 25°C. Hvis returen kommer op i nærheden af 35°C, vil maskinen kun afsætte fjernvarme.
- › Temperaturen på den kolde side. Her er det væsken i jordlageret, eller det afkølede vand, hvis det er til køling som skal være så høj som muligt og den kan normalt ikke komme under 5-6°C.

Af Figur 4.3 fremgår et eksempel med en fjernvarmetemperatur på 75°C og en temperatur på det afkølede vand på 10°C (som opvarmes til 15°C). Heraf fremgår at man med en returtemperatur på gulvvarmekredsen på 30°C opnår en COP køl på 0,5 (i ECO mode). Dette svarer til en COP som varmepumpe på $1+0,5 = 1,5$. Man vil da for hver enhed fjernvarme, der bruges, trække yderligere 0,5 enheder ud af borehullet.



Figur 4.3 Eksempel på køleydelsesdiagram for SorTech ACS08. Viser køleeffekten og COP køl med en fjernvarmetemperatur på 75°C og et temperatursæt på den kolde side på 10/15°C. Vandret akse er returtemperaturen på gulvvarmen



Figur 4.4 De 4 adsorptionsmaskiner i Viborg Rådhus

5 Green Lighthouse

5.1 Resume

Green Lighthouse har været i drift og fungeret som Københavns Universitets nye bygning for studieinformation siden oktober 2009. De sidste mangler afsluttedes med udgangen af 2010. Udfordringerne har for en stor del relateret til samspil mellem husets styringssystemer, der er fordelt på flere leverandører, og træghed i mangelfhjælpsningen. Herudover er én entreprenør gået konkurs undervejs i processen, hvilket yderligere har kompliceret indkøringen.



Figur 5.1 Green Lighthouse set fra bygningen på Tagensvej 16. Kilde: COWI

Energiforbruget for det første år har været højere end beregnet, hvilket ikke er usædvanligt i en bygning med så mange tekniske installationer og intelligente systemer, der skal fungere sammen. Andet år har vist sig at være væsentligt bedre. Der er dog også andre forklaringer, herunder at benyttelsestiden har været omkring 3500 timer i forhold til de forudsatte 2000 timer pr år i Be06-beregningen. Yderligere har rumtemperaturen i opvarmningssæsonen været ca. 23 grader i snit, og der har været problemer med øget luftskifte gennem vinduer og ventilation. Endvidere

har utilsigtet brug af en automatisk handicapdør og stor lufttransport gennem en karruseldør givet anledning til for stort luftskifte i bygningen og deraf følgende kold luft og øget energienergiforbrug i stueetagen. Dette har relativt stor betydning for et lavenergihus og har medført, at temperaturen på varmeanlægget er hævet for at kunne levere mere varme, hvorved varmpumpens ydelse reduceres.

Til trods for længere driftstid har bygningen et elforbrug til drift af pumper, ventiler mv., automatik og elektriske apparater, som er meget lavt. Det samme gælder varmtvandsforbrug og varmetab i brugsvandsystemet. Der har endvidere ikke været behov for mekanisk køling i bygningen om sommeren, hvilket er meget positivt. Selv i den varme 2010 kunne temperaturen holdes uden mekanisk køling. Årsagen er god solafskærmning, og at nattekølingen og varmeakkumuleringen i betondæk og gipsplader med PCM (phase change material – parafin) har fungeret efter hensigten. Dagslysudnyttelsen er også god, og elforbruget til belysning er lavere end forventet, når den øgede brugstid tages i betragtning. Solvarmeanlæg og varmepumpe yder også godt, og jordlageret var ved vintersæsonens start omkring 18°C. En del af solcelleanlægget var i starten ikke korrekt forbundet; men efter rettelse heraf yder det som forudsat.

Green Lighthouse har været underlagt stor medieopmærksomhed, hvilket har gjort, at bygningen er blevet besøgt af ca. 10.000 eksterne personer gennem det første år, og antallet af besøgende er stadig højt. Derudover bliver bygningen brugt af de daglige brugere i næsten dobbelt så mange timer som forudsat. Det er grundlæggende positivt, at bygningen udnyttes i så høj grad, som det er tilfældet, men det koster naturligvis ekstra på energiregningen.

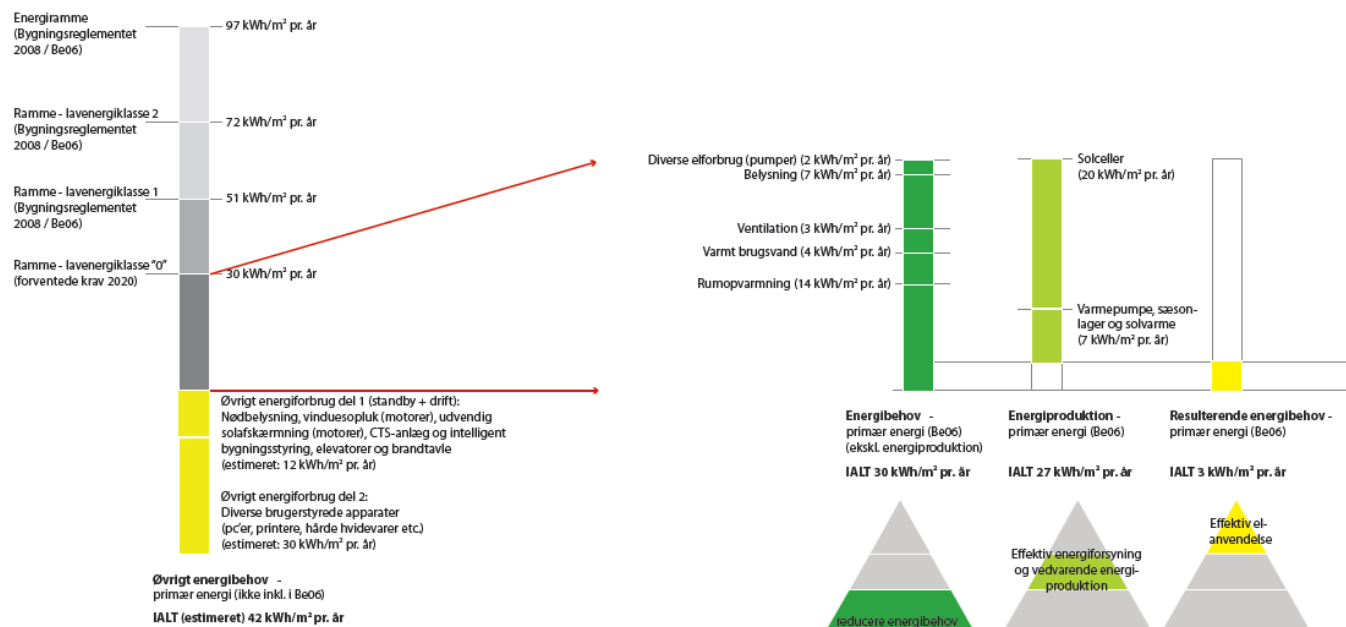


Figur 5.2 Solfangere, solceller og ovenlys på taget af Green Lighthouse.
Kilde: VELUX Model home 2010 booklet fall 2010, foto: Adam Mørk.

5.2 Energikoncept

Green Lighthouse er opført som Danmarks første offentlige CO₂-neutrale bygning ud fra den definition, at solceller, solfangere og anden vedvarende energi kompenserer for den CO₂, der er bundet i el- og fjernvarmeforbrug til bygningsdrift. CO₂-neutraliteten blev udarbejdet på baggrund af gældende bygningsreglement BR06 ved normaliseret drift, og energiberegningen blev programmeret på baggrund af de forventede europæiske 2020 krav til offentlige kontorbyggerier, baseret på et kvalificeret skøn. Siden huset blev opført, er der etableret en frivillig energiklasse 2020

for bygningers energiforbrug i 2020, som er 25 kWh/m² for kontorbyggeri. Green Lighthouse lever op til kravene for 2020 i målt energiforbrug ved normaliseret drift. De første tre års målte energiforbrug viser også, at der, med den aktuelle drift, er brugt mere energi i virkeligheden end antaget i den teoretiske beregning. Figur 5.3 viser den beregnede fordeling af energibehov og energiproduktion sammenlignet med daværende gældende bygningsreglement.



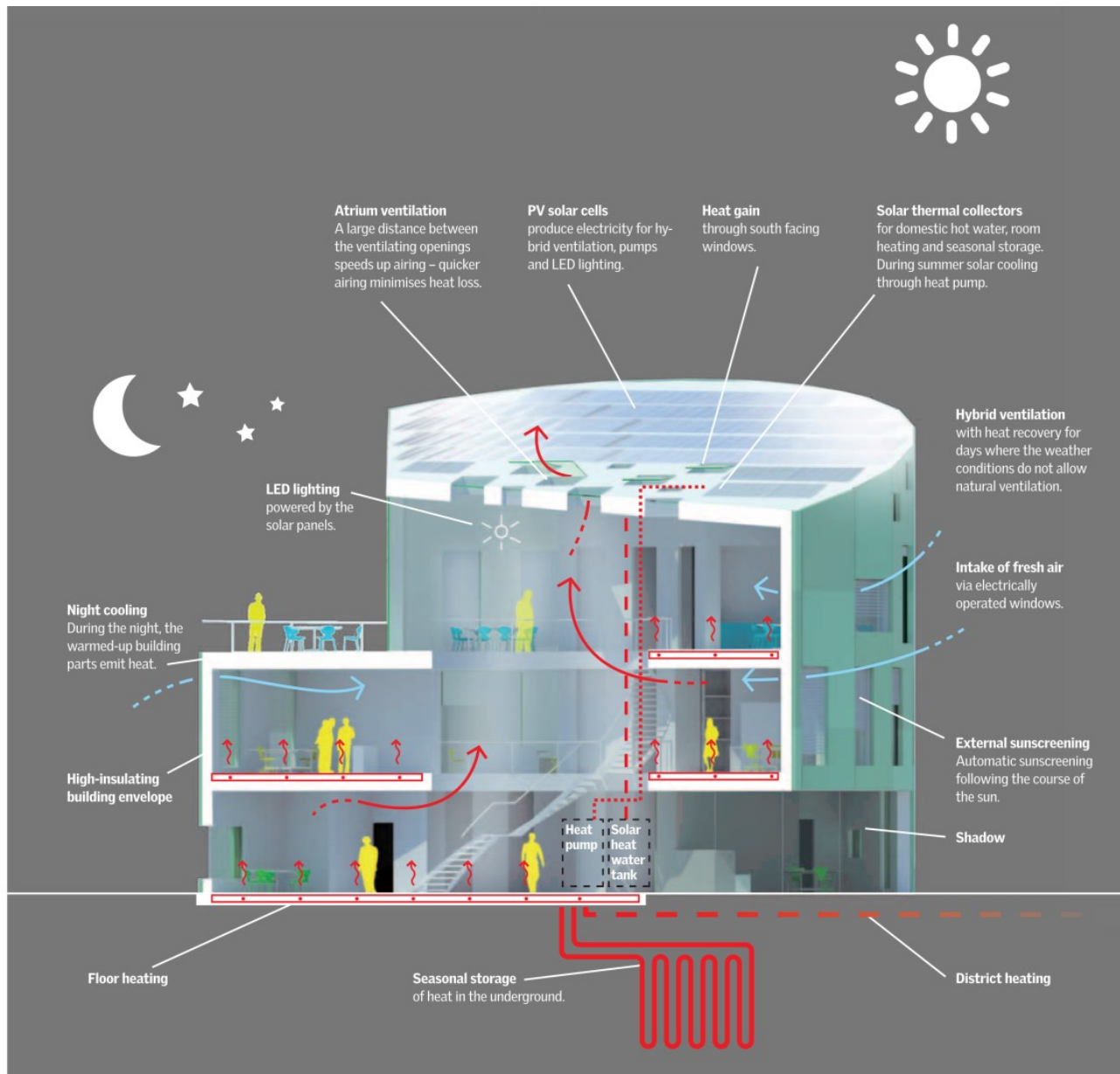
Figur 5.3: Energibalance for Green Lighthouse. Kilde: COWI A/S

5.2.1 Forsyning til Green Lighthouse

Green Lighthouse forsynes af en lang række af energiteknologier, der i samspil sikrer et lavt energiforbrug, se Figur 5.4.

Det drejer sig om følgende:

- › Naturlig/hybrid ventilation med VGV i kombination med brandventilation.
- › Anvendelse af solfangere 30 m².
- › Varmeoverskud gemmes i borehulslager 120 m BTES.
- › Fjernvarmedreven adsorptionsvarmepumpe til opvarmning om vinteren
- › Solkøling (varmepumpe kan både varme og køle).
- › Solceller 78 m².
- › Anvendelse af PCM-materiale til at øge bygningens varmekapacitetsegenskaber.



Figur 5.4 Teknologier i Green Lighthouse. Kilde: CCO & COWI A/S

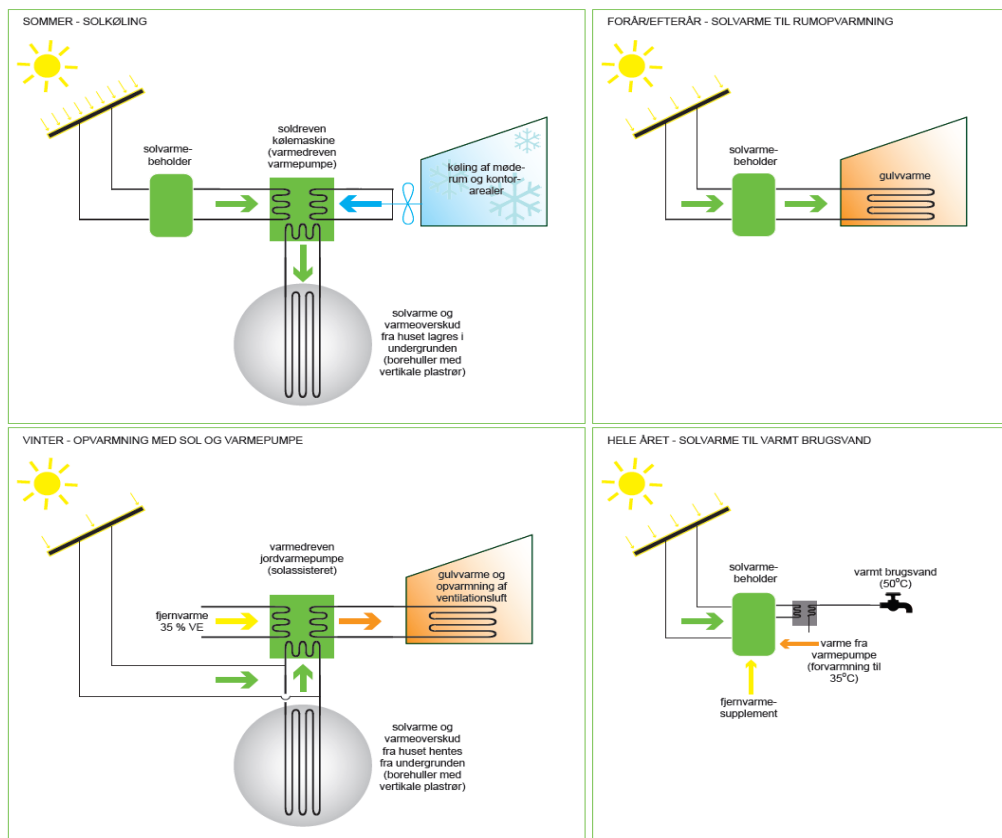
Princippet for forsyning til Green Lighthouse fremgår yderligere af Figur 5.5.

Om vinteren bruger adsorptionsmaskinen fjernvarme (rød pil). Den trækker varme ud af jordlageret (køler det) og sender varme til opvarmning af bygning i gulvvarmekredsen og forvarmer brugsvandet. Solvarmen bruges til opvarmning af brugsvand, og hvis der er overskud herfra, sendes det til jordlageret, som derved opvarmes (regenereres). Hvis jordlageret bliver for koldt eller udetemperaturen for lav, stopper driften, og fjernvarmen bruges direkte.

Forår og efterår dækkes opvarmning direkte af solvarme.

Om sommeren bruges solvarme fortsat til opvarmning af brugsvand, mens overskuddet (det meste) sendes til jordlageret, som derved opvarmes og er klart til vin-

terens varmepumpe drift. Anlægget er opbygget, så det også kan køre som soldrevet køling, idet solvarmen bruges til drift af varmepumpen, som så køler bygninger og sender varmen til jordlageret eller til en luftkøler, som også indgår.



Figur 5.5 Princip for forsyning til Green Lighthouse, Kilde COWI A/S

5.3 Målinger og resultater

5.3.1 Energimålinger

Alle måledata er blevet hentet via hjemmesiden <http://mima.activehouse.info/>, som er centralt styret af VKR Holding og indeholder måledata fra alle koncernens test-huse. På denne hjemmeside findes data fra en lang række målere og sensorer i hu-set bl.a.:

- › Varmeforbrug
- › Elforbrug
- › CO₂-niveau
- › Temperatur (ude + inde)
- › Naturlig ventilation
- › Belysningsniveau
- › Brugstid.



Figur 5.6 Screen dump fra <http://mima.activehouse.info/>, hvor måledata er hentet

I Tabel 5.1 ses en oversigt over de indsamlede og analyserede målepunkter.

Tabel 5.1 Oversigt over målere med målernummer og beskrivelse. (Rød indikerer varme-flow, og blå indikerer elektricitet)

Måler nr. i MIMA	Måler nr.	Beskrivelse	Enhed
MBus_FM40_V1	FM40	Varmtvandsmåler	kWh
MBus_QM10_E	QM10	Fjv. hoved-måler	kWh
MBus_QM10_V1	QM10	Fjv. hoved-måler	l/h
MBus_QM11_E	QM11	Solvarme til lagertank	kWh
MBus_QM12_E	QM12	Solvarme til jordlager	kWh
MBus_QM13_E	QM13	Fjernvarme til lagertank	kWh
MBus_QM14_E	QM14	Varmepumpe til lagertank	kWh
MBus_QM14_V1	QM 14	Varmepumpe til lagertank	l/h
MBus_QM15_E	QM15	Rumopvarmning	kWh
MBus_QM15_V1	QM15	Rumopvarmning	l/h
MBus_QM16_E	QM16	Koldt vandstank	kWh
MBus_QM16_V1	WM16	Koldt vandstank	l/h
MBus_QM17_E	QM17	Varmepumpe til jordlager	kWh
MBus_QM18_E	QM18	Køleforbrug	kWh
MBus_QM19_E	QM19	Frikøler	kWh
MBus_QM20_E	QM20	Solfanger	kWh
2P2	EM01	Elevator	kWh
2P5	EM02	VVS-installation	kWh

2P7	EM03	Tørkøler	kWh
2P8	EM04	Ventilation	kWh
2P10	EM05	Nødbelysning	kWh
2P13	EM06	Solcelle-anlæg	kWh
3P2	EM07	Teknik (stueplan)	kWh
7P2	EM08	Belysning (Stueplan)	kWh
1P4	EM09	Teknik (1. sal)	kWh
4P2	EM10	Belysning (1. sal)	kWh
5P2	EM11	Teknik (2. sal)	kWh
9P2	EM12	Belysning (2. sal)	kWh

5.3.2 Det målte energiforbrug

I 2012 har bygningen med det aktuelle brugsmønster et primærenergiforbrug¹ på ca. 60 kWh/m² pr. år uden indregning af egenproduktion af vedvarende energi, mod et beregnet behov på ca. 30 kWh/m² pr. år. Mere end halvdelen af det øgede energiforbrug kan tilskrives, at virkelighedens verden på en række områder adskiller sig fra de teoretiske standardbetragtninger/-forudsætninger, som indgår i energiberegningen i Be06. Væsentligst er, at brugerne af komfortsyn har haft behov for højere temperaturer end forudsat i beregningen, og der har været betydelig øget brugstid samt luftskifte. De faktorer kan til dels knyttes til de mange besøgende og brugere, der har været igennem bygningen. Det anførte energiforbrug er uden medregning af vedvarende energi, der faktisk har produceret en smule mere end beregnet. Samlet set har bygningen et merforbrug af købt primærenergi, som ikke kan forklares umiddelbart, på omkring 9 kWh/m² om året, hvilket svarer til ca. 5 kr./m² om året eller ca. 5.000 kr. om året for hele bygningen.

Green Lighthouse ligger ca. 30% under Bygningsklasse 2020 med målte værdier.

Tabel 5.2 Forventede og målte energiforbrug fordelt på indeholdt i Be06-beregning og resterende forbrug. Rumvarme forbruget er graddagekorrigeret. El er primærenergi.

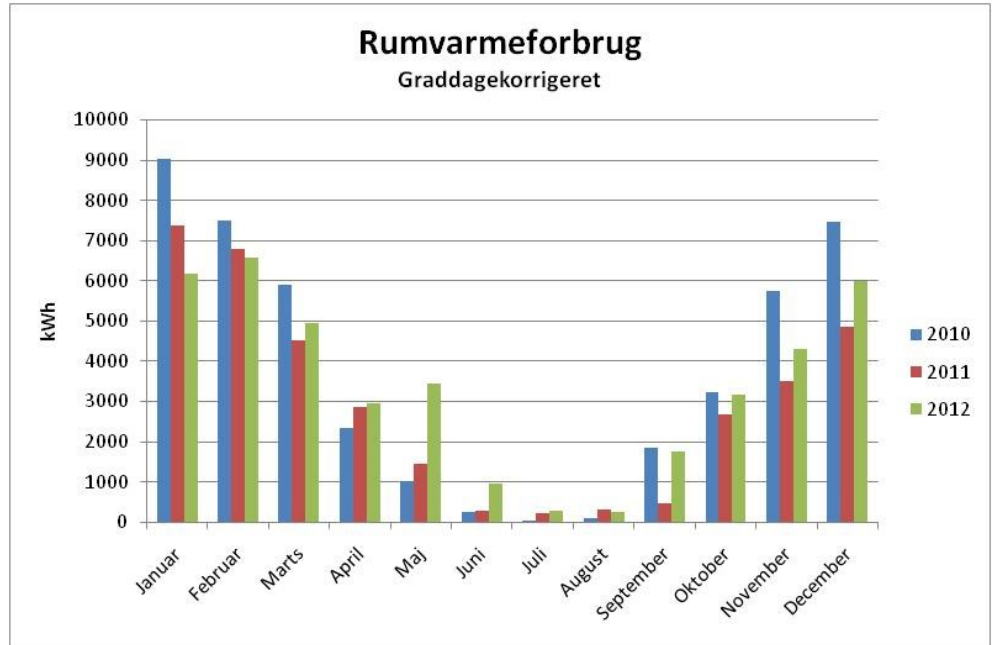
		Estimeret primære energiforbrug kWh/m ² pr. år	Aktuelt primære energiforbrug / VE prod. (jan.-nov.) kWh/m ²
Be06 forbrug	Pumper og automatik	2	0,29
	Belysning	7	13,98
	Ventilation	3	7,75
	Varmt brugsvand	4	0,59
	Rumopvarmning	14	43,62
	I alt	30	66,23
Standby + drift	Elevatore		1,78
		12	1,78

¹ Efter BR08, hvor el ganges med 2,5 og fjernvarme med 1.

Apparater	PC'er, printere, hårde hvidevarer etc.		37,38
		30	37,38
VE produktion	Solceller	20	19,82
	Varmepumpe, sæsonlager og solvarme	7	9,78
		27	29,59
	Totalt behov	72	105,39
	Importeret energi	45	75,8

Figur 5.7: Energiforbrug og VE produktion

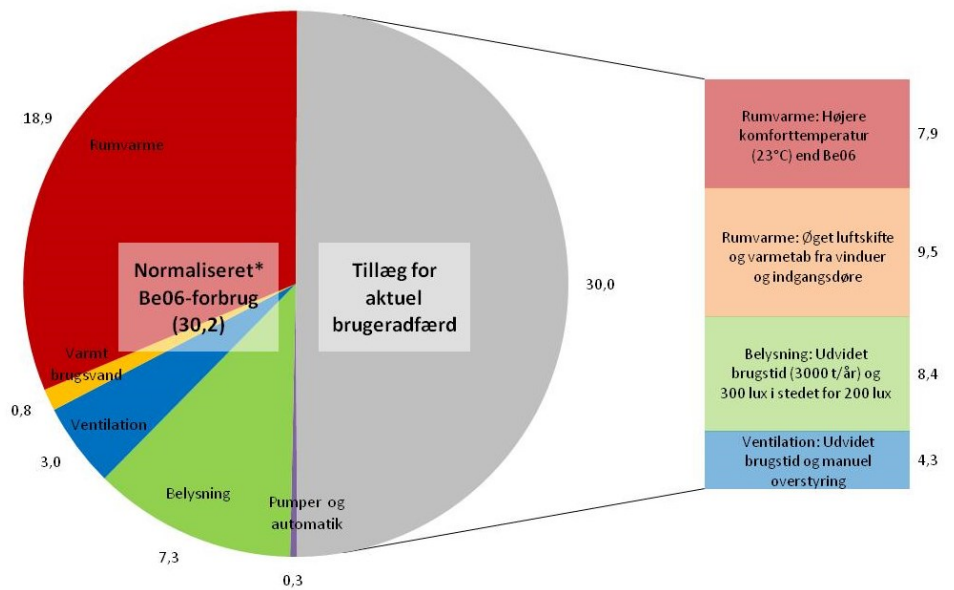
- VVS og automatik Energiforbruget til VVS og automatik har været meget lavt. Som det fremgår af Figur 5.7, udgør forbruget hertil ca. 25% af det forventede.
- Varmtvandsforbrug Energiforbruget til varmt vand samt cirkulationstab har ligeledes været meget lavt, hvilket må skyldes, at forbruget af varmt vand i en kontorbygning som denne ikke har været stort.
- El til belysning El til belysning har været højt i forhold til det beregnede på grund af øget brugertid.
- El til ventilation Elforbrug til ventilation har været højt i forhold til det beregnede på grund af øget brugertid.
- Varmeforbrug Varmeforbruget har været næsten tre gange så stort som det beregnede. Rumvarmeforbruget er på Figur 5.8 opgjort på månedsbasis for de første tre år. Det ses, at især det første år, 2010, har højere værdier end de efterfølgende to år, hvilket skyldes udfordringer i indkøringen. Men det ses også, at der er et større varmeforbrug i 2012 end i 2011. Især i maj og juni 2012 ser målingerne ud til at være markant højere, uden at det entydigt kan forklares hvorfor. Merforbruget af varme i maj, juni og september 2012 i forhold til 2011 udgør ca. 4 kWh/m² pr. år og kunne være en del af årsagen til det øgede energiforbrug. Noget af forklaringen på dette fænomen kunne være, at der er rykket nye brugere ind, som bruger huset på en anden måde og for eksempel bruger tagterrassen mere, hvorfor der er et større varmetab fra den åbne dør.



Figur 5.8 Rumvarmeforbrug for 2010, 2011 og 2012

5.3.3 Det normaliserede energiforbrug

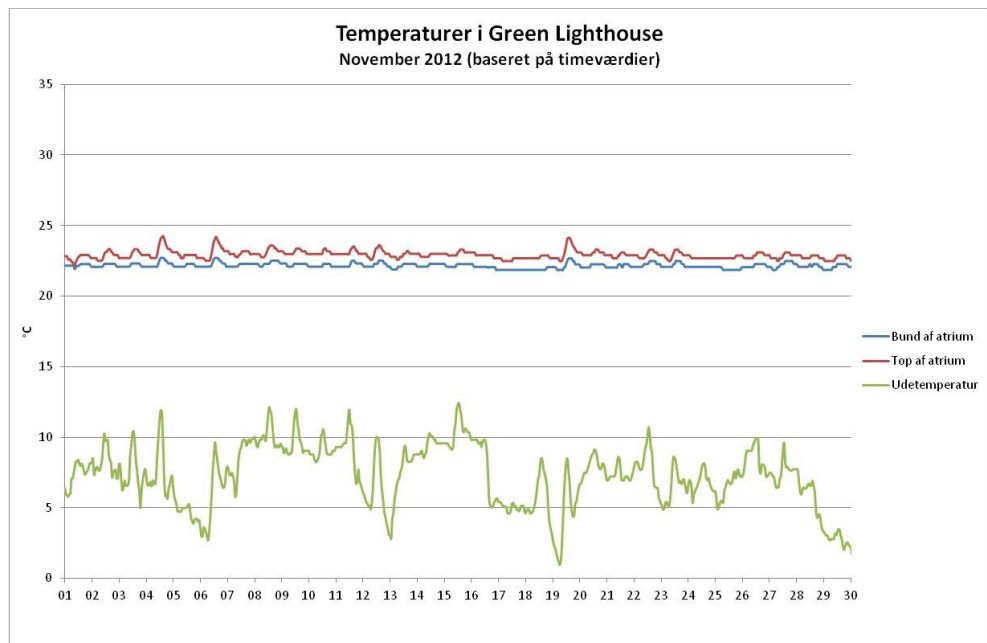
Da det målte energiforbrug, som er indeholdt i energirammen, har vist sig at være ca. dobbelt så stort som det beregnede (66 kWh/m²/år mod 30 kWh/m²/år), er det blevet analyseret og i Be10 korrigeret til aktuel drift. Figur 5.9 viser fordelingen af det i energirammen indeholdte energiforbrug samt de beregnede tillæg for aktuel brugeradfærd. De væsentligste faktorer er højere indetemperatur, forøget luftskifte og forøget brugstid.



Figur 5.9 Målt energiforbrug i Green Lighthouse i perioden april 2012 – marts 2012. Alle værdier er primært energiforbrug i kWh/m²/år og graddagekorrigeret

Højere indetemperatur

I Be10 benyttes 20°C som standardværdi for indetemperaturen. Hvis der ønskes en højere temperatur end dette, vil det føre til et øget energiforbrug. I Figur 5.10 ses temperaturen i toppen og bunden af atriet samt udetemperaturen ved Green Lighthouse i november 2012. Indetemperaturen har i gennemsnit ligget på ca. 23°C, hvilket er 3 gradere højere end standard og giver et forøget rumvarmeforbrug på 7,9 kWh/m²/år. I forhold til det beregnede forbrug på 14 kWh/m²/år er det en forøgelse på 50 %.



Figur 5.10 Inde- og udetemperaturer i Green Lighthouse

Forøget luftskifte

Handicapdøren ved siden af karruseldøren har været brugt uhensigtsmæssigt meget i forhold til den i beregningerne fastsatte infiltration. I og med at handicapdøren har været let tilgængelig og er placeret i bunden af atriummet har den været benyttet hovedsageligt af ikke-handicappede og ved hvert dørtryk er døren åben i ca. 30 sek. ad gangen. Dette faktum har skabt et meget stort luftskifte op igennem atriet med efterfølgende trækgener og større opvarmningsbehov til følge. Den forøgede infiltration er fastsat ud fra et skøn og resulterer beregningsmæssigt i et øget rumvarmeforbrug på 6,3 kWh/m²/år.

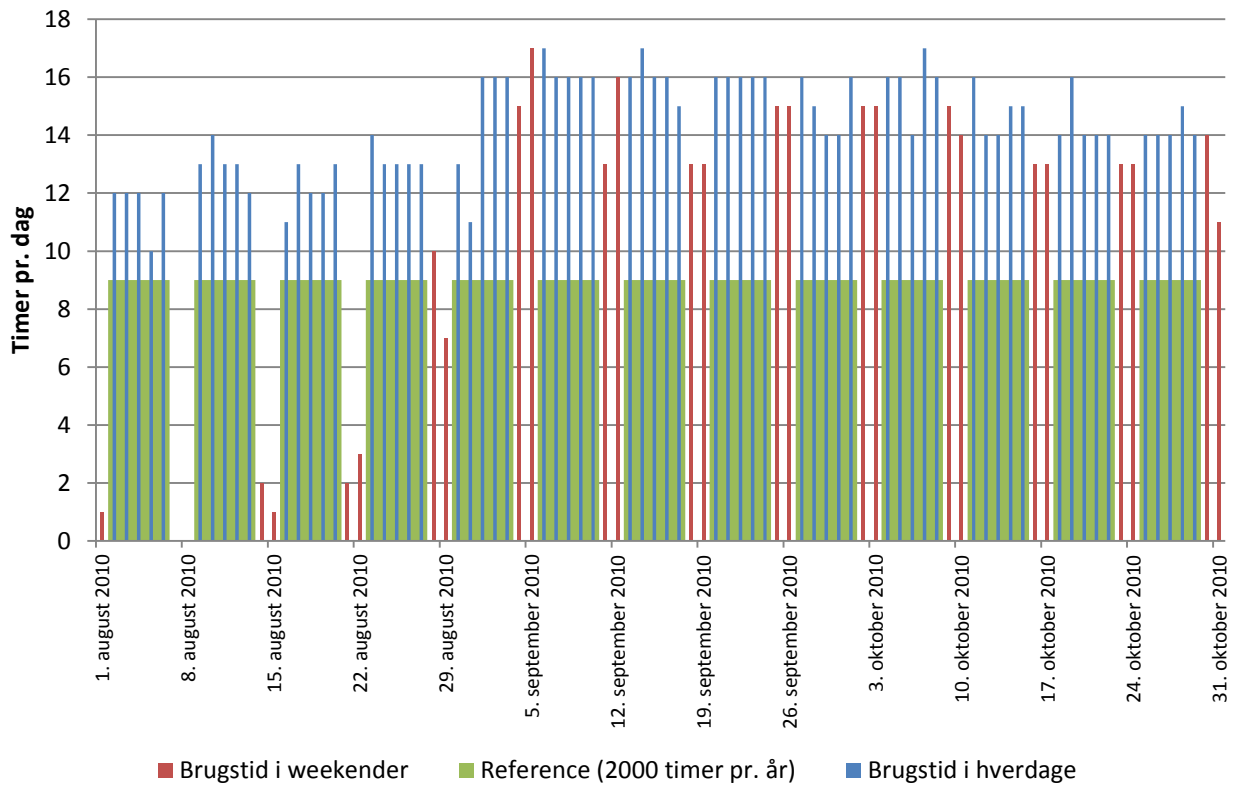
Erfaringen herfra må være, at et vindfang er af overordentlig stor betydning, når man har et rum med så stort volumen.

Udvidet brugstid

Én af årsagerne til det høje elforbrug til belysning og ventilation samt varmeforbrug er den udvidede brugstid af bygningen. I Be06 og den dertilhørende SBI-anvisning 213 antages en normal brugstid for kontorbyggeri at være 45 timer om ugen svarende til 9 timer om dagen i hverdage. Figur 5.11 illustrerer den forudsatte brugstid og den faktiske brugstid, og det ses, at brugstiden i gennemsnit er ca. 14 timer om dagen på hverdage og ca. 10 timer i gennemsnit i weekenden. Dette fak-

tum giver et forøget energiforbrug på i alt 12,2 kWh/m²/år til både ventilation og belysning.

Brugstid i Green Lighthouse - aug-okt 2010



Figur 5.11 Registreret brugstid i Green Lighthouse i august, september og oktober 2010

Højere lysintensitet

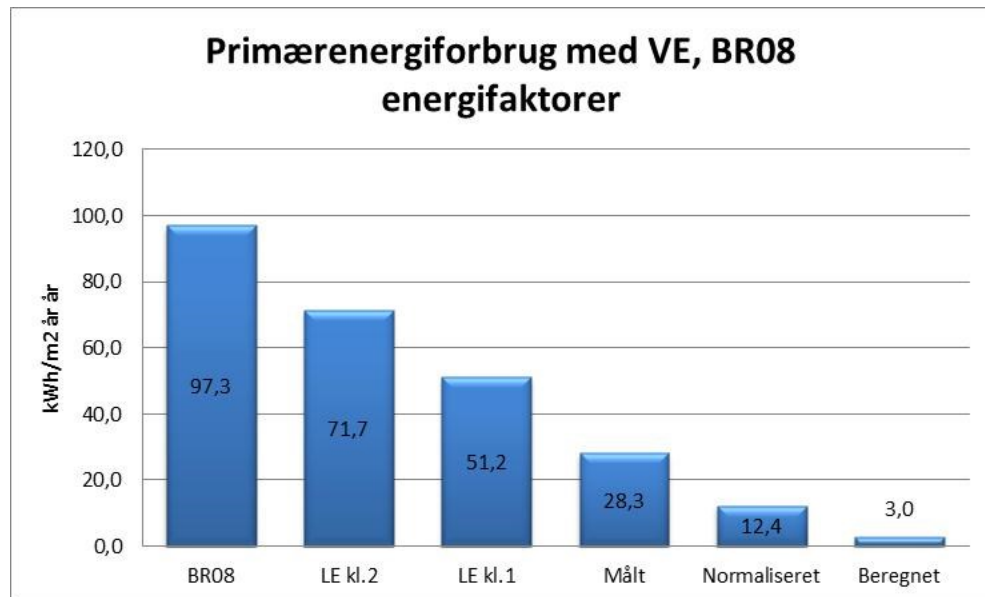
I Be10 antages et ønsket belysningsniveau på 200 lux som standard i kontorlokaler. Generelt set har brugerne haft et højere belysningsniveau på ca. 300 lux, hvilket ligeledes fører til øget energiforbrug. Det er dog en beskedne korrektion i Be10 på 0,5 kWh/m²/år på grund af det store dagslysfald.

Alt i alt kan 30 kWh/m²/år forklares ved ændret brugeradfærd i forhold til en standardbetragtning.

5.3.4 Sammenligning af energiforbrug

Green Lighthouse var udbudt på et tidspunkt, hvor bygningsreglementets minimumskrav til primærenergiforbrug var 97,3 kWh/m² pr. år for denne bygningskategori. Energirammen for den bedste lavenergiklasse (LE kl. 1) på daværende tidspunkt var 51,2 kWh/m² pr. år. Beregningsmæssigt lå bygningen på 3 kWh/m² pr. år under standard driftskonditioner.

Det målte energiforbrug viser et behov på omkring 28,3 kWh/m² pr. år, når man bruger de primærenergifaktorer², der var gældende på det tidspunkt, hvor bygningen blev opført.

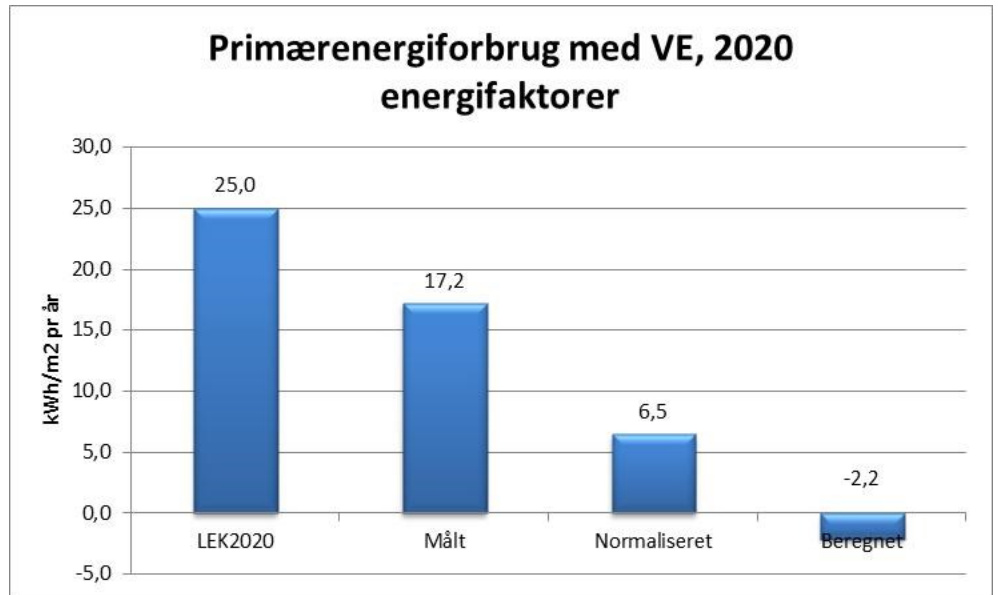


Figur 5.12 Normaliseret primærenergiforbrug sammenlignet med energirammer, målt og beregnet

Da bygningen blev opført, var et af kravene, at man skulle overholde de fremtidige krav til bygningerne i 2020. Disse krav var ikke kendt på det tidspunkt, så man gættede sig til kravene. Efterfølgende er der dog kommet en Bygningsklasse 2020, som er det krav, der vil blive stillet til bygninger i 2020. Der er blandt andet kommet nye primærenergifaktorer, som ændrer resultaterne en smule.

Bygningsklasse 2020 kræver, at man bygger til 25 kWh/m² pr. år. De målte værdier svarer til ca. 17,2 kWh/m² pr. år, og når man normaliserer med de samme elementer som ovenfor, er energibehovet ca. 6,4 kWh/m² pr. år. Det beregnede energiforbrug er ca. -2,2 kWh/m² pr. år, hvilket altså svarer til et plusenergihus.

² Primærenergifaktorerne er faktorer, som man ganger på energiforbrugene for at fortolke det reelle energiforbrug, der går til at producere en kWh. En kWh el har i BR08 en primærenergifaktor på 2,5, mens fjernvarme har en primærenergifaktor på 1.



Figur 5.13 Primærenergiforbrug med energifaktorerne gældende for bygningsklasse 2020

Nedenfor ses de normaliseringer der er lavet. Der er korrigeret for:

- › Færre graddage i 2012 end i normalåret, hvilket betyder, at det målte varme-forbrug er mindre, end det burde være i normalåret.
- › Højere rumtemperaturer. Der er et udbredt ønske hos brugerne om ca. 23°C i huset, hvorfor normaliseringen bruger dette.
- › Udvidet brugstid. Der er markant længere brugstid end standardbrugstiden i Be06 på 45 timer om ugen. Der er derfor normaliseret til 60 timers brugstid om ugen. Udvidet brugstid resulterer i flere brugstimer for alle bygningens installationer.
- › Øget infiltration. Der er et større luftskifte end forventet som følge af åbninger i facaden. Dette er fortrinsvis fra handicapdøren, der benyttes ganske meget, fra svingdøren og fra terrassedøren på 2. sal. Da der ikke er noget vindfang, skabes en stor skorstenseffekt i atriet, som medvirker til det øgede luftskifte.

Der er ud over dette et mindre ekstra energiforbrug, som ikke direkte kan forklares. Men mulige forklaringer kan være:

- › Ujævn intern belastning - altså at der i perioder er høje interne belastninger i visse rum og lavt i andre rum. Der kan derfor for eksempel være brug for ekstra ventilation i et møderum, fordi der er mange mennesker, mens der samtidig er varmebehov andre steder i bygningen. Be10 beregner hele huset som én zone, men virkeligheden er en anden.
- › Øget brugstid ud over det, der er normaliseret til.

- › Øget infiltration ud over den allerede medregnede, for eksempel fra åbning af vinduer. Der er vurderet en øget infiltration, men vurderingen er behæftet med stor usikkerhedsmargen, da infiltrationen ikke er målt.
- › Be10 regner formodentlig ikke korrekt nok til at kunne bruges på denne måde i en direkte sammenligning med målte data.
- › Det kan ses på måledata, at visse målere har udfald i perioder, hvor de giver samme resultat i en længere periode, f.eks. et par dage. Hvis der styres efter sådanne signaler, kan det give en fejlstyring. Desuden kan der også være fejl på energimålerne.
- › Der har været holdt et højere belysningsniveau end de 200 lux som antaget i beregningen.

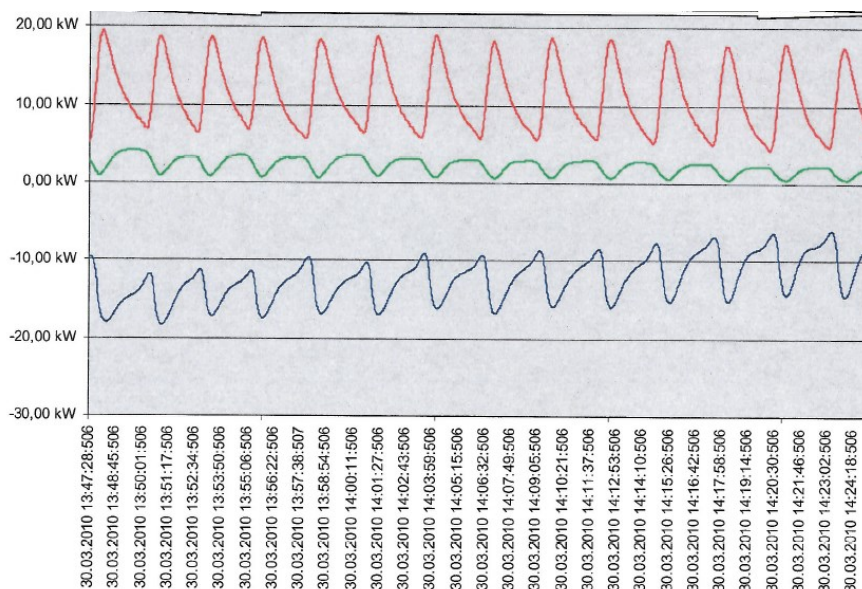
Der vil fremadrettet blive kigget yderligere på, om ventilationen af toiletterne kan etableres som et selvstændigt system, således at det centrale anlægs driftstid kan reduceres. Herigennem forventes energiforbruget til ventilation samt varmeforbruget reduceret.

5.3.5 Lessons learnt

Varmepumpe

Varmepumpen fra Sortech mistede sit vakuum på et tidspunkt - formentlig under transporten. Der foregik en servicering i foråret 2011, og siden da har den kørt uproblematisk. I januar og februar 2012 har varmpumpen været ude af drift, og derfor blev fjernvarmeforbruget i disse måneder større, end det ellers ville have været. Læren er, at en driftsaftale og løbende tjek af vakuum i begge kamre er vigtigt for kontinuert drift.

Der har endvidere været vanskeligheder med at få samspil i pga. 2 forskellige styresystemer (WindowMaster og Schneider)

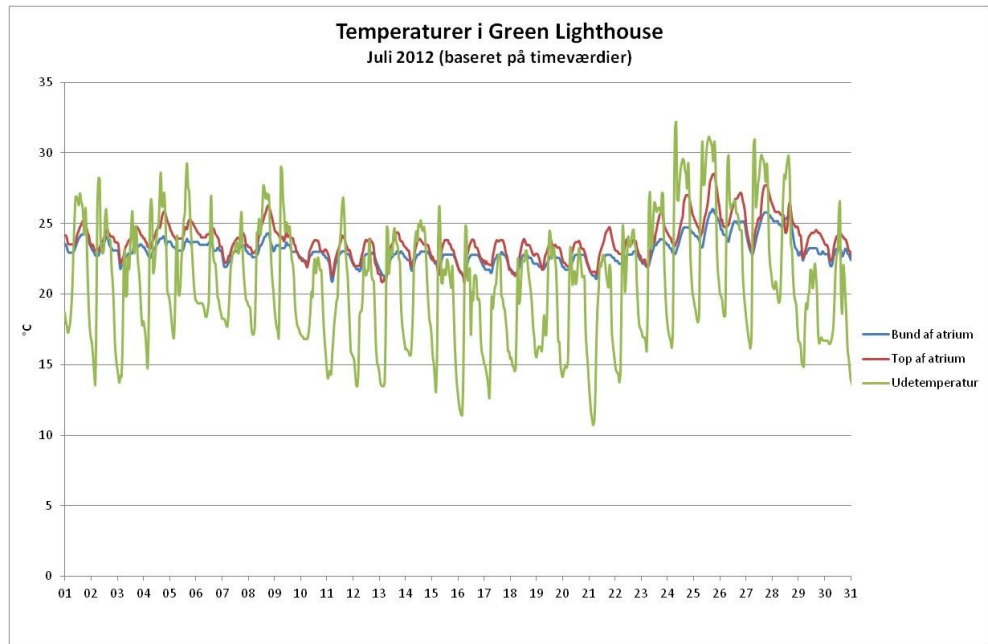


Figur 5.14 *Adsorptionsvarmepumpen i normal drift. Den røde kurve viser forbruget af fjernvarme, den grønne viser energi taget fra jordlageret og den blå summen af de to, nemlig den udnyttede varme. Her vist negativt, idet grafen er tegnet, som hvis det var et køleanlæg hvor varmen bortkøles i stedet for at nyttiggøres i lavtemperatur-opvarmningsanlægget*

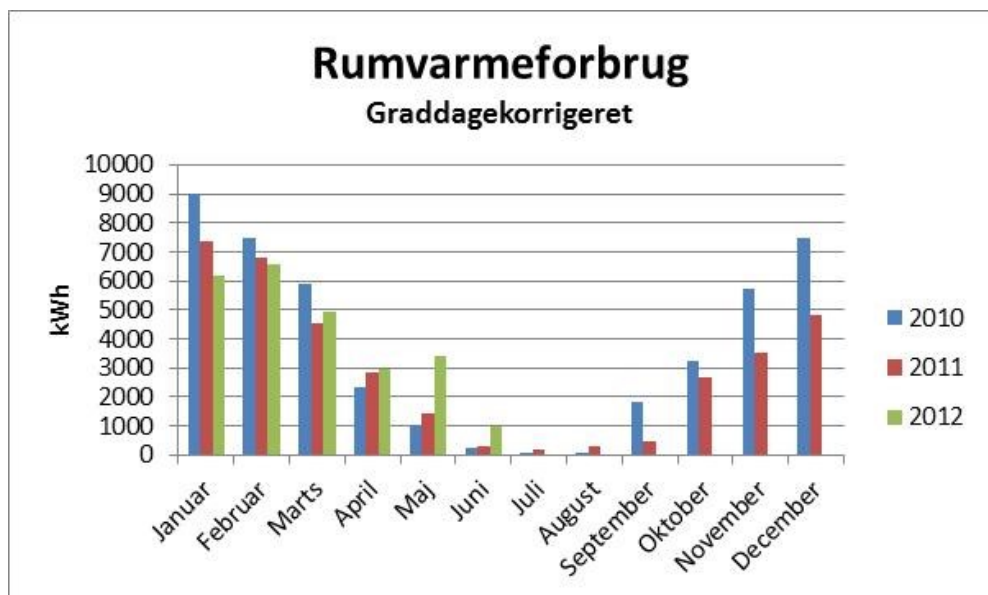
Køling

Der har ikke været klaget over for høje temperaturer i sommermånederne, hvilket er positivt, da udetemperaturerne har været oppe på 30°C de sidste tre år. Den mekaniske køling har ikke været tændt og alligevel har der kun været 53 timer over 26°C, hvor der maksimalt må være 100 timer ifølge europæiske indeklimanormer. Der var 14 timer over 27°C, hvor der maksimalt må være 25 timer. Dette må forklares med, at solafskærmning med styring, nattekøling og varmeakkumulering i PCM-materialet har været tilstrækkelig til at holde rumtemperaturen på komfortniveau.

Køledrift har været tilkoblet men maskinen har ikke været i brug selvom udetemperaturen i sommerperioden 2012 kom over 30°C. Se Figur 5.15.



Figur 5.15 Temperaturer i top og bund af atrium samt udetemperatur, juli 2012



Figur 5.16 Udviklingen i rumvarmeforbrug over året frem til efterår 2012, hvor husets anvendelse blev ændret

5.4 Erfaringer og anbefalinger til Viborg Rådhus

- › Vigtighed af afkøling primærsiden, fjernvarmevand bliver brugt to gange.
- › Følere til energimålere specielt på fjernvarmesiden har et dødbånd og for lang samplingstid til at give nøjagtige målinger, med de pendlinger der er i adsorptionsanlægget med ventiler der åbner i kort tid og kortvarigt sender store mængder af varmt vand igennem systemet.
- › Der er behov for flowbegrænsere og akkumuleringsbeholdere for at kompensere for disse fluktuationer i flow og temperatur på primær- og sekundærsiden af varmepumpen.

6 Viborg Rådhus

Viborg Rådhus, som stod færdig i efteråret 2011, er nyt rådhus for Viborg Kommune og har samlet kommunens funktioner fra en række kontorer i en markant bygning i Viborg. Henning Larsen Architects og COWI vandt efter en konkurrence opgaven for kommunen. Byggeriet var udbudt i fagentreprise og rådhusentreprenør var M.T. Højgård.

Bygningen er på i alt 19.360 m².



Figur 6.1 Viborg Rådhus



Figur 6.2 Viborg Rådhus med et stort centralt atrium ligesom i Green Lighthouse

6.1 Resume

Bygningen har som helhed være en succes med stor brugertilfredshed, lavt energiforbrug og har i store træk et godt indeklima.

Energimæssigt var det ambitionen at nå til den daværende lavenergiklasse I på 50 kWh pr. m² pr. år for bygningsdrift. Den sidste opgørelse, der er foretaget, viser et forbrug på 54 kWh pr. m² pr. år, som det fremgår af nedenstående tabel. Dette er opnået på trods af, at forsyningssiden med varmepumper kun har været i drift i en begrænset periode.

Tabel 6.1 Energiforbrug opgjort efter 8 måneders drift

Post	Total	Klimakorrigeret	Enhed
Varmebehov	28,4	34,7	kWh/m ²
El til bygningsdrift	7,5	7,7	kWh/m ²
Samlet energiramme (krav 50 kWh/m ²)	47,7	54,0	kWh/m ²
Ækvivalent energimærke (efter 8 mdr. data)	A1	A2	kWh/m ²

Forsyningsanlægget til Viborg Rådhus er opbygget med grundvandskøling og varmepumper, der trækker varme ud af grundvandet. Dette anlæg har vist, at det kan fungere efter hensigten, men har haft problemer med de væsentlige komponenter, grundvandsanlægget og indledningsvis de varmedrevne varmepumper.

6.2 Energikoncept og teknologier

Energikonceptet for Viborg Rådhus fremgår af Figur 6.3 og Figur 6.4.

Bygningen er opvarmet med termoaktive dæk, ved forvarmning af ventilationsluft og ved radiatorer placeret under vinduer, som i hovedsagen skal tage det kolde nedfald, der findes, selv om vinduerne er med 3 lag glas.

Køling sker også ved termoaktive dæk, foruden ved naturlig ventilation suppleret med køling af ventilationsluft i mødelokaler.

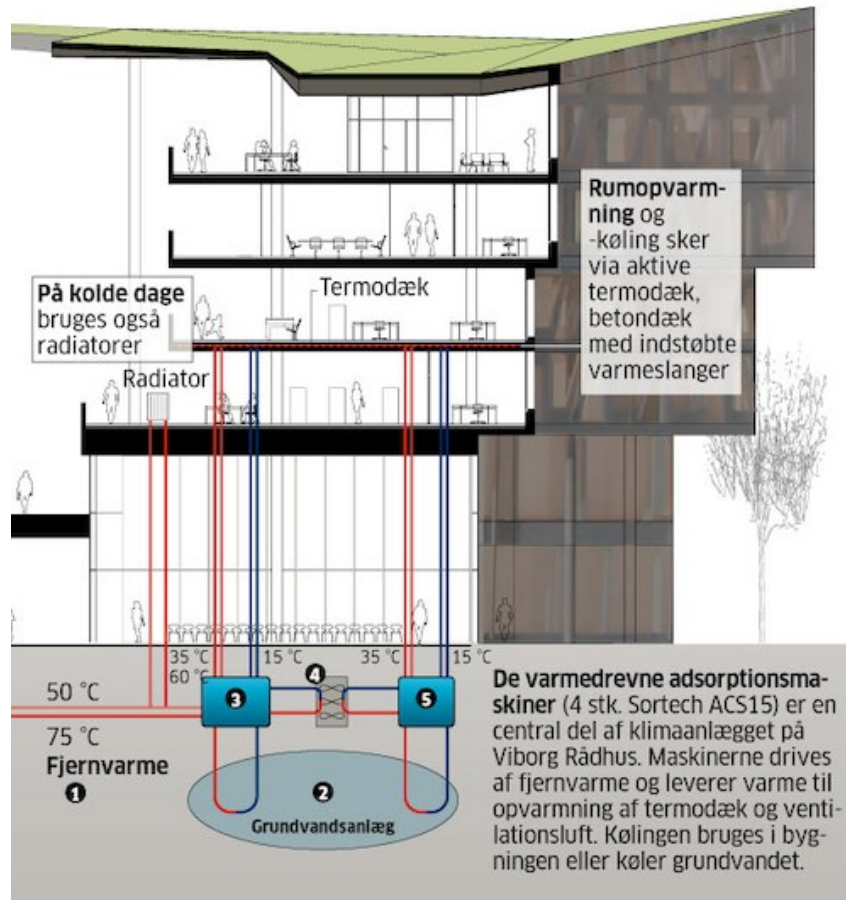
Desuden er der køling af serverrum med varmgenvinding.

Varmen leveres enten direkte fra fjernvarme, fra de varmedrevne varmepumper eller fra de eldrevne varmepumper, som begge henter varme i grundvandet.

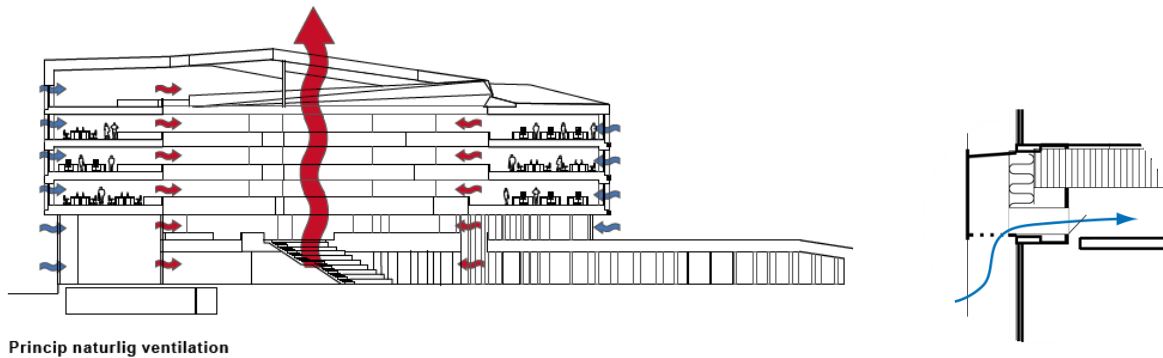
Køling leveres hovedsagelig fra grundvandskøling med kompressorkøling som backup, de samme maskiner kan også køre som varmepumper.

Der indgår følgende hovedkomponenter i energiforsyningen:

- › Fjernvarmen bruges til at drive adsorptionsmaskinen (3) og til radiatorer.
- › Adsorptionsmaskiner: 4 x 15 kW køl. Kører som varmepumpe drevet af fjernvarme. Maskinerne er placeret i bygningens kælder og leverer varme til de termoaktive dæk og til opvarmning af ventilationsluft (ikke vist). Den kolde side bruges til køling eller køler grundvandet (2).
- › Eldrevne kølemaskiner på 2 x 180 kW. Kører som backup køling, hvis grundvandsanlægget ikke er tilstrækkeligt eller ikke er i drift. Bruges også som varmepumper, når de kan levere billigere varme end adsorptionsmaskinerne.
- › Tørkøler, som kun bruges ved spidslastkøling med kompressorerne. Er placeret på rådhusgrunden.
- › Grundvandsanlæg med tre 90 meter dybe filtersatte vandboringer på rådhusgrunden, bruges til køling og som varmekilde til varmepumperne.
- › Buffertanke. Der er tre buffertanke, hvilket delvist er begrundet i, at adsorptionsmaskinerne kører i cyklus på små 10 minutter, hvor temperaturer og flow svinger meget, dels også i at det giver en nemmere styring.
- › Solceller placeret på overdækning til P-pladser. I alt 760 m².



Figur 6.3 *Energikoncept for Viborg Rådhus*



Figur 6.4 *Naturlig ventilation Viborg Rådhus. Til højre er vist, hvordan den friske luft fra vinduerne ledes op og fordeles over det nedhængte loft så varmeakkumulering udnyttes*

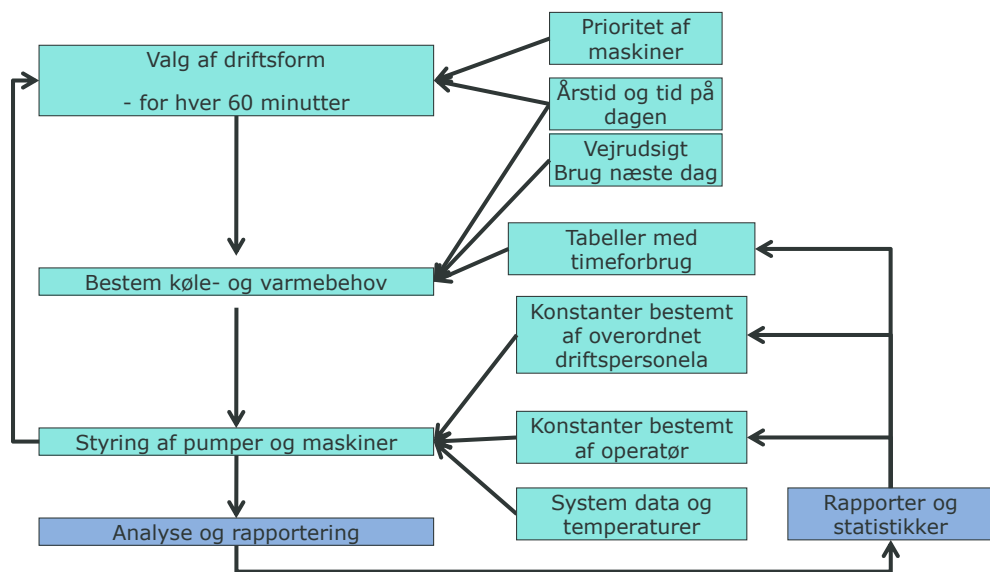
6.2.1 Styring af drift og valg af maskiner

Anlægget i Viborg Rådhus kan køre i forskellige driftsformer, og det er en del af CTS-styringen at vælge den optimale driftsform. Valget af driftsform foretages hver hele time og sker på grundlag af data for klima og forbrug samt data vedrørende anvendelse, som driftspersonalet kan definere. Se Figur 6.5. Desuden indgår

der fejlmeldinger, der enten er kommet fra en maskine, der går i fejl, eller er indsat af driftspersonalet. Hvis for eksempel adsorptionsmaskinerne er ude af drift, sættes dette ind, og valget af driftsform tager derefter hensyn til det og vil så for eksempel vælge eldrevet varmpumpe.

Grundlæggende er valget naturligvis afhængigt af om, der er opvarmning, og om der er brug for radiatorer. Endvidere indgår der i planerne, at valget mellem varme og eldrevet varmpumpe skal afhænge af de øjeblikkelige priser på el og varme. Dette er dog endnu ikke aktuelt, men anlægget er på den måde "forberedt" på det fleksible marked eller smart grid, som det bredt kaldes.

Et grundlæggende princip for styring er en form for behovsstyring. Varmepumperne styres efter behovet og ikke efter at opretholde en bestemt temperatur.



Figur 6.5 Princip for styring af energianlæg Viborg Rådhus

6.2.2 Monitorering

Anlægget er udstyret med ret omfattende målesystem med temperaturmålinger, energimålinger, klimadata mv. Disse data opsamles af CTS-anlægget og er tilgængelige for styring af anlægget. Det er muligt at få historiske data med minuttværdier siden anlæggets opstart. Der har ikke været væsentlige problemer med dette, og projektet er et godt eksempel på, at der med kun et system kan opnås bedre funktioner end i Green Lighthouse, hvor forskellige systemer skal spille sammen.

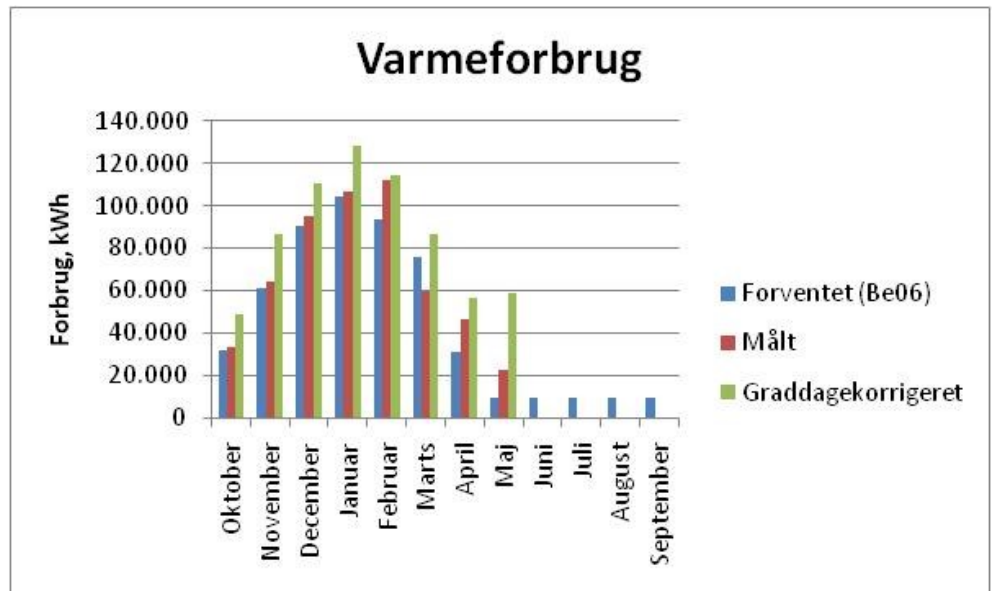
6.3 Målinger og resultater

Dette afsnit handler om de overordnede resultater vedrørende energiforbrug. De specifikke forhold vedrørende adsorptionsmaskinerne fremgår af afsnit 7.

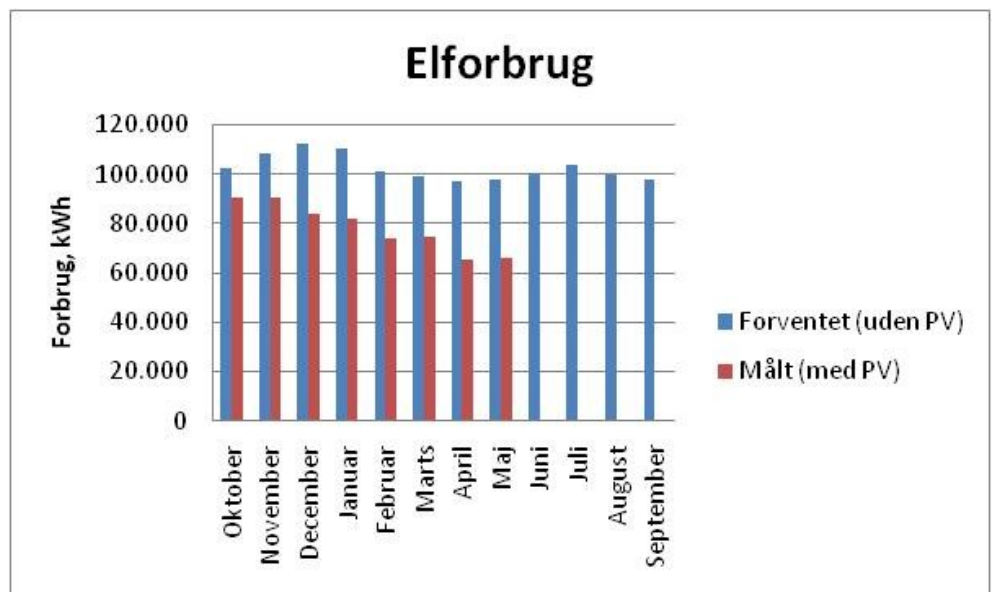
Både elforbruget og varmemeforbruget har været tilfredsstillende lavt, som det fremgår af Figur 6.6, Figur 6.7 og Figur 6.8. Varmeforbruget har været lidt højere, især forår/efterår. Dette skal ses i lyset af, at indregulering har pågået, og der har været

perioder med relativt høje temperaturer. Elforbruget har været cirka som forventet og lavere end forventet, når der tages hensyn til solcellerne. Solcellerne var ikke regnet med fra starten.

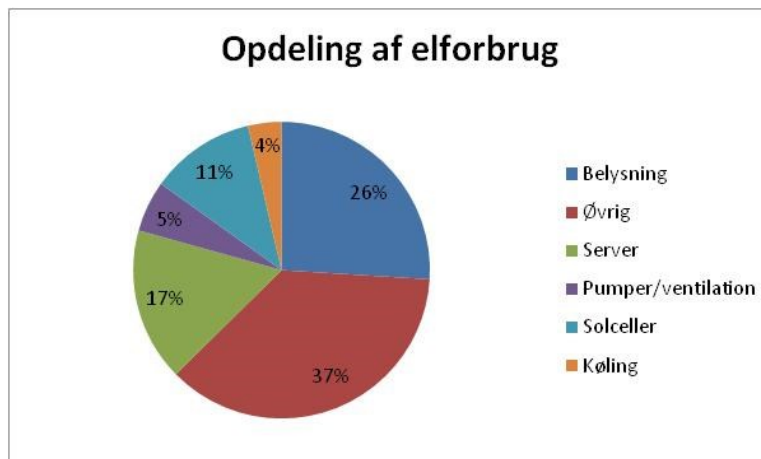
Som nævnt har de specielle funktioner med varmepumpedrift ikke påvirket denne periode, og det forventes derfor, at energiforbruget vil falde til under det forventede, og at bygningen således samlet vil være bedre end lavenergiklasse 1.



Figur 6.6 Varmeforbrug i Viborg Rådhus i perioden oktober 2011 til maj 2012, målt sammenlignet med beregnet



Figur 6.7 Elforbruget i Viborg Rådhus i perioden oktober 2011 til maj 2012, målt sammenlignet med forventet



Figur 6.8 Opdeling af elforbruget i Viborg Rådhus

Tabel 6.2 Energiforbrug kWh/m² pr. år målt sammenlignet med kravet på 50 kWh/m² pr. år

Energiforbrug (kWh/m ² p.a.)	Målt total	Målt Klimakorrigeret
Varmebehov	28,4	34,7
El til bygningsdrift	7,7	7,7
Samlet energiramme (Krav 50 kWh/m ² pr. år)	47,7	54,0

Tabel 6.3 Opgørelse af de samlede udgifter til energi i referencen og i Viborg Rådhus

Årlig energiomkostning (kr.)	Reference	Faktisk	Klimakorrigeret
Hvis almindeligt nybygget kontorbygning efter BR08	2.250,000	1.730,000	1.840,000
Besparelse kr./år	-	520,000	410,000

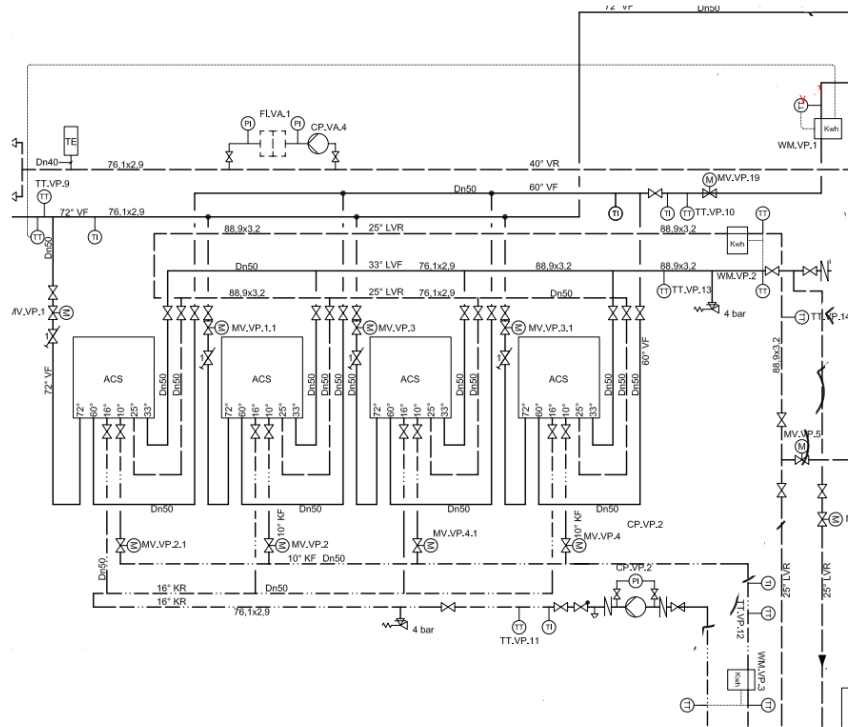
7 Målinger af adsorptionsvarmepumpen

I dette afsnit gennemgås nogle af de specifikke målinger, der er foretaget på adsorptionsvarmepumpen i de to anlæg.

Der er installeret en stor mængde energimålere i varmesystemet på Viborg Rådhus med henblik på at muliggøre beregning af varme- og energibalancer for systemet samt sikre, at den tænkte driftssituation er opnået.

Den termiske opkobling af en ADS (adsorptionsvarmepumpe) består af tre strømme:

- 1 Højtemperatur-flowet (HT), der driver køle/varmepumpeprocessen, varme tilføres.
- 2 Det kolde flow (LT), hvorfra varme tilføres ved lav temperatur.
- 3 Mellemtemperatur-flowet (MT), hvor den samlede varmestrøm bortledes.



Figur 7.1 Opkoblingen af de fire ADSer på Viborg rådhus med de tilhørende energimålere (WM.VP.x)

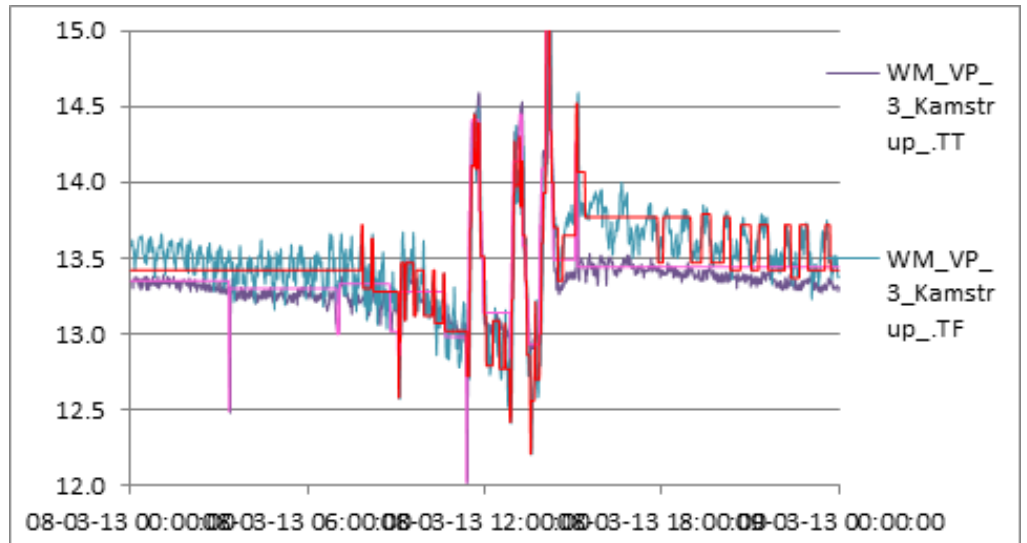
De tre termiske strømme er ikke flowmæssigt adskilte. Internt i ADSen foretages en varmegenvinding i forbindelse med de periodiske skift mellem adsorption og regenerering. Dette sker ved omskiftning af ventiler i HT- og LT-kredsene, hvilket åbner for flow mellem disse systemer.

7.1 Kold side af ADSerne

Afkølingen over ADSerne er overraskende lille, hvilket kan skyldes tre forhold:

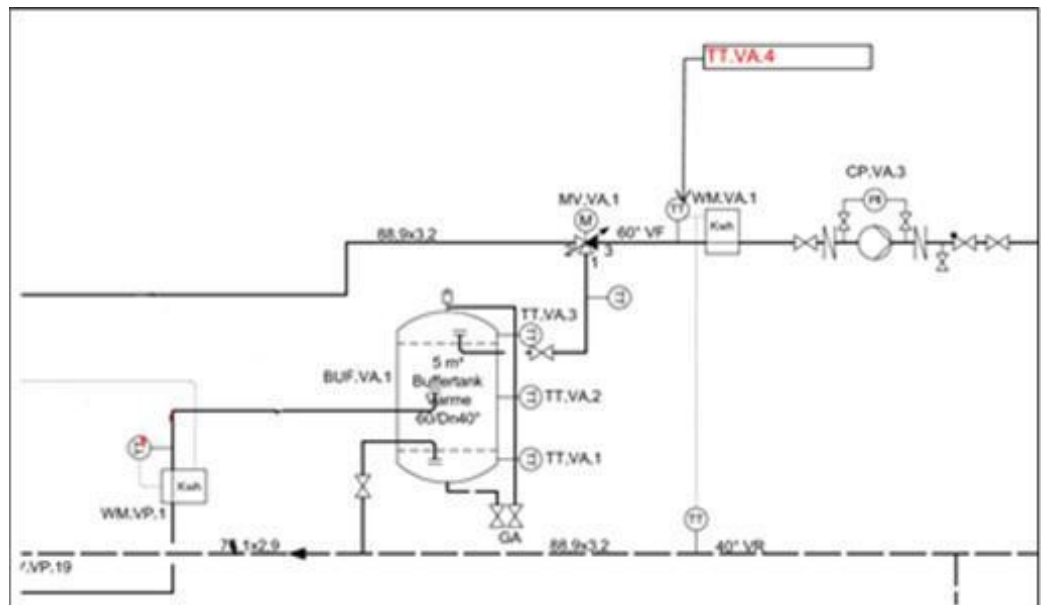
- › Manglende køling fra ADSerne
- › Højt væskeflow
- › Fejl på målesystemet.

Af Figur 7.2 ses, at der er overensstemmelse mellem temperaturerne målt i energimåleren WM.VP.3 og de tilhørende selvstændige målere. De ses også, at dødbåndet på de selvstændige målere er for højt i forhold til temperaturforskellen. Dette fører til "krydsende kurver" i nogle tidsrum. Undersøgelsen baseres derfor på målingerne med energimåleren.



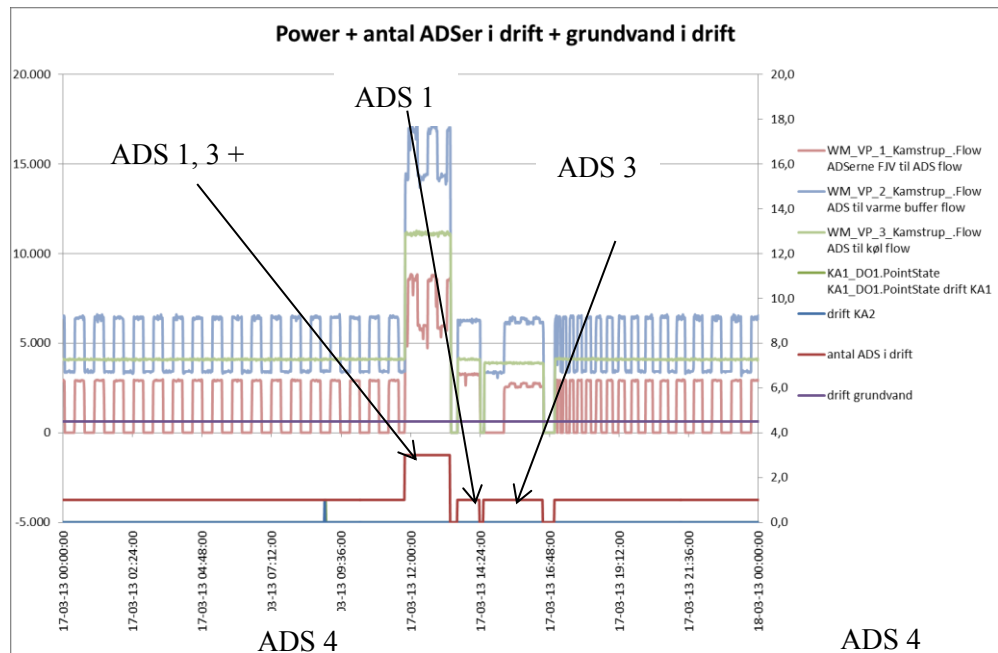
Figur 7.2 Kold side af ADSer: Sammenligning af temperaturmåling på energimåler (WM...) og selvstændige følere (TT...)

Som beskrevet har ADSer en cyklisk drift, hvilket fører til en vis variation i varmeaftag og køleydelsen og dermed afkølingen. Den største svingning ses på den høje temperatur. For at begrænse svingninger er der benyttet buffertanke.



Figur 7.3 PI diagram for buffertank

7.2 Karakteristik for ADSer

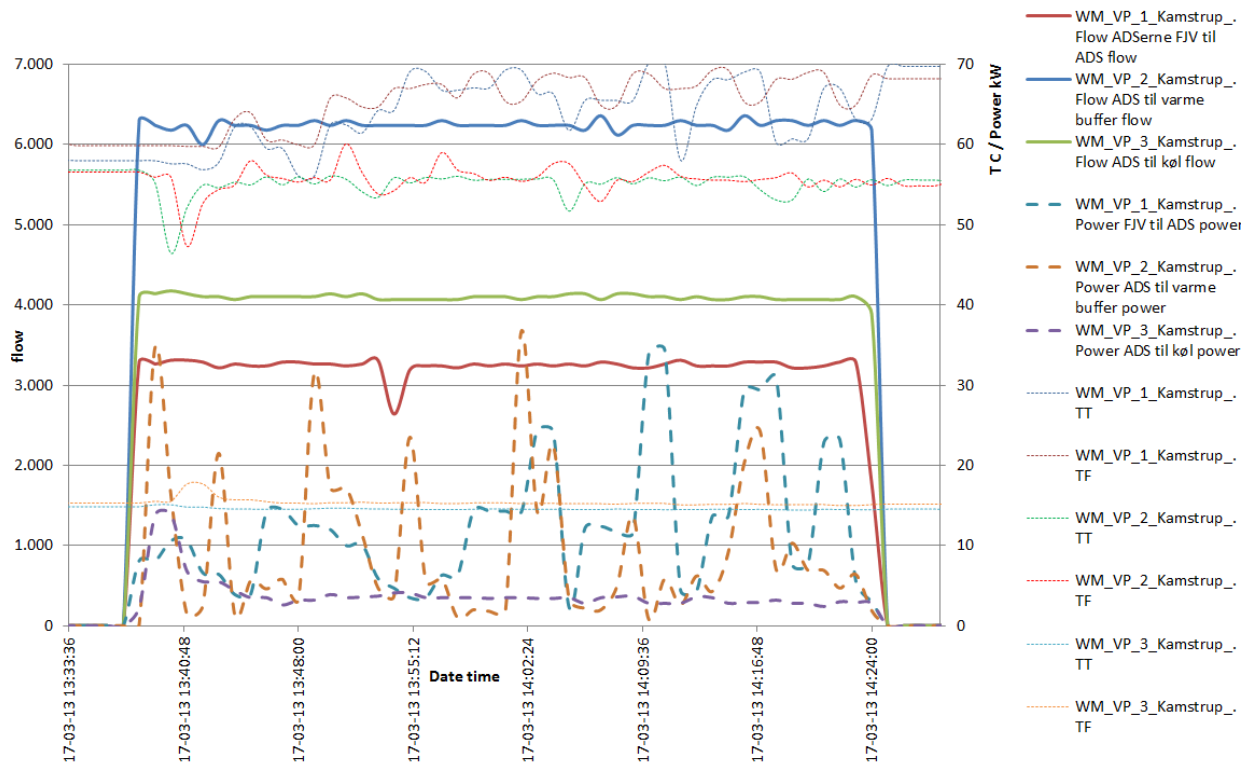


Figur 7.4 Drifts karakteristisk af de enkelte ADS-maskiner, vist som flow

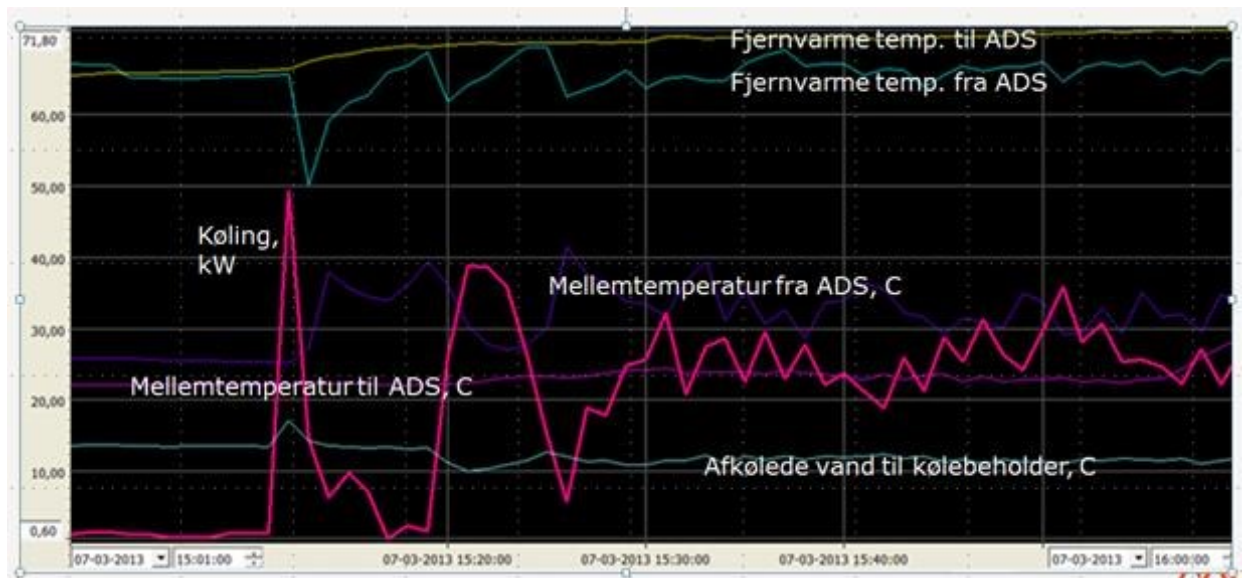
I Figur 7.4 ses stor forskel i flowreguleringen på de tre ADSere, der er i drift. ADS 1 har et meget jævnt flow, der tilsyneladende ikke varierer, mens ADS 4 har ganske store variationer i HT- og MT-flowet. Variationen er cirka samme størrelse, men mens HT-flowet varierer mellem ca. 2.600 og 0 l/h, svinger MT-flowet mellem ca. 3.400 og ca. 6.300 l/h. ADS 3 har også en ret stabilt flow, men med en smule af samme svingende natur som ADS 4. I perioden, hvor alle tre ADSer er i drift, ses, at flowet svarer til summen af de tre enkelte flow. Der ses dog lidt mere støj, som skyldes, at maskinerne ikke kører synkront.

Figur 7.5 viser driftsdata for ADS 1 i detaljer. Heraf ses det, at temperaturforskellene på de tre flow er ganske små, hvorfor usikkerheden er stor, da de anvendte energimålere ikke er konstrueret og kalibreret til så små differenser (samlet 5% usikkerhed på energimålingen ved 3K temperaturdifferens og kraftigt stigende ved mindre differens). Dette, kombineret med det faktum, at der er en forsinkelse mellem temperaturstigning på til- og afgang af ADSen, forklarer også en del af de store udsving i effekten ("Power") på HT- og MT-flowene. Effekten på LT-siden er derimod meget stabil (men stadig med stor usikkerhed på størrelse).

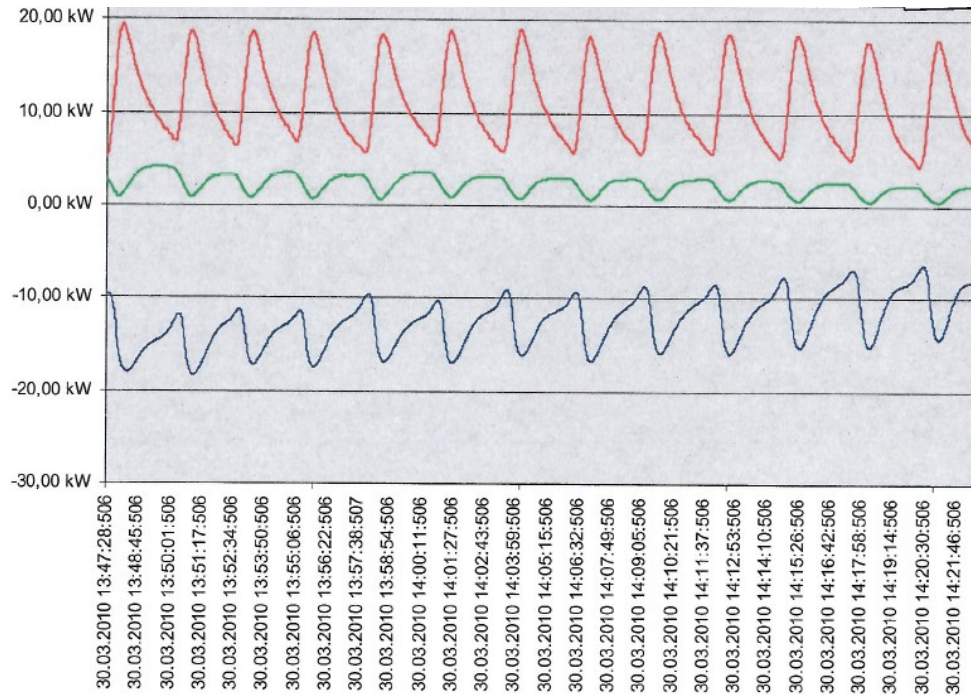
Beregnes der, i det viste driftstidsrum, et aritmetisk gennemsnit for de tre effektstrømme, fås HT: 3,4 kW, LT: 4,1 kW og MT: 9,8 kW. Dette giver en fejl på varmbalancen på $(9,8 - 7,5)/9,8 = 10\%$, hvilket er acceptabelt. Tillægges differencen på 2,3 til HT-siden, bliver denne 5,8 kW. (Da HT er mest svingende, er det denne måling, som bliver fejlbehæftet på grund af træghed i følere). På baggrund af ovenstående gennemsnitsværdier kan $COP_{køl}$ beregnes til $4,1 / 5,8 = 0,7$, hvilket er højt og behæftet med usikkerhed. Ifølge databladene for Sortech ACS 15 kan man under standard konditioner kan forvente $COP_{køl} = ca. 0,6$. COP_{varme} under de aktuelle forhold kan man jf. datablad forventes at 1,2-1,3.



Figur 7.5 Detaljerede driftsdata for ADS 1 på Viborg Rådhus

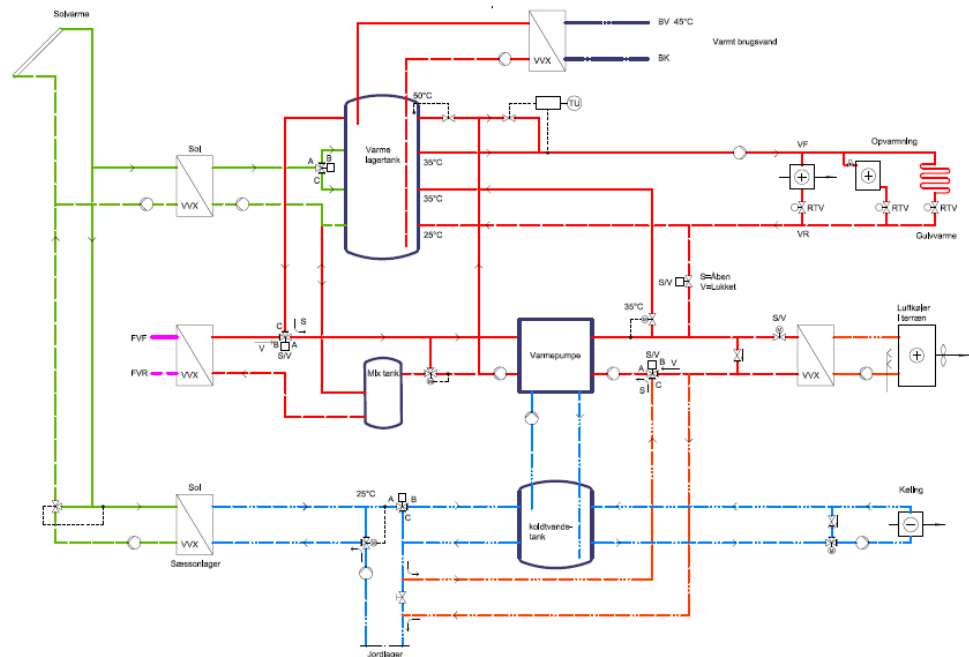


Figur 7.6 Driftsdata i Viborg for en periode med tre adsorptionsmaskiner i drift. Det ses, at maskinerne tilsammen i en periode producerede mellem 20 og 30 kW køl. De tre maskiner kører ude af takt, således at produktionen udjævnes



Figur 7.7 Adsorptionsvarmepumpen i Green Lighthouse. Den røde kurve viser forbruget af fjernvarme, den grønne viser energi taget fra jordlageret og den blå summen af de to, nemlig den udnyttede varme. Her vist negativt, idet grafen er tegnet, som hvis det var et kølanlæg, hvor det optagne varme bortkøles

I Green Lighthouse er varmebehovet sjældent over 5-10 kW, hvilket betyder, at varmen må lagres i varmeakkumuleringstanken. Lagringsevnen og driftstiden afhænger af, hvor stor afkøling man kan opnå på varmeanlægssiden.



Figur 7.8 Principskemaet på Green Lighthouse

8 Bilag

Adsorptions chillere status 2013.

Interessen for at udvikle adsorptions chillere er fortsat meget stor hvilket mængden af publicerede artikler vidner om. De udvalgte 4 i appendiks gengiver udmærket det helt overordnede i baggrunden for den store interesse. Adsorptions chillerne kan levere køling anvendende spildvarme, og dette med en enkel proces der desuden kan opnås på udstyr uden anvendelsen af miljø farlige råvarer og produkter.

De vidner også om at de til dato opnåede COP værdier (køleydelse i kW per forbrugt spildvarme i kW) er lavere end hvad absorptions systemer præsterer. Stadig er det dog muligheden for anvendelsen af spildvarme ved lavere temperaturer der gør adsorptions processen interessant.

Som artiklerne ligeledes gengiver, er det stadig Silica gel / vand processen der er den fremherskende, om end Zeolit / vand er kommet til. Som det var klart fra starten i dette projekt, skulle og skal prisen på adsorptions chillerne ned, og de skal desuden udvikles således at de kan opbygges indenfor mindre fysiske rammer, og med lavere vægt.

Der forskes derfor i udformningen af vekslerne og valget af typen af Silica gel henholdsvis Zeolit, samt i mulighederne for at blande disse med varmeledende materialer, og øge varmeledningen ved udformningen af varmevekslernes overflader og Silica gel / Zeolit binding til disse.

Er der slet ikke sket noget i de år. Jo maskinerne er blevet mindre, og COP opnået er steget en smule.

Industrien

I dag er der lidt flere fabrikanter på markedet; selvom de stadig er koncentreret omkring Japan og Tyskland.

Mayekawa præsenterede sin nye række af adsorptions chillere med Zeolit, hvilket betød mindre vægt, mål, og pris samt lidt højere COP. Efterfølgende er det kommet

frem offentligt at Zeolit løsningen er baseret på et samarbejde med Mitsubishi Plastics. Profileringen er stadig lav.

Nishiyodo maskinen synes at være genopstået to steder; dels hos Union Industry Co.Ltd. , 3-33Nanochō, Toyame-shi, Toyame, Japan, og så hos Weatherwrite Manufacturing (www.weatherwrite-manufacturing.com) i England. Firmaet Emissionless i Australien er ud fra deres hjemmeside meget aktive med denne maskine. Weatherwrite-Manufacturing er ligeledes ud fra deres hjemmeside aktive; men desuden har de deltaget aktivt i det ene i Ph.D. opgaven ved Birmingham University listet i appendiks 1. Union Industry Co. Ltd. Har tilsvarende i samarbejde med Mitsubishi Plastics udviklet en lille Zeolit maskine med indbygget køletårn, som Mitsubishi Plastics der leverer Zeolit materialet til den har test markedsført i U.S.A. siden 2012, uden at resultat heraf er kendt.

Mitsubishi Plastics markedsfører selv en lille maskine uden køletårn, og de fremfører på deres hjemmeside en meget stor tro på mulighederne for adsorptions køling anvendende deres zeolit, ikke kun i chillere, men også til systemer med roterende vekslere for luftaffugtning.

I Tyskland får både Sortech og InvenSor den ene hæderspris efter den anden af tyske brancheforeninger, og interesseorganisationer. De har begge stadig flere referencer, der gengiver at anvendelsen er størst sammen med solenergi og små decentrale kraftvarmesystemer.

SorTech AG fik i 2011 Stiebel Eltron ind som aktionær, og meddelte i juli 2012 at to venture fonde henholdsvis Munich Venture Partners og UnternehmerTUM Fund havde foretaget investering i SorTech til udvikling af SorTech's næste generation Zeolit adsorptions maskine, og derefter præsenterede de i marts 2013 en ny fremtidig teknologi for Zeolit coating, hvilken de kalder PST for Partial Support Transformation. Hele udviklingen i dette selskab som det er beskrevet på deres egen hjemmeside, sammen med selskabets økonomiske udvikling vidner om et meget produkt udviklings orienteret firma hvis produkt udvikling er under fortsat udvikling; samt en stor tro på fremtidige muligheder.

InvenSor GmbH har ud fra deres hjemmeside en mere pragmatisk produkt udvikling med fokus på styringer og applikationer; hvilket dog ikke har givet færre hædersbevisninger. Selskabets økonomiske udvikling gengiver dog også at der er tale om et selskab i opbygning med resultater der kun kan accepteres med baggrund i en tro på en fremtidig positiv udvikling.

Sammen har de to selskaber med understøtning fra andre interessenter dannet Green Chiller Association for Sorption Cooling. <http://www.green-chiller.de/indexeng.php>.

Konklusion:

Der er en stadig udvikling og høj interesse for adsorptions chillere blandt Institutter med fokus på reduktion i CO₂ udslip af hensyn til den globale opvarmning. Producenter af udstyret er ændret lidt, de små er blevet lidt større men produkterne er stadig niche produkter, og der er en erkendelse af at der skal betydelige teknolo-

giske fremskridt der kan give mere kompakte og billigere løsninger frem inden adsorptions chillerne bliver betragtet for bredere anvendelse.

Greve 2013.05.27

Søren Gram, Svedan

Litteratur.

1. Bakker, E.J.; Boer, R. de; Smeding, S.F.; Sijpheer, N.C.; Pal, M. van der; Development of an innovative 2.5 kW silicagel-water adsorption chiller ECN-M--11-043 mei 2011; 8 pag. Presented at: 10th IEA Heat Pump website conference, Internet, 27 juni 2011-31 august 2011.

2 Rezk, A.R.M.: Ph.D. thesis at University of Birmingham, July 2012: Theoretical and Experimental Investigations of silica gel/water adsorption refrigeration systems.

3 Sarka D.; Tiwari S.N.; Yadaw A.; Choudhyry B.: Development of a Solar powered adsorption chiller, in International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, special issue 3, ICERTSD Feb 203 page 382-388
 4 Solares Kühlen Adsorptionsprozess (PDF - 560 KB) Detaillierte Informationen über den Adsorptionsprozess mit grafischer Darstellung. Das Europäische Zentrum für erneuerbare Energie Güssing, Österreich
 5 Arnoldsson J.: Adsorption Chillers uptaken af Ethanol on type RD Silica gel, Examensarbete LIU-IEI-TEK-C—12/00362-SE, Institutionen för ekonomisk och industriell utveckla, Linköping Universitet.