

**ELFOR PROJEKTNR.: 335-6**

## **NATKØLING I BYGNINGER**

### **Optimering ved anvendelse af lokale vejrprognoser**

Rapport, 2009-03-03

**ELFOR PROJEKTNR.: 335-6**

## **NATKØLING I BYGNINGER**

### **Optimering ved anvendelse af lokale vejrprognoser**

Rapport, 2008-03-03

Revision : 0  
Revisionsdato :  
Sagsnr. : 18045  
Projektleder : Ejl  
Udarbejdet af : Ejl/RGD  
Godkendt af : Ejl

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Forord .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Indledning og resumé.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Forundersøgelser.....</b>	<b>6</b>
4.1	Internationale undersøgelser.....	6
4.2	Bygningsfysiske forhold .....	8
4.3	Lagring og afgivelse af varme/kulde i bygningskonstruktionen .....	8
4.4	Lokale vejrprognoser .....	9
<b>5</b>	<b>Analyse af energibesparelspotentialet.....</b>	<b>17</b>
5.1	Edb-modeller .....	17
5.2	Energiforbrug ved forskellige driftsformer .....	18
5.3	Indeklimatiske betragtninger .....	23
<b>6</b>	<b>Simuleringer med BSim2002.....</b>	<b>25</b>
6.1	Beregningsmodellen.....	25
6.2	Beregninger .....	27
<b>7</b>	<b>Bilag.....</b>	<b>28</b>
7.1	Vejrprognoser .....	28
7.2	Tavlenoter fra opstartmøde.....	39
7.3	Uddrag af mødereferater .....	40
7.4	Paper til BS 05 .....	48

## 1 Forord

I moderne kontorbygninger er den interne varmelast så stor, at det er vanskeligt at undgå køling for at holde rumtemperaturen nede på et acceptabelt niveau om sommeren. Elforbruget til kølemaskiner er derfor voksende.

For at spare energi til køling af ventilationsluften, er mange bygninger og ventilationsanlæg projekteret med udnyttelse af natkøling, hvor bygningens masse køles ned ved gennemventilering med udeluft om natten eller ved anvendelse af frikøling i køleanlægget. Derved reduceres behovet for køling senere på dagen, når udetemperaturen er for høj til at de ovennævnte metoder kan anvendes.

Denne nedkøling af bygningen om natten medfører imidlertid, at rumtemperaturen ved arbejdstidens begyndelse kan være ubehagelig lav for de personer, der skal opholde sig der. For at undgå dette, skal rumlufttemperaturen hæves, så den operative temperatur holdes inden for et bestemt interval. Det er derfor nødvendigt at opstille og afprøve nye styringsstrategier til regulering af indetemperaturen.

Denne rapport belyser den potentielle energibesparelse, der kan opnås ved at optimere styringsstrategien ved at anvende lokale vejrprognoser til at forudsige bygningens varmebelastning for det kommende døgn.

Arbejdet er finansieret af PSO-midlerne via ELFOR, samt af de deltagende parter; Vejr2, Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) og ALECTIA A/S (tidligere Birch & Krogboe A/S), som har været ansvarlig for projektets gennemførelse.

## 2 Konklusion

Det var projektets udgangspunkt, at der kunne opnås en betragtelig energibesparelse ved at optimere styringsstrategien for anvendelse af natkøling. De kendte gener, ved at bygningen er nedkølet ved arbejdstidens begyndelse, kan afhjælpes ved at hæve temperaturen på rumluften, så der opnås en komfortabel operativ temperatur. Da denne opvarmning koster energi, vil det være nødvendigt at optimere natkølingen, så temperaturen ikke sænkes mere, end der er behov for med den kommende dags varmebelastning.

Projektet har påvist, at det er teoretisk muligt at begrænse energiforbruget til køling om natten til det absolut nødvendige ved at indarbejde forudsigelser af varmebelastningen for det kommende døgn via vejrprognoser – og dermed også reducere energiforbruget til opvarmning om morgenen.

Analyserne viser, at det er muligt at forudsige varmebelastningen for den kommende dag med en nøjagtighed, der er væsentlig bedre end fx at gætte på en belastning, der svarer til den foregående dag.

Derimod har det ikke været muligt at simulere energiforbruget ved anvendelse af optimerede styringsstrategier. Manuelle beregninger indikerer dog, at energiforbruget kan reduceres ved at anvende natkøling, også selvom det er nødvendigt at hæve temperaturen på rumluften om morgenen.

Det kan derfor anbefales, at anvende natkøling alle steder, hvor bygningen er ubenyttet om natten, og at reducere generne ved at bygningen er nedkølet ved arbejdstidens begyndelse, ved at hæve temperaturen på rumluften om morgenen. For beregningerne har vist, at energiforbruget til at skabe en komfortabel arbejdstemperatur ved arbejdstidens begyndelse er ganske lille.

Det anslås, at et kølebehov på 50-340 GWh/år kan erstattes af natkøling.

Den yderligere besparelse, der kan opnås ved at optimere natkøling ved at forudsige belastningen, er stærkt afhængig af hvordan styringen sker uden optimering. Hvis der anvendes mekanisk ventilation til at nedkøle bygningen om natten, ligger hovedparten af besparelspotentialet i at reducere driftstiden for denne, mens energiforbruget til den efterfølgende opvarmning af rumluften kun har marginal betydning.

Ved projektet start var det planlagt, at denne fase skulle efterfølges af en fase, hvor der ville blive udviklet operationelle dynamiske modeller for bygningers varmedynamik samt praktiske styringsstrategier. Desuden skulle teorierne afprøves i praksis.

Dette forudsatte imidlertid, at der i første fase kunne eftervises et tilstrækkeligt stort besparelspotentiale. Som nævnt ovenfor, er den yderligere besparelse, der kan opnås ved at optimere natkøling ved at forudsige belastningen, kun marginal. Den efterfølgende fase vil derfor ikke blive iværksat.

### 3 Indledning og resumé

Det er projektets formål at udvikle styringsstrategier for varme- og ventilationsanlæg, såvel mekaniske som naturligt drevne, der kan reducere eller fjerne de komfortgener, der normalt er forbundet med natkøling. Derved forventes det, at natkøling i større udstrækning end i dag vil erstatte den mere energikrævende aktive køling i dagtimerne.

I denne første fase er der dannet et overblik over internationale undersøgelser på området, og der er foretaget analyser af de bygningsfysiske forholds betydning for anvendelse af natkøling.

Der er blevet arbejdet med en beregningsmetode for køling i lighed med beregningsmetoder for energiforbrug til opvarmning – og med simuleringer af lagring og afgivelse af varme/kulde i bygningskonstruktioner.

Det er undersøgt, hvilken nøjagtighed lokale vejrprognoser kan forventes at have ved at sammenholde pålidelige måledata fra tidligere med forudsigelser – både hvad angår temperaturer og solindstråling.

Potentialet for energibesparelser er vurderet.

Det var forventet, at energiforbruget ved anvendelse af vejrprognoser kunne simuleres i simuleringsprogrammet BSim. Dette er imidlertid ikke lykkedes.

Denne rapport beskriver overordnet, hvordan en styringsstrategi ved optimering af natkøling ved anvendelse af lokale vejrprognoser kan udformes. Potentialet for energibesparelser er imidlertid vurderet til ikke at stå i rimeligt forhold til indsatsen ved implementering af lokale vejrprognoser i styringen af varme- og køleanlægge.

## 4 Forundersøgelser

### 4.1 Internationale undersøgelser

Indledningsvist er der foretaget en litteratursøgning om emnet. Søgningen er dels foretaget ved hjælp af Internettet og dels via de deltagende parter professionelle kontakter, såvel i Danmark som i udlandet.

Som det fremgår af nedenstående liste, har flere været inde på lignende tanker, men kun en enkelt undersøgelse har beskæftiget sig i dybden med emnet.

*Wolfgang Feist, Passivhaus Institut*

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme har lavet nogle undersøgelser af det. Ingen håndfaste resultater.

*Andreas Bühring, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme*

Forespørgsel pr. e-mail 2004-05-11. Viser videre til Jens Pfafferott, ISE. Opfølgning 2004-05-19.

*Jens Pfafferott, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme*

JP har (endnu) ikke erfaringer med prædiktiv styring, men er netop i gang med et "Industrieprojekt", altså med nogle praktikere indenfor byggeri eller styringer til byggeri.

*Mikkel Kragh, Arup*

Har hørt mange, der taler om mulighederne for prædiktiv styring, men kender ikke noget til lignende projekter. Viser videre til Peter Rogers, Controls and commissioning.

*Peter Rogers, Arup*

Forespørgsel pr. e-mail 2004-05-11. Viser videre til Alan Reading.

*Alan Reading, Arup*

Alan Reading kendte ikke til undersøgelser af emnet.

*Robert Hastings, ETH Zürich*

Hastings kender ikke selv til undersøgelser på området, men er meget interesseret. Han gætter på, at mulige komfortforbedringer er væsentligere end mulige energi-



besparelser. Hans kollega, ph.d.-studerende Lars Junghans, studerer specifikt natkøling, men kender ikke til lignende undersøgelser.

*Tuomo Ojanen, VTT*

Tuomo finder også emnet interessant. På VTT har de talt om noget lignende, men han kender ikke nogen eksisterende undersøgelser. Han vil dog undersøge det nærmere. Efter en snak med sin kollega, Juhani Laine, kom de frem til, at de ikke kendte undersøgelser indenfor netop dette område.

*Alfred Heller, BYG-DTU*

Har været involveret i COWIs undersøgelser med natkøling på DR. Omfattede ikke vejrprognoser.

*BLDG-SIM*

Projekt gennemført i Californien over 5 faser under programmet *Public Interest Energy Research (PIER) Program* med titlen *Alternatives to compressor cooling*. Drejer sig om køling af enfamilieshuse. Beskriver natkøling indgående, men ikke muligheden for at hæve den operative temperatur om morgenen.

*KTH*

Ingen erfaringer på området.

*IMM (Henrik Madsen – kort samtale)*

Primært erfaring med hensyn til forudsigelse af vejret på baggrund af forudgående observationer.

Foreslår at beregne det optimale tidspunkt for start af natkøling ved hjælp af bygningens tidskonstant, køleenergien i forskellen mellem inde- og udetemperaturen og viden om den mulige ventilationsluftmængde.

*Teknologisk (Søren Østergaard) ESRU / ESP-r*

Ingen erfaringer på området.

*Bjarne Olesen, DTU energi*

Styring betyder mindre i kontorbygninger, det vigtigste er at holde en fast (lav) temperatur i konstruktionerne (erfaringer fra Tyskland og projekt med termoaktive dæk).

*Michaël Kummert, Fondation Universitaire Luxembourgeoise*

*Contribution To The Application Of Modern Control Techniques To Solar Buildings.  
Simulation-Based Approach And Experimental Validation, 2000-2001*

Rapporten er afrapportering af et Ph.d. projekt, der drejer sig optimale prædiktive styringsstrategier i bygninger. Forfatteren konkluderer, at der kan spares 10-15 % af energien ved at indføre sådanne styringer. Dette er dog nok temmelig højt sat efter danske forhold.

Inden færdiggørelse af nærværende rapport primo 2008, blev nedenstående arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen offentliggjort.

*Lars Olsen & Magne Hansen, Teknologisk institut*

*Varmeakkumulering i beton*

*Vurdering af betons termiske masse i relation til bygningsreglementet og energiberegninger*

*Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 19, 2007*

Rapporten beskriver for beton, hvor stor en del af varmekapaciteten, der reelt er aktiv ved døgnvariationer af rumtemperaturen.

## **4.2 Bygningsfysiske forhold**

For analyse af de bygningsfysiske forhold er der udarbejdet en metode for køling svarende til metoden for varme, beskrevet i SBI-anvisning 184 og 208, "Beregning af bygningers varmebehov".

SBi har i forbindelse med implementering af EU's direktiv om bygningers energimæssige ydeevne (EPBD) i Danmark arbejdet med en beregningsmetode for køling i lighed med metode for energiforbrug til opvarmning. Relevante dele af denne model er genbrugt.

Se også pkt. 5.1, Edb-modeller.

Miljøstyrelsen har i 2007 offentliggjort en arbejdsrapport om varmeakkumulering i beton. Denne rapport beskriver blandt andet temperaturforløbet i konstruktionerne ved variation af rumtemperaturen.

## **4.3 Lagring og afgivelse af varme/kulde i bygningskonstruktionen**

Temperaturforløbet i konstruktionerne samt lufttemperaturen simuleres vha. edb-programmer i forskellige driftssituationer.

Der er udført teoretiske beregninger af lagring og afgivelse af varme/kulde i bygningskonstruktioner. Se også afsnit 5, Analyse af potentialet.

#### 4.4 Lokale vejrprognoser

Det er undersøgt, hvilken nøjagtighed lokale vejrprognoser kan forventes at have. Dette gøres ved at sammenholde pålidelige måledata med forudsigelser for samme områder. Målesteder er udvalgt, så landet dækkes repræsentativt og i et antal, der giver statistisk sikre resultater.

Den analyserede periode er 1/11-2003 til 31/10-2004 for temperaturdata og 1/9-2003 til 30/8-2004 for solstrålingsdata.

For udvalgte stationer er de registrerede data for lufttemperatur og solindstråling (global stråling) blevet sammenlignet med de sidste 24 timers prognoser. Herefter er sandsynligheden beregnet for, at prognosen ligger inden for en afvigelse fra det registrerede på +/- 1 grad og +/- 2 grader for lufttemperaturen og +/- 100 W/m<sup>2</sup> og +/- 200 W/m<sup>2</sup> for solindstrålingen.

Registrerede timeværdier for temperatur og global stråling er sammenholdt med 16 timers prognose. Temperaturen kan med en sandsynlighed på ca. 97 % forudsiges med en nøjagtighed på +/- 2K. Sandsynligheden for at forudsige temperaturen med en nøjagtighed på +/- 1K er derimod kun ca. 70 %.

Til sammenligning har en persistens-baseret prognose kun en sandsynlighed på ca. 55 % ved en nøjagtighed på +/- 2K. Persistens betyder, at målingen fra samme tidspunkt dagen før anvendes som prognose.

##### 4.4.1 Valg af observationssteder

Der findes ca. 35 stationer i Danmark som observerer vejret døgnet rundt. Disse stationer registrerer, selv om de ligger over et begrænset område, store forskelle i vejret og også store forskelle i forudsigeligheden af de forskellige vejrparametre. Til anskueliggørelse af forudsigeligheden på vejrprognoserne er valgt en station, som ligger tæt på kysten, og en station, som ligger langt fra kysterne.

Kastrup Lufthavn er valgt som en typisk kyst station, og Skrydstrup er valgt som en station, der ligger inde i landet.

En kyststation er kendetegnet ved at have en mere konservativ døgnvariation af temperaturen, da havet påvirker temperaturen. Om vinteren er her generelt mildere, mens det er lunere om efteråret og koldere om foråret. I sommermånederne er variationerne på temperaturerne ikke så store, her er lavere maksimum temperatur og lavere minimum temperaturer, nætterne er lunere.

For Kastrup er temperaturen selvfølgelig også afhængig af vindretningen i de forskellige perioder. En vind fra sydøst giver om foråret fx markant lavere temperaturer end i resten af landet.

En landstation har derimod større variationer døgnet igennem. Om vinteren er her generelt koldere, og det er her, de laveste temperaturer forekommer. Om sommeren er det her, det er varmest om dagen og koldest om natten.

Temperaturudsvingene er generelt størst i klart og stille vejr og mindst i skyet og blæsende vejr.

Det er kun få stationer, der har observations data for solindstrålingen, derfor er Holbæk valgt som station til beskrivelse af indstråling.

#### 4.4.2 Temperaturgrafer

Temperaturen forudsiges og observeres i 2 meters højde. Graferne er inddelt i perioder på 2 måneder, hvor måneder, som klimatisk er tættest på hinanden, er parret. Prognoserne beregnes fra kl. 00 UTC og er starttidspunktet på graferne.

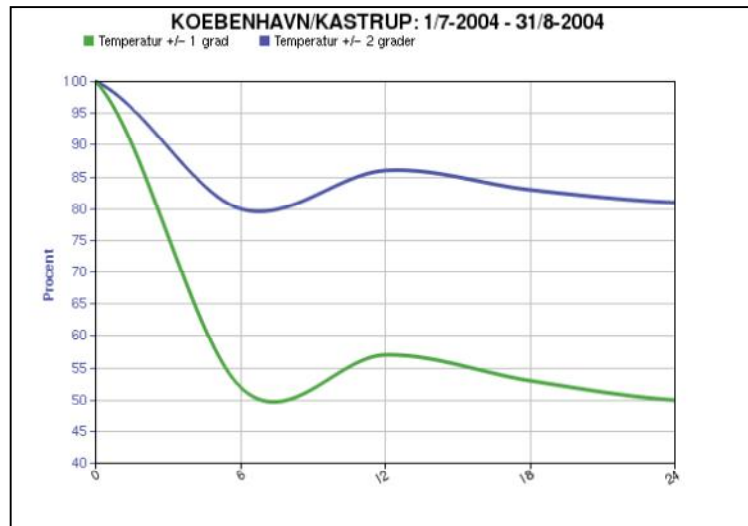
UTC (universal time coordinate) er den internationale meteorologi-tid, som er to timer efter dansk sommertid og en time efter dansk vintertid.

Timerne på x-aksen er prognoselængden og samtidig tiden på døgnet i UTC-tid. Der er plottet to grafer, en grøn som viser forudsigeligheden i procent med temperaturer, som ligger inden for +/- 2 grader, og en blå graf, som viser forudsigeligheden inden for +/- 1 grad.

#### *Kastrup Lufthavn*

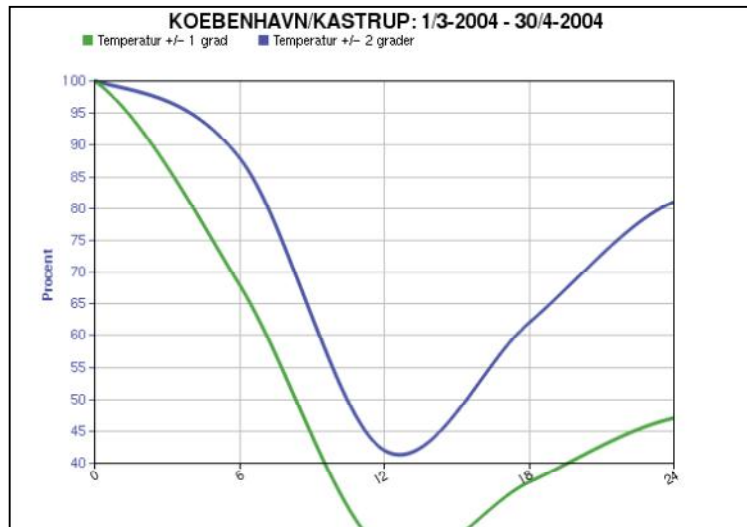
For Kastrup Lufthavn ses det at forudsigeligheden generelt falder hurtigt med et minimum omkring 6 timer, hvorefter forudsigeligheden stiger noget igen (fig. 4.1). Faldet ret hurtigt efter prognosernes start skyldes, at prognosen ligger omkring

solopgang. Det er her i døgnets yderpunkt, at den største ændring (fald/stigning) af temperaturen over tid sker. Derfor er forudsigeligheden også mindst her.



Figur 4.1 Temperaturprognose juli-august

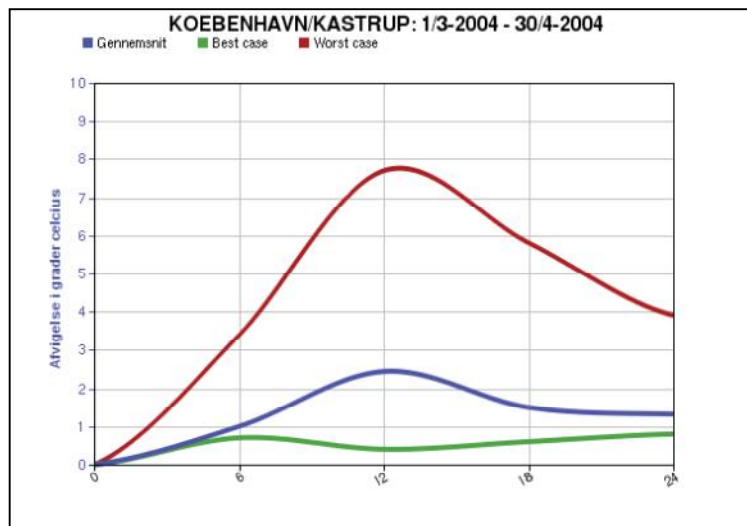
I perioden 1/3-2004 til 30/4-2004 er forudsigeligheden markant lavest omkring kl. 12 UTC (fig. 4.2). Denne lave forudsigelighed i de tidlige forårsmåneder skyldes det kolde hav, som gør temperaturen i Kastrup stærkt afhængig af vindretningen samtidig med, at solen opvarmer meget i situationer med klart vejr. Det er på denne tid af året at temperaturen svinger mest mellem nat og dag. I situationer med vind fra sydøst antager luften havets temperatur. Drejer vinden til øst, har luftmassen været inde over Sydsverige og er lunere.



Figur 4.2 Temperaturprognose marts-april

Om foråret afhænger temperaturen forholdsmæssigt mere af flere parametre end i resten af året. Derfor falder forudsigeligheden i denne periode.

For samtlige perioder er den absolutte gennemsnitlige afvigelse præsenteret grafisk med blå som gennemsnittet i perioden, rød som periodens værste situation og grøn som den bedste (fig. 4.3).



Figur 4.3 Afvigelse marts-april

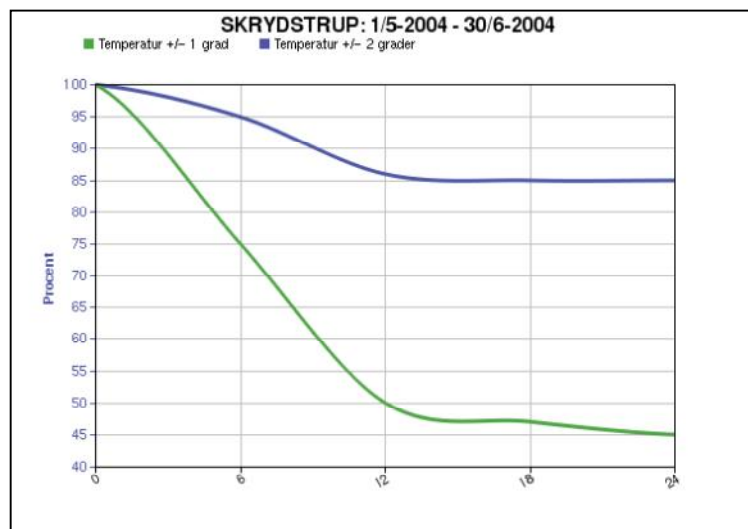
Bedste og værste situation er valgt ud fra den temperatur som afviger henholdsvis mindst og mest fra en observation de første 24 timer af prognosen.

Den tredje kurve viser den absolutte afvigelse fra prognosen fra resten af observationerne.

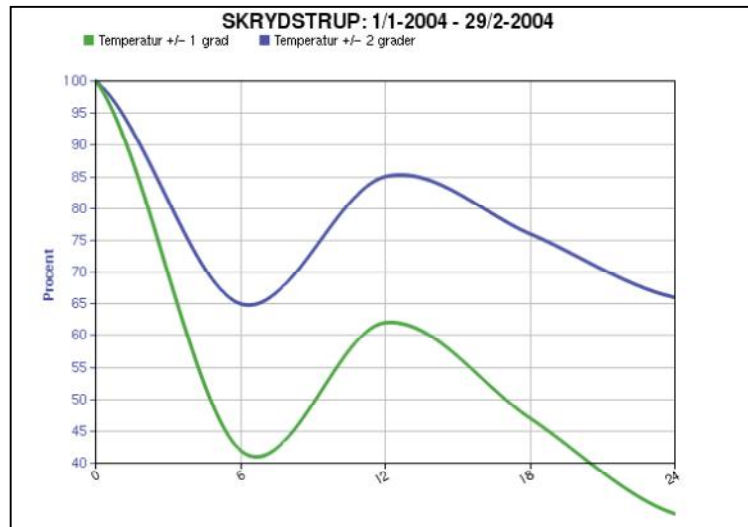
I forårs månederne og først på sommeren, er den numeriske afvigelse størst først på eftermiddagen. Dette skyldes især afhængigheden af skydækket og forudsigelsen af dette, og disse situationer gav i perioden marts-april en fejlprognose på over 7 grader omkring 12 UTC.

#### Skrydstrup

I Skrydstrup falder forudsigeligheden, som man måtte forvente det med tiden (fig. 4.4). Dog ses den samme tendens i de koldeste måneder for Skrydstrup, at forudsigeligheden er dårligere for en prognose 6 timer frem, end for prognosen fx 12 timer frem tiden (fig. 4.5).



Figur 4.4 Temperaturprognose maj-juni

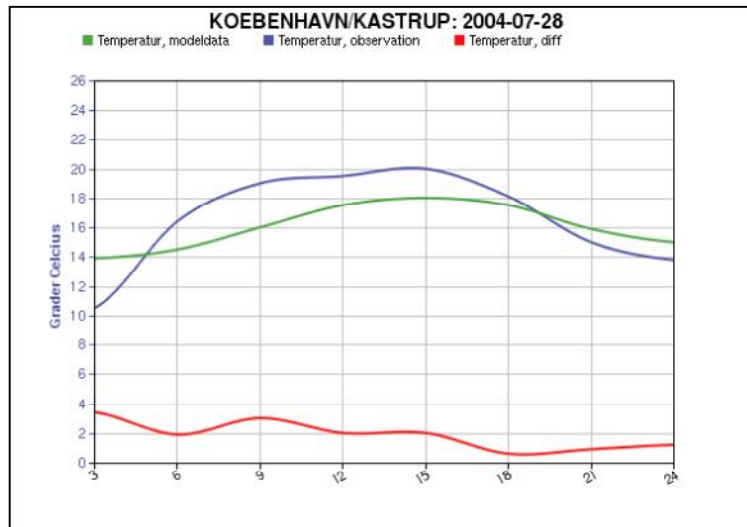


Figur 4.5 Temperaturprognose januar-februar

I sommermånederne er det vanskeligste tidspunkt at forudsige temperaturen først på eftermiddagen hvor temperaturerne er højest og afhænger meget af det lokale skydække på stationen. Som "landstation" dannes der generelt flere skyer dagen igennem pga. af solens opvarmning end i resten af landet, da det er inde i landet de højeste temperaturer forekommer. Når disse skyer dannes ved maksimal solindstråling, bliver forudsigeligheden mindre.

For at analysere hvordan prognoserne reelt forløber over et døgn, er der foretaget sammenligning af målte og prognosticerede temperaturer for udvalgte dage. For en del dage ses, at de observerede temperaturer har et større udsving over døgnet end prognosen. Dette skyldes for Kastrup, at stationen i vejrmodellerne altid antages at være kyststation, selvom den i nogle situationer reagerer mere som en landstation. Dette er især udpræget i sommerhalvåret hvor vindretningen ligger mellem sydvest og nord.





Figur 4.6 Temperaturforløb over døgn. Differensen er ikke nul, hvor graferne skærer hinanden, da de er baseret på data hver tredje time (3,6,9 osv.)

#### 4.4.3 Solindstråling

Den observerede stråling er globalstråling, som er summen af direkte, indirekte og diffus stråling. Den direkte stråling fra solen giver det markant største tilskud til denne stråling.

Graferne er, som graferne for temperatur, dannet ud fra 00 UTC prognosen og timerne angiver tidspunktet på døgnet samt prognosens længde. Både observationer og prognoser er den vertikale stråling, dvs. den stråling, der rammer en vandret flade.

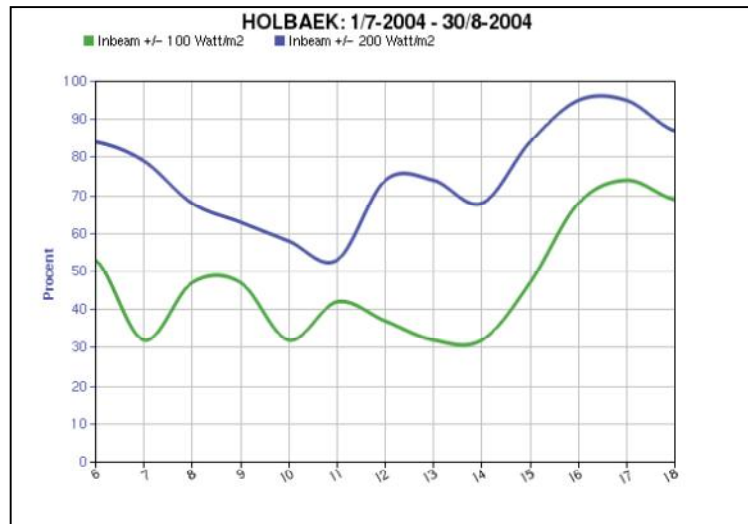
Grøn kurve præsenterer forudsigeligheden i procent inden for  $\pm 100 \text{ W/m}^2$ , mens blå kurve præsenterer forudsigeligheden for  $\pm 200 \text{ W/m}^2$ .

Data er udtrukket for Holbæk, som i enkelte situationer (nordenvind) opfører sig som en kyststation, men generelt betragtes Holbæk som en landstation.

Både prognose og observation giver en akkumuleret stråling over timen, hvorved strålingen til 11 UTC er akkumuleret i tiden fra kl. 10 til 11 UTC.

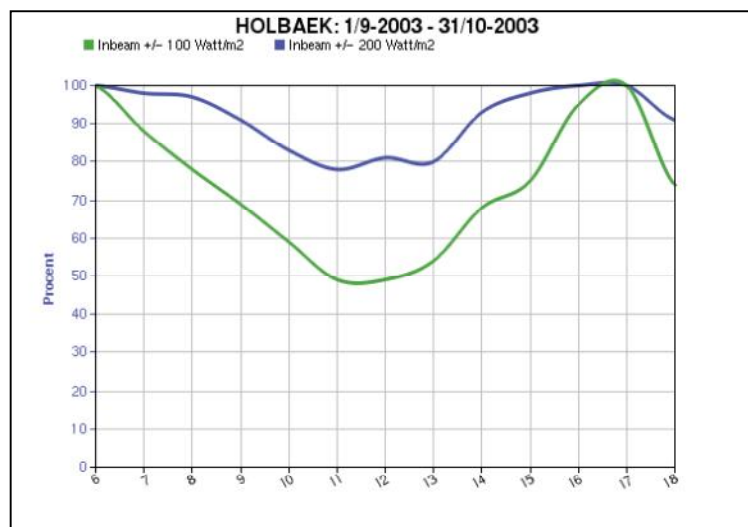
Den laveste forudsigelighed findes i alle perioder omkring 11 UTC, tidspunktet hvor den numeriske værdi af indstråling er højest og tidspunktet hvor skydækket varie-

rer mest (fig. 4.7). Dette giver også den laveste forudsigelighed for indstrålingen i procent.



Figur 4.7 Solindstrålingsprognose juli-august

Faldet i forudsigeligheden omkring kl. 18 UTC i vinterhalvåret, hvor solen er gået ned, skyldes bidrag fra diffus og indirekte stråling, der er vanskelig at forudsige (fig. 4.8).



Figur 4.8 Solindstrålingsprognose september-oktober

Grafer for alle de analyserede perioder er vist i bilag 7.1.

## 5 Analyse af energibesparelspotentialet

### 5.1 Edb-modeller

For nærmere at bestemme potentialet for energibesparelser opbygges en edb-model af en typisk kontorbygning med muligheder for lagring af køleenergi i bygningens konstruktioner. Modellen opbygges i BSim og er nærmere beskrevet i afsnit 6.1, Beregningsmodellen.

Simuleringsprogrammet BSim blev udbygget med en rutine, der kan beregne den temperatur, det netop vil være nødvendigt at nedkøle bygningen til om natten, hvis kølebehovet den efterfølgende dag skal dækkes alene ved hjælp af den lagrede køleenergi. Det antages her, at det er muligt at forudsige næste dags varmelastning med 100 % nøjagtighed, idet vejrdata fra et standard referenceår benyttes både som forudsigelse og under simuleringen.

Med denne beregnede temperatur, kan det samlede energiforbrug til opvarmning og køling beregnes med programmets almindelige rutiner. Inden bygningens ibrugtagning om morgenen hæves rumlufttemperaturen, så den operative temperatur bliver 21 °C.

Trods gentagne forsøg og en betragtelig forlængelse af projektperioden er det ikke lykkedes at få den specielle rutine til at give et resultat, der forekommer realistisk. Rapportens konklusioner er derfor alene baseret på overslagsmæssige beregninger af potentialet.

Arbejdet med simuleringsberegningerne har imidlertid givet en ny indsigt i de bygningsfysiske forhold, der har betydning for anvendelse af natkøling. Lagring og afgivelse af varme og kulde i en konstruktion afhænger af flere parametre for de anvendte materialer, og sammenhænge er noget mere komplekse end de simple beregningsmodeller kan tage højde for. Disse sammenhænge er yderligere studeret og beskrevet i rapporten "Varmeakkumulering i beton", Teknologisk Institut, 2007.

Det har også vist sig, at energiforbruget til opvarmning af rumluften om morgenen, for at skabe en komfortabel operativ temperatur, er ganske lille. Hvis det er muligt at anvende naturlig ventilation til nedkøling af bygningen om natten, vil besparelsen ved at optimere natkølingen derfor være ubetydelig. Hvis det derimod er nødvendigt at anvende mekanisk ventilation, vil en reduktion af ventilationens driftstid være fordelagtig, så der derved spares el-energi.

Potentialet for energibesparelse ved optimering begrænses dog af, om det er muligt at lagre tilstrækkelig kulde i bygningskonstruktionen. Kun i de tilfælde, hvor natkøling helt kan eliminere behovet for køling om dagen, vil der være besparelse ved at optimere natkølingen. Hvis der uanset natkølingens størrelse stadig er et kølebehov om dagen, kan der ikke opnås yderligere besparelse ved optimering, da denne i så fald ikke vil reducere natkølingen.

## 5.2 Energiforbrug ved forskellige driftsformer

Det årlige energiforbrug beregnes ved forskellige driftsformer: med og uden natkøling samt med anvendelse af vejrforudsigelser.

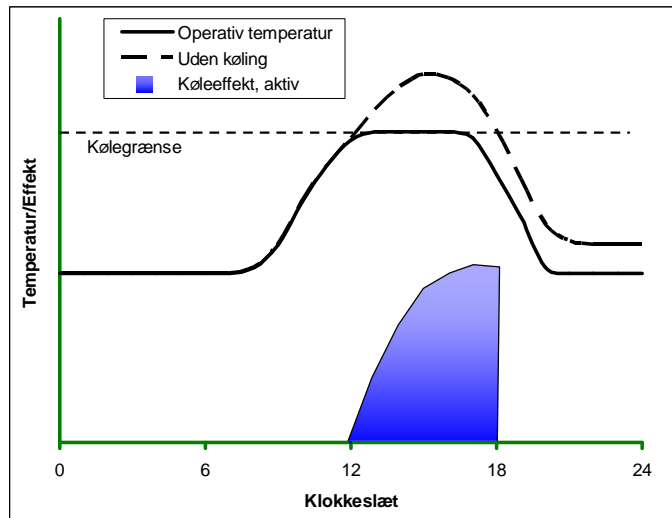
Beregningen foretages for 4 driftsformer:

1. Uden natkøling
2. Med natkøling til  $T_{op} \sim 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3. Med natkøling til  $T_{op} \sim 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  + boost med luftvarme
4. Som 3) til optimeret  $T_{op}$  iht. fremskrevne vejrdata

Driftsformerne 2 og 3 er ikke indeholdt i den oprindelige projektbeskrivelse. Det er imidlertid vurderet, at disse scenarier er vigtige at have med, så forskellene mellem de forskellige driftsformer kan beregnes.

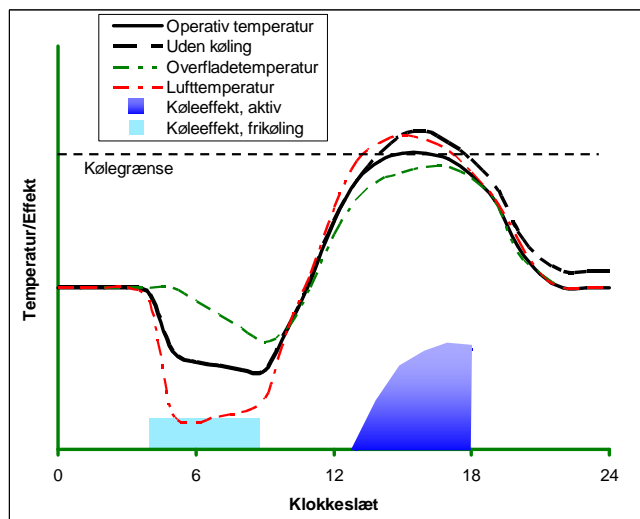
Figur 5.1 til 5.4 illustrerer temperaturforløb og effektbehov for de forskellige driftsformer.

Ved driftsform 1, Uden natkøling, vil der være behov for aktiv køling i løbet af dagen. Kølingen holder rumtemperaturen under fx  $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se figur 5.1.



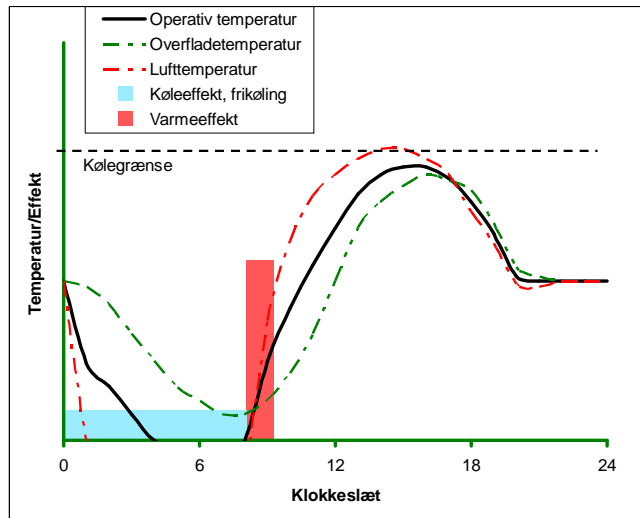
Figur 5.1 Temperaturforløb og effektbehov uden natkøling (driftsform 1)

Hvis der natkøles efter driftsform 2, begrænses den operative temperatur nedadtil til fx 18-19 °C af hensyn til komforten om morgenen. Der kan stadig være kølebehov om dagen. Behovet er dog reduceret i forhold situationen uden natkøling. Se figur 5.2.



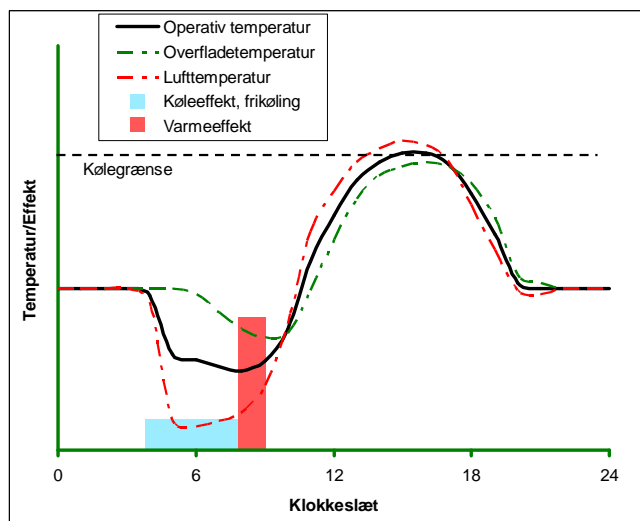
Figur 5.2 Temperaturforløb og effektbehov med natkøling (driftsform 2)

Ved natkøling efter driftsform 3 til fx 16 °C og boost om morgenen af hensyn til komforten, kan temperaturen holdes under kølegrænsen, hvis det ikke bliver så varmt den efterfølgende dag. Se figur 5.3.



Figur 5.3 Temperaturforløb og effektbehov med morgenboost (driftsform 3)

Ved driftsform 4 natkøles der kun så meget, at kølegrænsen netop vil nås den efterfølgende dag. Om nødvendigt boostes om morgenen af hensyn til komforten. Se figur 5.4.

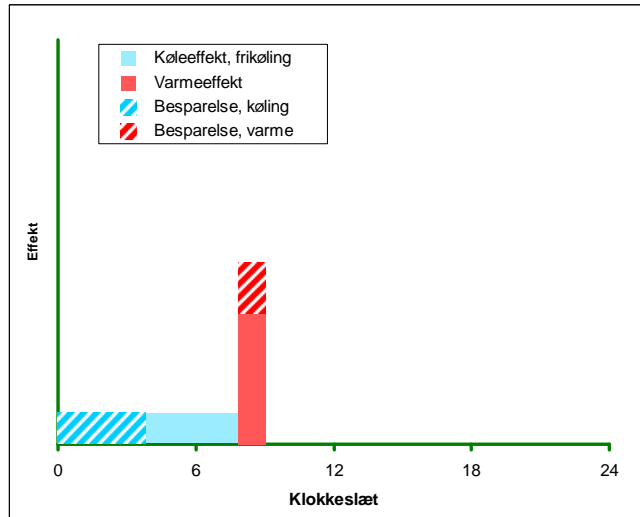


Figur 5.4 Temperaturforløb og effektbehov, optimeret (driftsform 4)

Besparselsen ved optimering opnås ved mindre køling om natten og deraf følgende mindre boost om morgenen.

Hvis der er et kølebehov om dagen uden optimering, vil optimeringen ikke ændre temperaturforløbet og dermed heller ikke energiforbruget.

Hvis der uden optimering køles så meget, at der opstår et varmebehov næste dag, vil besparelsen ved optimering blive større.



Figur 5.5: Energibesparelse ved optimering af natkølingen

### 5.2.1 Edb-simuleringer

For driftsform 2 gennemføres beregninger af energiforbruget, hvis natkølingen starter til et fast tidspunkt og fortsætter til en bestemt temperatur (fx 21 °C) er nået. Lufttemperaturen boostes ikke om morgenen.

For driftsform 3 gøres det samme, men til en lavere temperatur (fx 18 °C) er nået, og lufttemperaturen boostes om morgenen.

For de teoretiske betragtninger for driftsformerne 3 og 4, antages det, at det vil være muligt at skabe termisk komfort ved nedkøling af bygningskonstruktionerne med en passende forhøjelse af lufttemperaturen. Praktisk erfaring viser imidlertid, at det kan være vanskeligt at tilvejebringe forhold, der ikke giver anledning til gener, selv om komfortligningerne tilsiger, at termisk komfort kan opnås selv ved stor forskel mellem strålings- og lufttemperaturen.

### 5.2.2 Overslagsberegninger

Der er gennemført overslagsberegninger af potentialet. Disse indikerer, at besparelsespotentialet vil være begrænset i forhold til at styre efter en fast nattemperatur.

Som beskrevet ovenfor, fremkommer energibesparelsen ved prædiktiv styring af natkøling på to måder:

- Kølebesparelse pga. mindre behov for ventilatorenergi til nedkøling af bygningen om natten
- Varmebesparelse pga. mindre morgenboost for at opnå den ønskede operative temperatur

Besparelsen beregnes i forhold til at der køles til en fast lav temperatur om natten, og lufttemperaturen derefter boostes om morgenen. Dvs. at besparelsen udgøres af forskellen mellem energiforbruget til driftsformerne 3 og 4. Se figur 5.5.

Kølebehovet om dagen vil være ens for de to driftsformer, mens komfortniveauet vil være forskelligt (lavere temperatur for driftsform 3).

#### *Kølebesparelse – køling med udeluft*

For naturligt ventilerede bygninger er energien til køling om natten gratis i langt den største del af året, mens den for bygninger, hvor kølingen bæres frem af et mekanisk ventilationsanlæg kun koster elforbrug til ventilatorerne, bortset fra de nætter, hvor temperaturen er for høj til at kunne køle bygningskonstruktionen tilstrækkeligt ned.

Overslagsberegningen af besparelspotentialet er gennemført for et kontorlokale på 5 \* 3,2 m (16 m<sup>2</sup>) med en loftshøjde på 2,5 m (40 m<sup>3</sup>). Ventilationsanlægget kan udskifte luften 4 gange i timen. Elforbruget til dette er 2,1 kJ pr. m<sup>3</sup>/h, svarende til kravet i det nuværende bygningsreglement. For hver time natkølingsperioden kan forkortes, spares der 40 m<sup>3</sup> \* 4 h<sup>-1</sup> \* 2,1 kJ = 336 kJ eller 21 kJ/m<sup>2</sup>.

Hvis natkølingsperioden i gennemsnit kan forkortes 2 timer 50 gange om året, bliver den samlede besparelse 2 h \* 50 \* 21 kJ/m<sup>2</sup> / 3600 s/h = 0,58 kWh/m<sup>2</sup> pr. år.

Ganges med 2,5, giver dette en reduktion af det samlede energiforbrug på ca. 1,5 kWh/m<sup>2</sup> pr. år, eller ca. 1,5 % af energirammen for en ny kontorbygning.

Der er ingen statistiske opgørelser over det samlede elforbrug i Danmark til komfortkøling, men et skøn baseret på opgørelse over kontorbygninger opført efter 1980 indikerer, at omkring 10-15 mio. m<sup>2</sup> har et kølebehov, der formentligt vil være dækket af mekanisk køling.

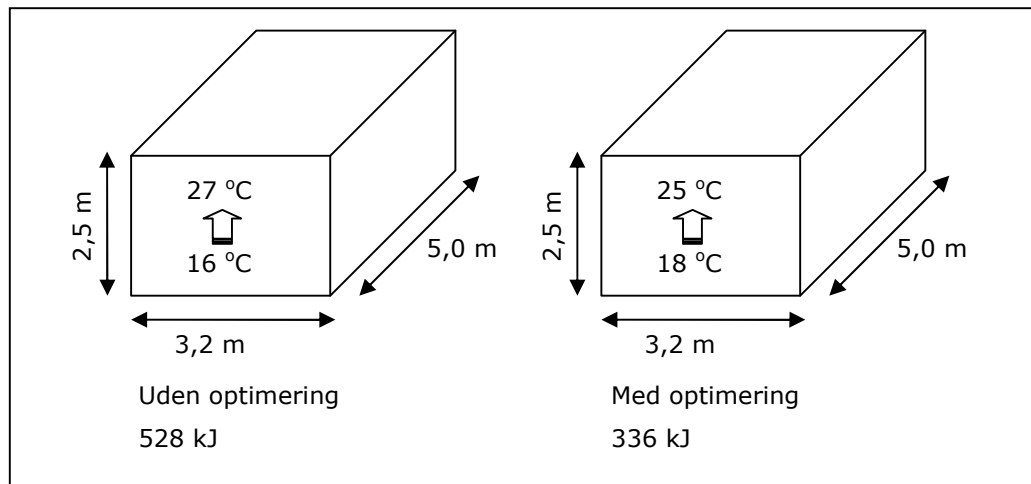


Hvis det gennemsnitlige kølebehov anslås til 10-30 kWh/m<sup>2</sup> om året, bliver det samlede forbrug til køling 100-450 GWh/år. Heraf kan måske 50-75 % erstattes af natkøling, svarende til 50-340 GWh/år.

#### Varmebesparelse

Det antages, at luften skal opvarmes fra 16 °C til 27 °C (11 K), hvis natkølingen ikke er optimeret ved hjælp af vejrprognose, mens luften kun skal opvarmes fra 18 til 25 °C (7 K), hvis natkølingen er optimeret ved hjælp af vejrprognose.

Sættes luftens varmekapacitet til 1200 J/m<sup>3</sup> pr. K, bliver energiforbruget til opvarmning af luften henholdsvis 528 kJ og 336 kJ pr. gang, altså en besparelse på 192 kJ.



Figur 5.6: Varmeforbrug til morgenboost, med og uden optimering

Hvis det som ovenfor antages, at den beregnede besparelse kan opnås 50 gange om året, bliver den årlige besparelse ca. 0,2 kWh/m<sup>2</sup> pr. år.

### 5.3 Indeklimatiske betragtninger

Erfaringer viser, at det kan være vanskeligt at tilvejebringe forhold, der ikke giver anledning til gener, selv om komfortligningerne tilsiger, at termisk komfort kan opnås selv ved stor forskel mellem strålings- og lufttemperaturen. Der kan derfor i praksis være en grænse for, hvor langt ned en bygning kan køles om natten, hvis det stadig skal være muligt at skabe termisk komfort om morgenen.

Dette kan blandt andet skyldes, at bygninger med varierende overflader og varierende termisk masse kan have forskelligt komfortniveau i forskellige områder, selv

om den lavere overfladetemperatur er søgt kompensert med en højere lufttemperatur. Fx vil lette materialer stort set have luftens temperatur efter et morgenboost. Hvorvidt brugerne oplever termisk komfort, kan derfor afhænge af hvor i bygningen, de opholder sig. I områder med mange lette overflader kan der derfor føles for varmt, hvis det i områder med mange termisk tunge materialer ikke skal føles for koldt.

Der savnes konkrete undersøgelser af den termiske komfort i bygninger med natkøling.

Et andet forhold, der ikke er behandlet i dette projekt, er spørgsmålet om indeklimakvalitet. Der er en stigende opmærksomhed omkring et godt indeklimas betydning for produktiviteten, og det kan betyde, at en virksomhed vil vægte et forbedret indeklima højere end et lavere energiforbrug. Da optimering af natkølingen vil indebære flere timer, hvor temperaturen når den maksimalt tilladelige, vil kvaliteten af det termiske indeklima alt andet lige blive forringet.

## 6 Simuleringer med BSim2002

Som beskrevet i afsnit 5, blev simuleringsprogrammet BSim udbygget med en rutine, der kan beregne den temperatur, det netop vil være nødvendigt at nedkøle bygningen til om natten, hvis kølebehovet den efterfølgende dag skal dækkes alene ved hjælp af den lagrede køleenergi.

Til afprøvning af denne beregningsrutine – og til den videre analyse – blev der opbygget en simpel bygningsmodel af et indeliggende rum i en kontorbygning. Denne model er nærmere beskrevet nedenfor under 6.1 Beregningsmodellen.

For at afdække besparelspotentialet for forskellige bygningstyper var det planlagt at analysere permutationer af bla. følgende parametre/egenskaber:

- U-værdi
- Glasareal
- Aktiv termisk tyngde (varmekapacitet)
- Aktiv termisk tyngde (intern varme modstand)
- Overgangsmodstand

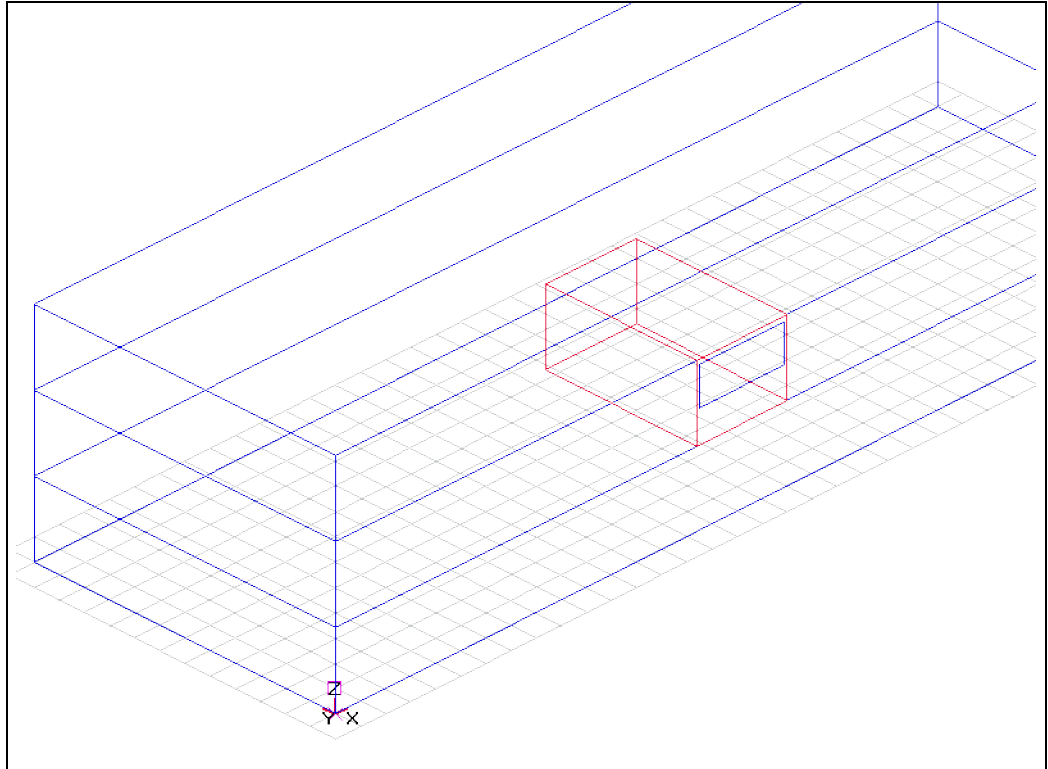
Der var imidlertid store problemer med at få beregningsrutinen til at fungere. Trods gentagne forsøg og en betragtelig forlængelse af projektperioden er det som nævnt ovenfor ikke lykkedes at få den specielle rutine til at give et resultat, der forekommer realistisk.

Rapportens konklusioner er derfor alene baseret på overslagsmæssige beregninger af potentialet.

### 6.1 Beregningsmodellen

Den betragtede zone er som udgangspunkt – hvad termisk masse angår – et forholdsvist tungt rum. Den store termiske "tyngde" er valgt til start for med større nøjagtighed at kunne konstatere et potentiale. Udviser dette forholdsvist tunge rum omvendt ikke noget potentiale, må det konstateres, at der næppe kan forventes et potentiale for et lettere rum.

Rummet ligger på 1. sal ud mod sydfacaden af en bygning.



Figur 6.1: Den undersøgte zones placering i bygningen

#### Konstruktioner

- Etageadskillelser: 5 mm linoleum direkte på et betondæk (205 mm massivt betondæk)
- Indvendige skillevægge: 2 lag gips, 90 mm isolering og endnu 2 lag gips
- Ydervægge: 150 mm bagmur af beton, 145 mm isolering og formur af 50 mm betonplade
- Vinduer
  - Samlet U-værdi for ramme, karm, rude og kuldebroen ved rudens kant er  $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - Solenergitransmittans,  $g=0,50$
  - Glasarealet er  $3,8 \text{ m}^2$  (vinduesareal  $4,7 \text{ m}^2$ ), hvilket skal ses i forhold til et nettogulvareal på  $19,3 \text{ m}^2$

#### Systemer

- Personer, lys, udstyr, total: 0,432 kW (svarende til 20 W per m<sup>2</sup> bruttoareal)
- Ventilation
  - Dagtimer: Konstant udelufttilførsel på 120 m<sup>3</sup>/h (svarende til luftskifte på 2,4 h<sup>-1</sup> i forhold til nettovolumenet) kl. 7-16 (time 8 til time 16)
  - Nat: Konstant udelufttilførsel på op til 120 hhv. 600 m<sup>3</sup>/h (svarende til luftskifte på op til 2,4 hhv. 12 h<sup>-1</sup> i forhold til nettovolumenet)
- Opvarmning: Radiatorer. Setpunkt for opvarmning er 21 °C
- Køling: 40 W/m<sup>2</sup>, luftbåren. Setpunkt for køling er 23,9 °C

#### Randbetingelser

- Temperaturer, solstråling og andre data for omgivelserne tages fra det danske designreferenceår, der er sammensat af data der er repræsentative for vejret observeret i Værløse i perioden 1975-1990, og herunder også inkluderer nogle ekstreme perioder
- Alle tilstødende rum har beregningsmæssigt samme temperatur som den undersøgte zone

## 6.2 Beregninger

Der er gennem projektførløbet af flere omgange foretaget et meget stort antal beregninger:

- De første beregninger tydeliggjorde, at der var behov for en specialversion af BSim.
- De efterfølgende beregninger pegede på, at der var mangler i den valgte optimeringsrutine.
- Senere beregninger viste stadig, at der var problemer med at få beregningsrutinen til at regne som forventet.
- Selv efter gentagne forsøg lykkedes det ikke at få resultater frem, der virkede troværdige.

Det blev således besluttet at opgive denne del af projektet.

Se bilag 7.3, Uddrag af mødereferater, for yderligere uddybning af forløbet.

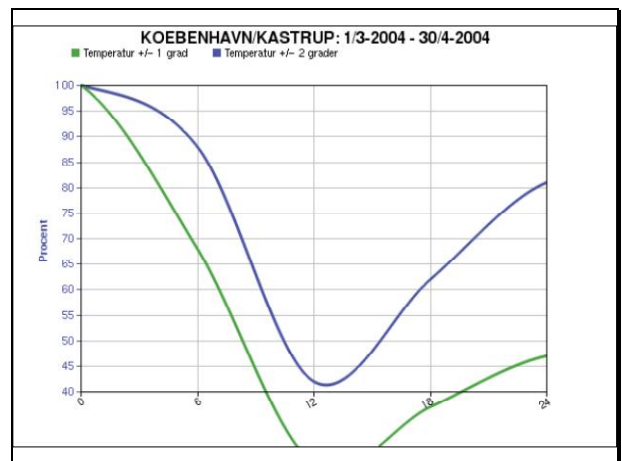
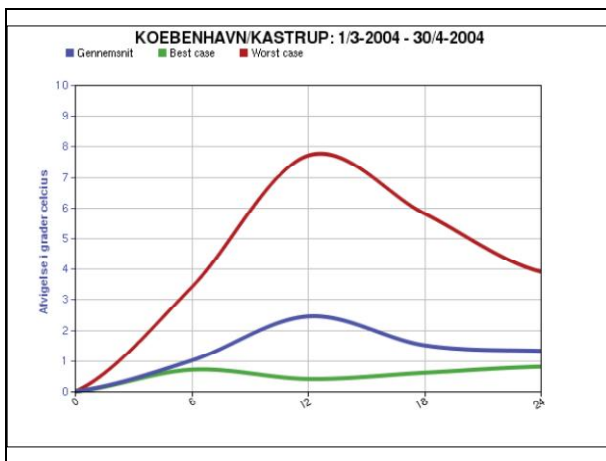
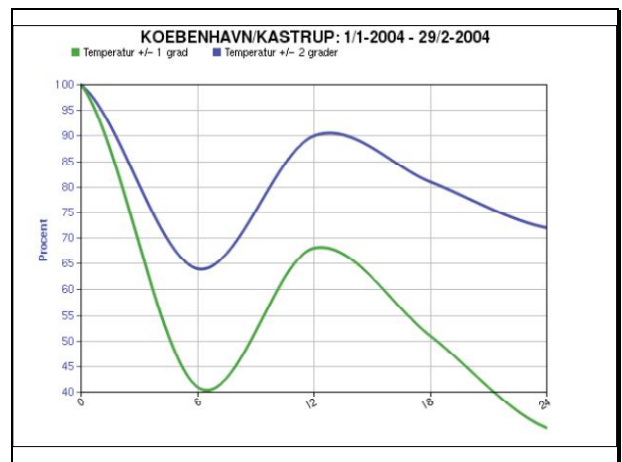
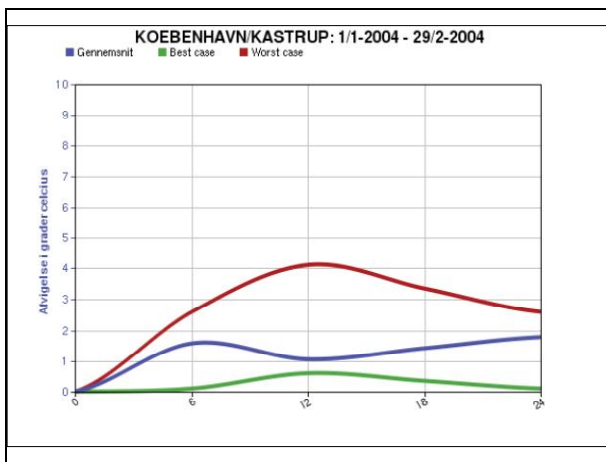
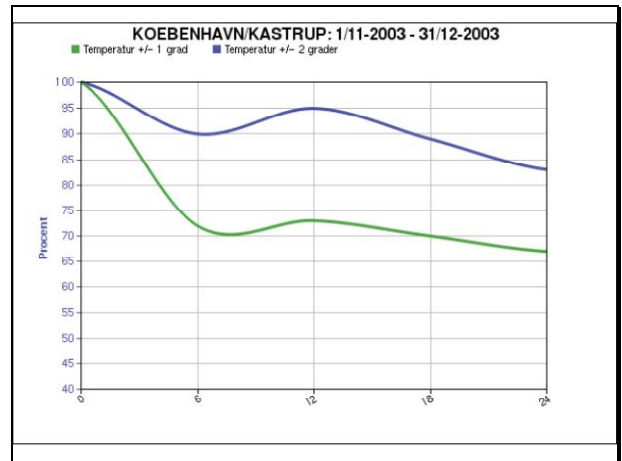
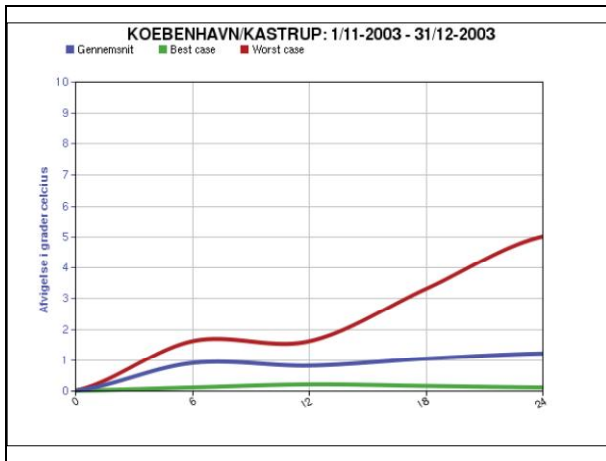
## 7 Bilag

### 7.1 Vejrprognoser

#### København/Kastrup

Absolut gennemsnitlig temperaturogavelse

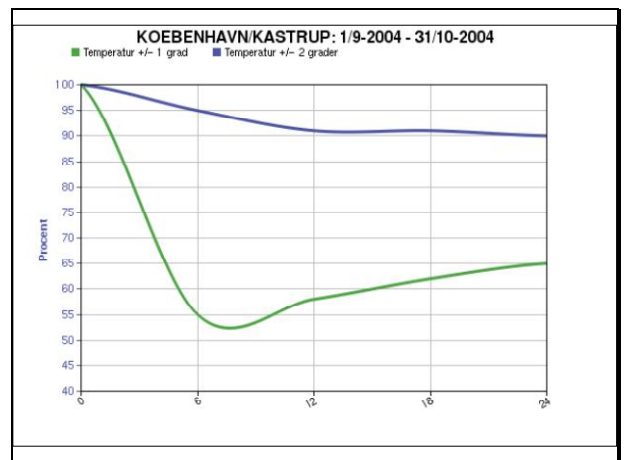
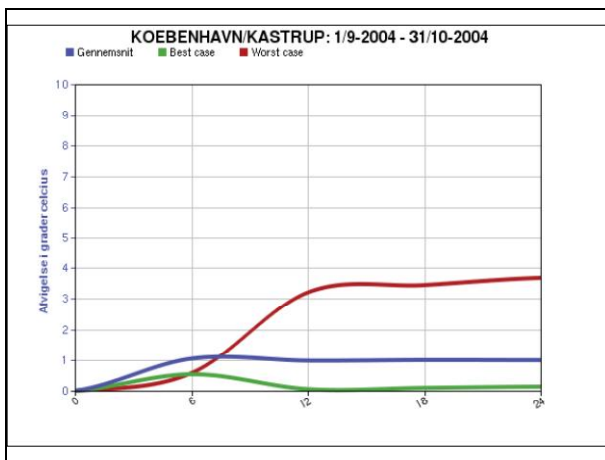
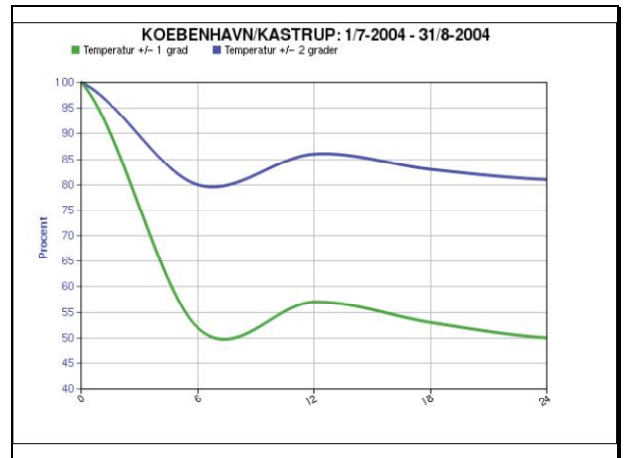
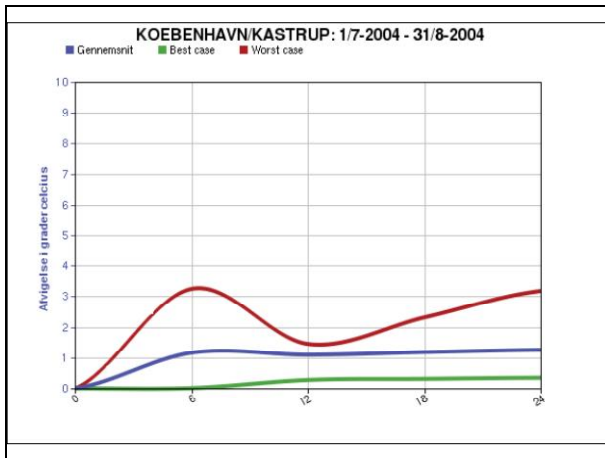
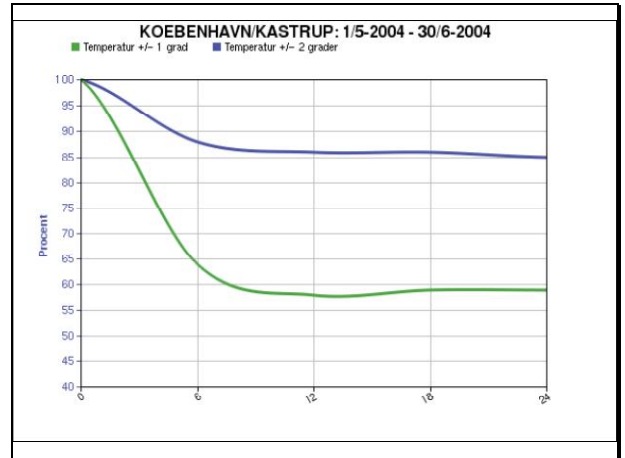
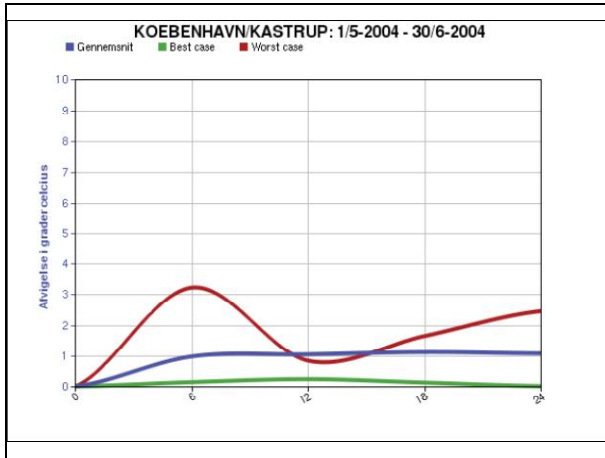
Forudsigelighed af  
lufttemperatur



## København/Kastrup

### Absolut gennemsnitlig temperaturafvigelse

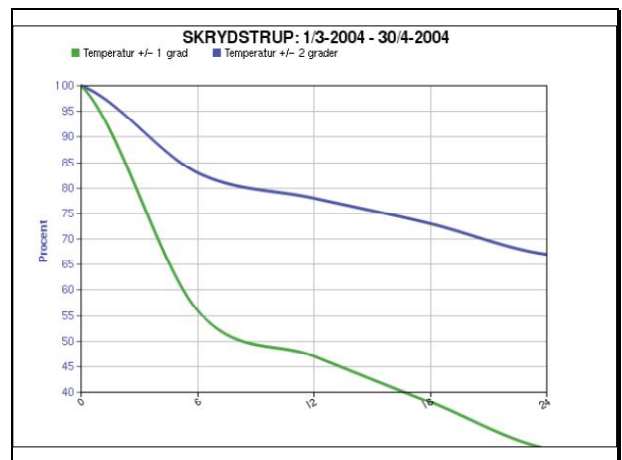
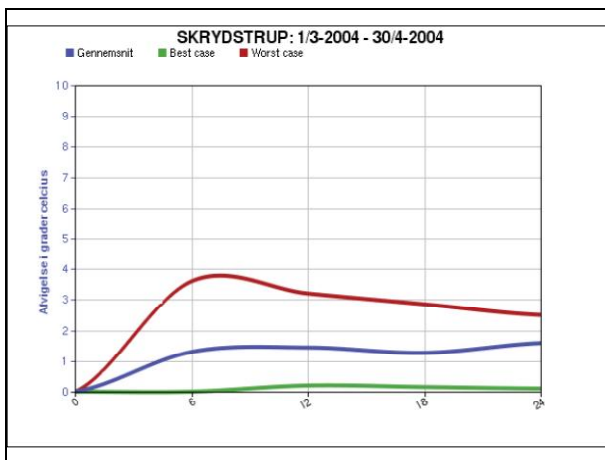
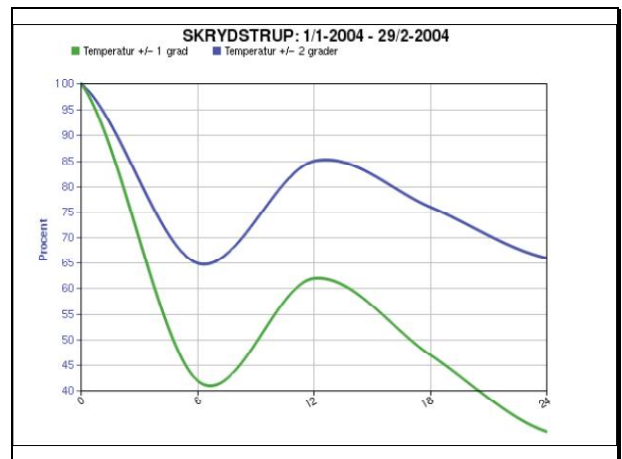
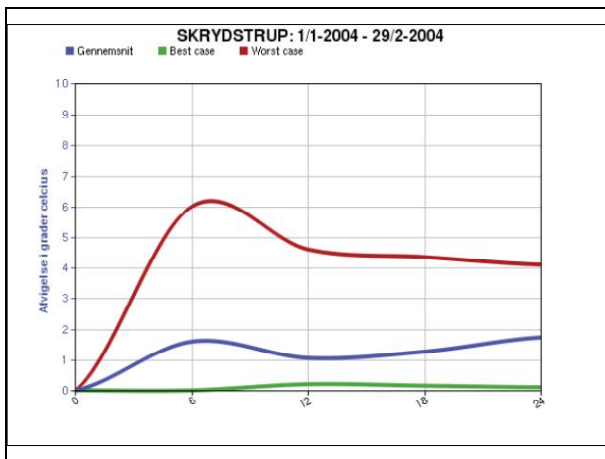
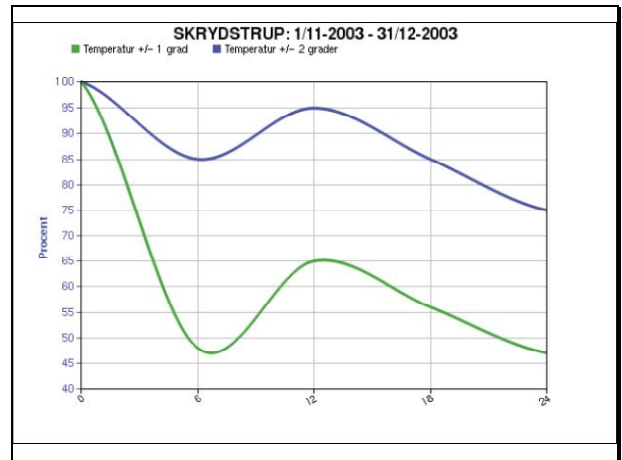
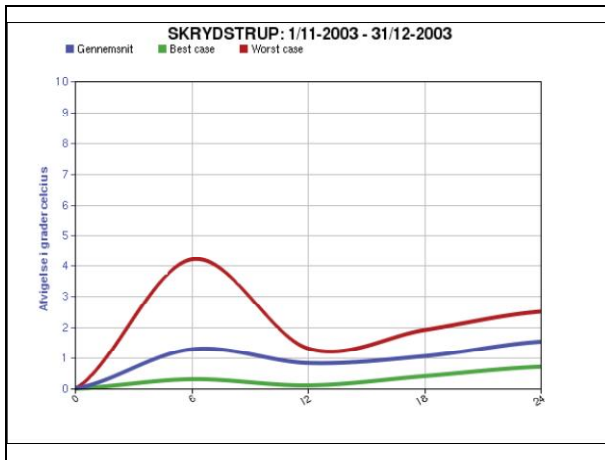
### Forudsigelighed af lufttemperatur



## Skrydstrup

### Absolut gennemsnitlig temperaturafvigelse

### Forudsigelighed af lufttemperatur

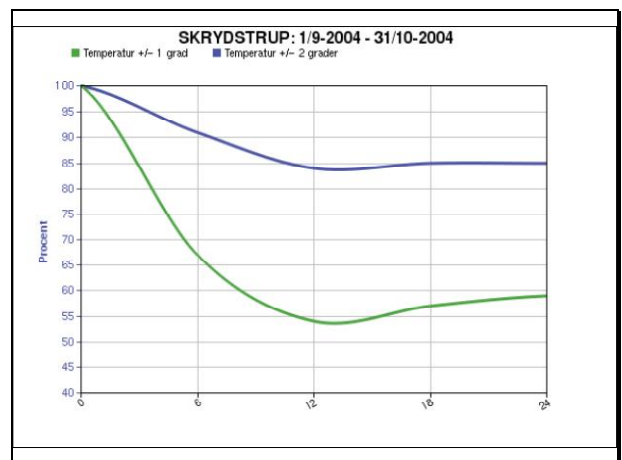
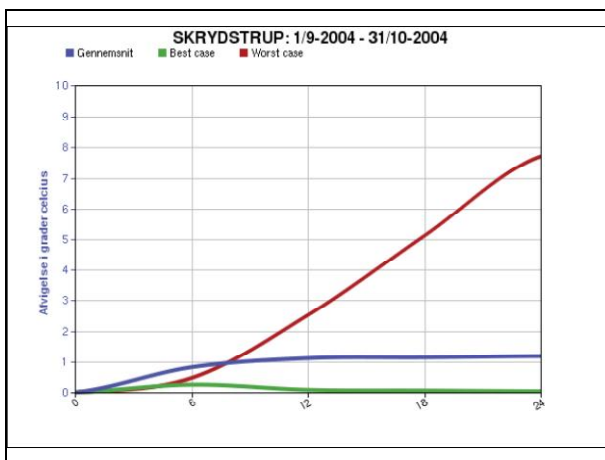
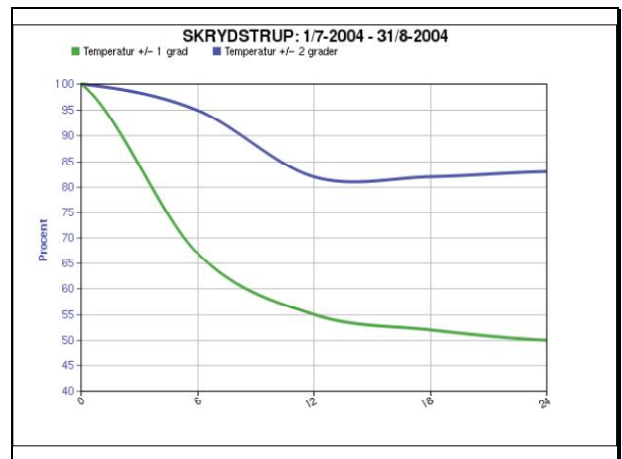
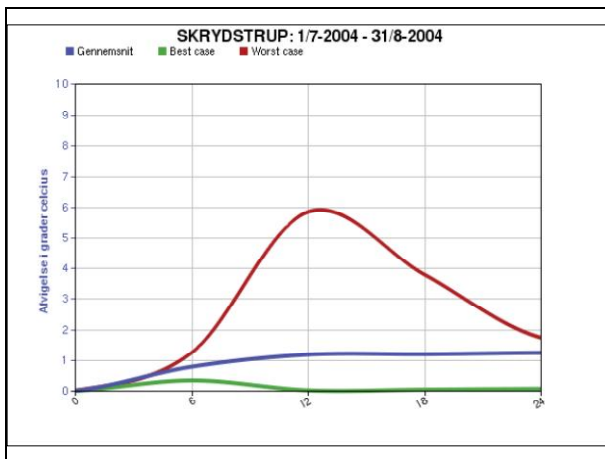
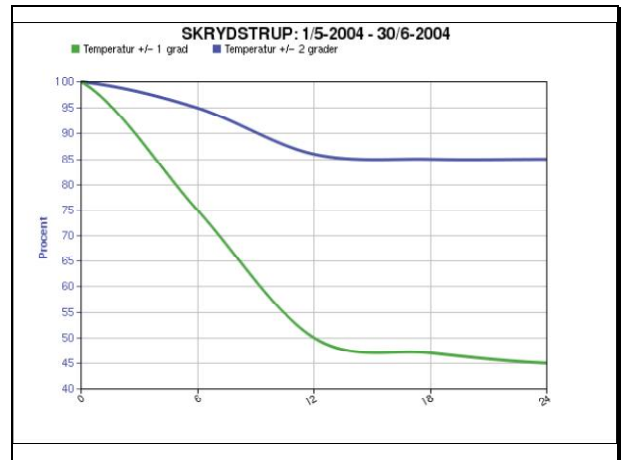
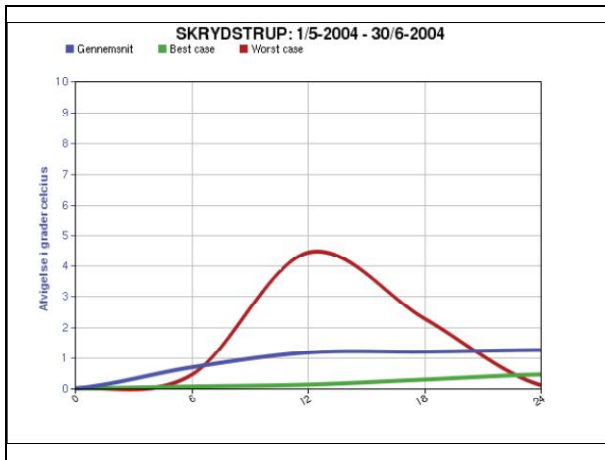




## Skrydstrup

### Absolut gennemsnitlig temperaturafvigelse

### Forudsigelighed af lufttemperatur

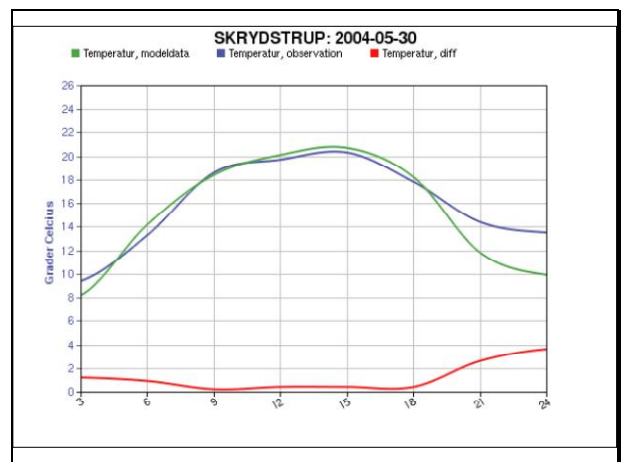
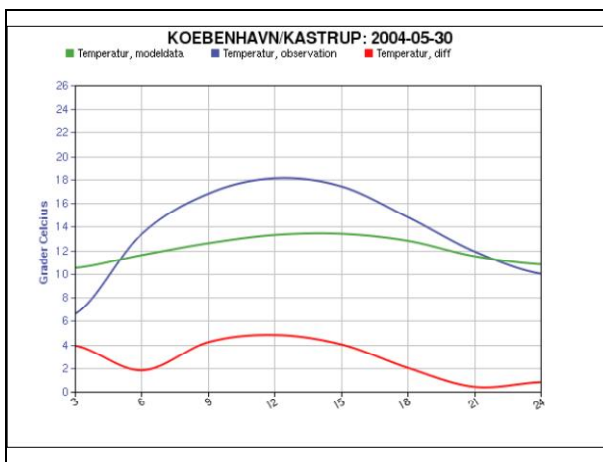
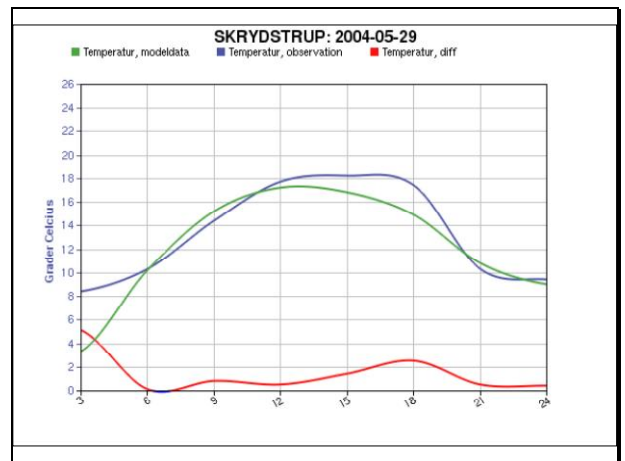
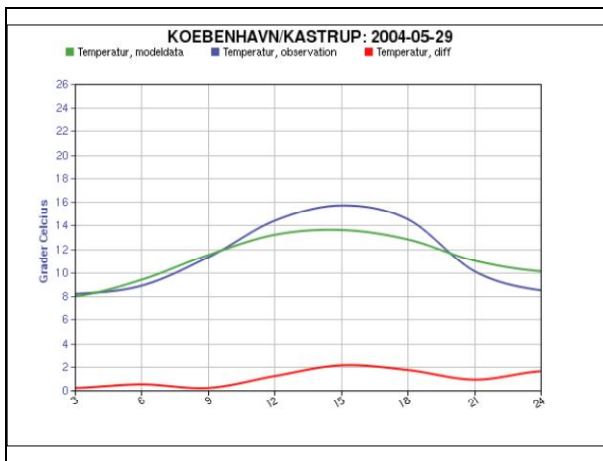
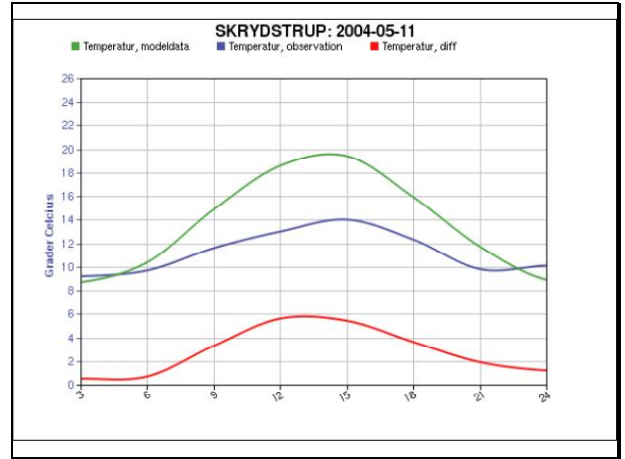
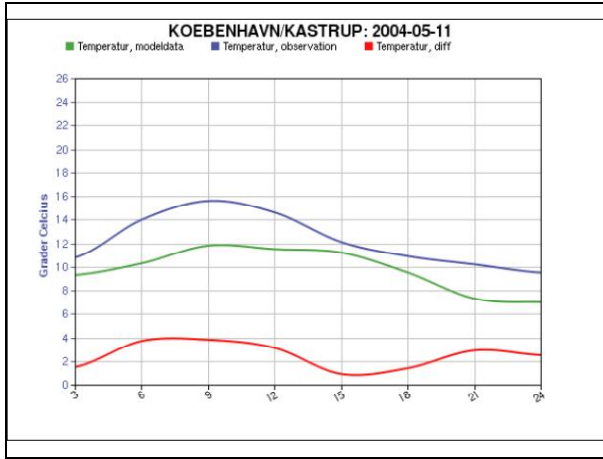


# Temperaturvariation over døgnet

## Udvalgte dage

### København/Kastrup

### Skrydstrup

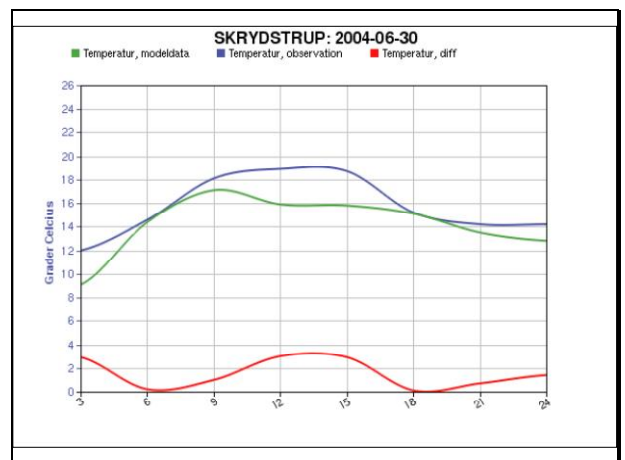
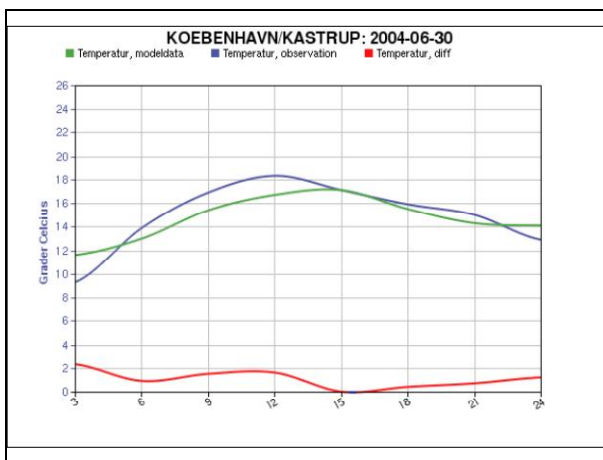
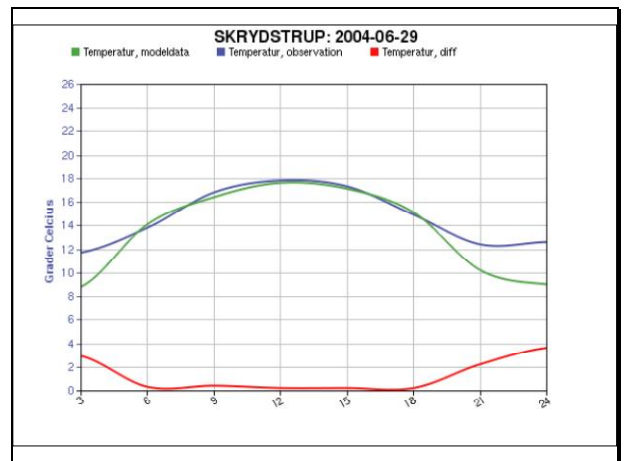
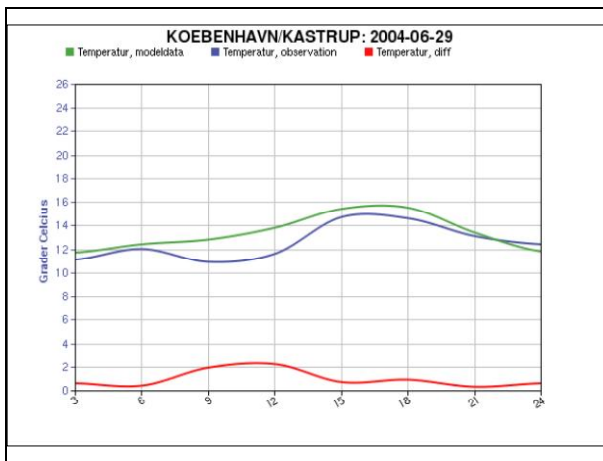
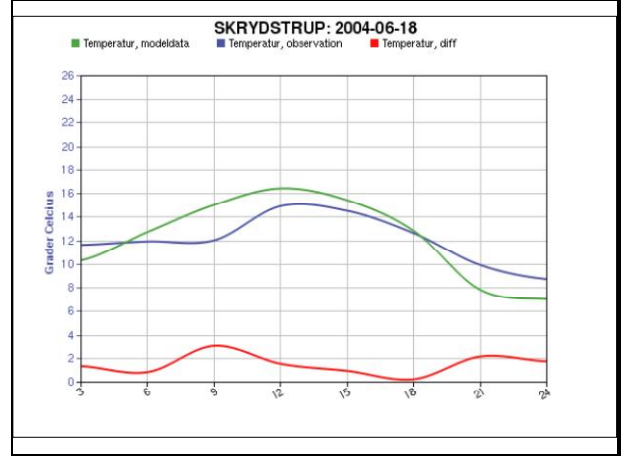
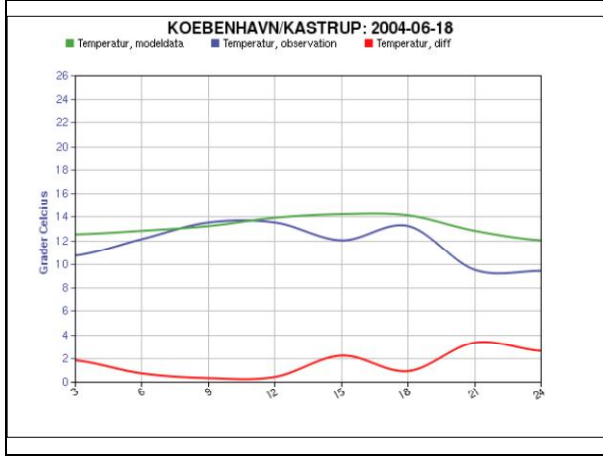


# Temperaturvariation over døgnet

## Udvalgte dage

### København/Kastrup

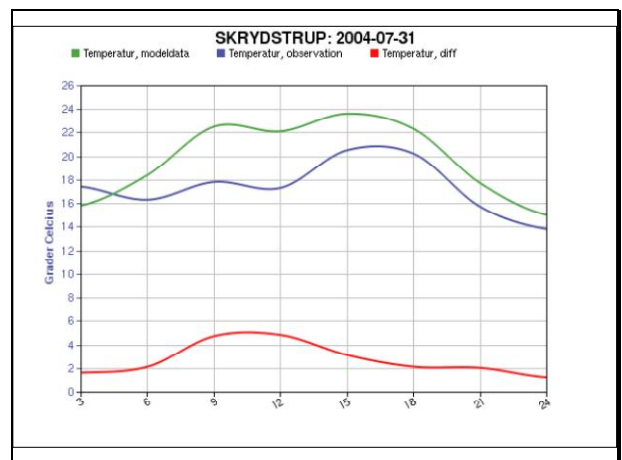
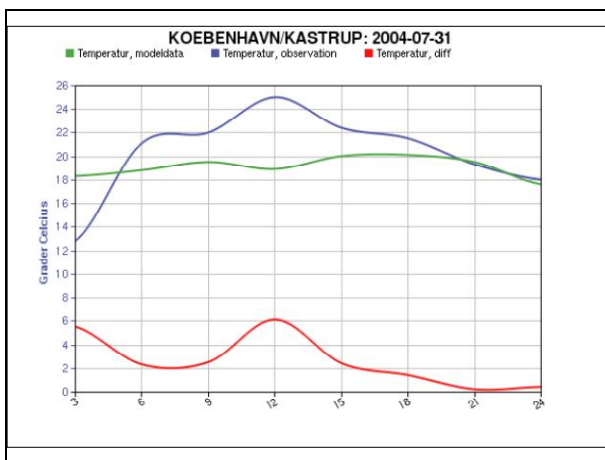
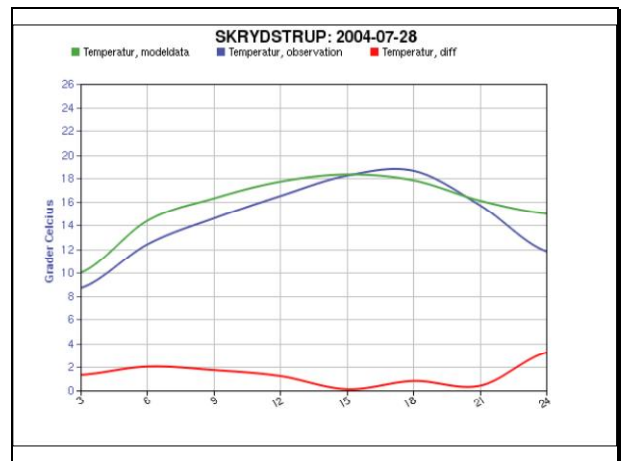
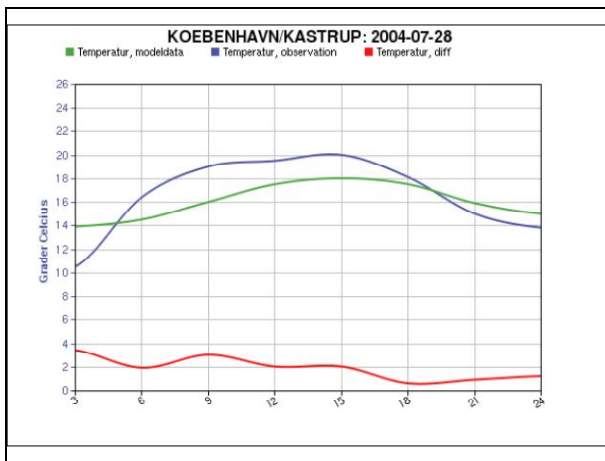
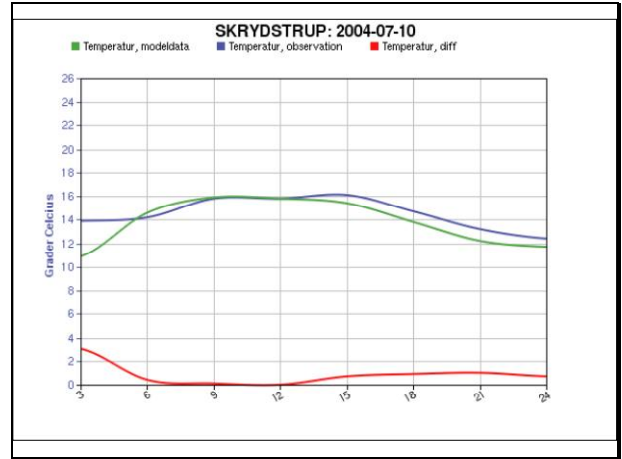
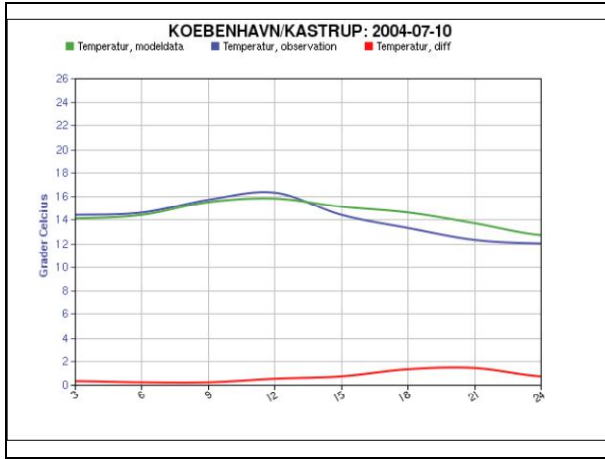
### Skrydstrup



## Temperaturvariation over døgnet Udvalgte dage

### København/Kastrup

### Skrydstrup

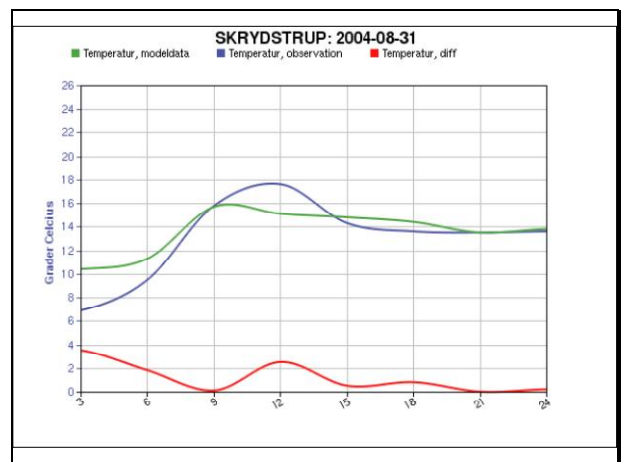
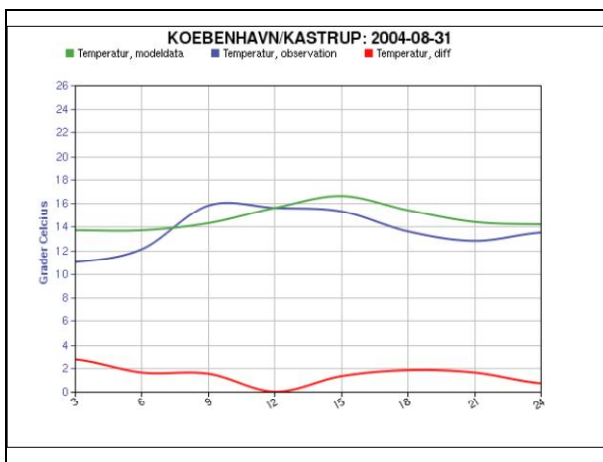
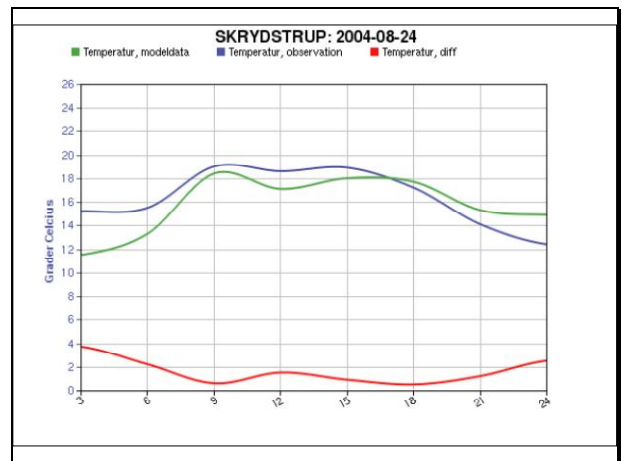
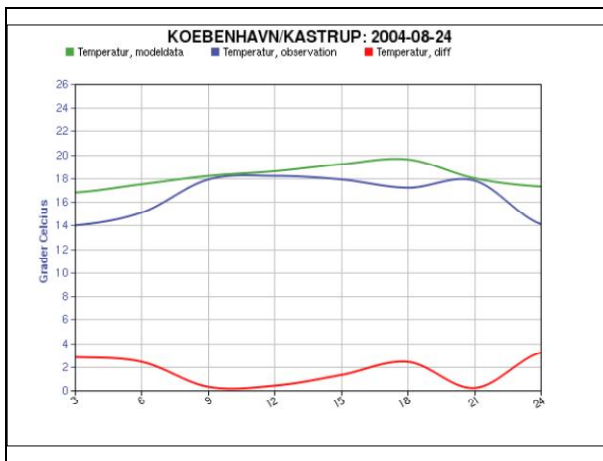
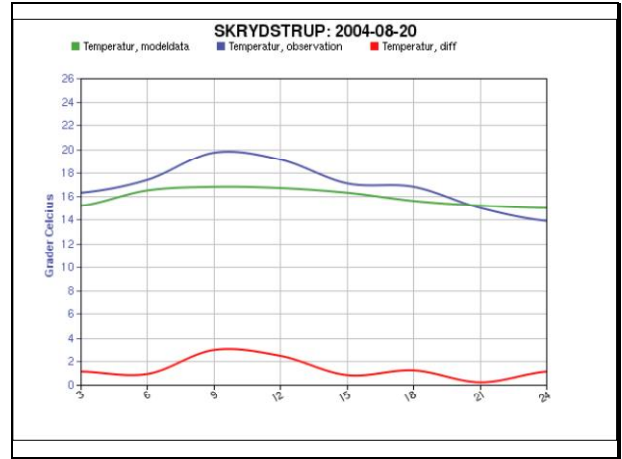
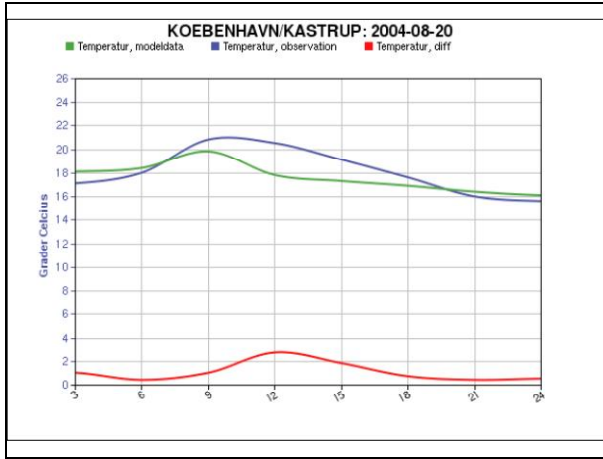


# Temperaturvariation over døgnet

## Udvalgte dage

### København/Kastrup

### Skrydstrup

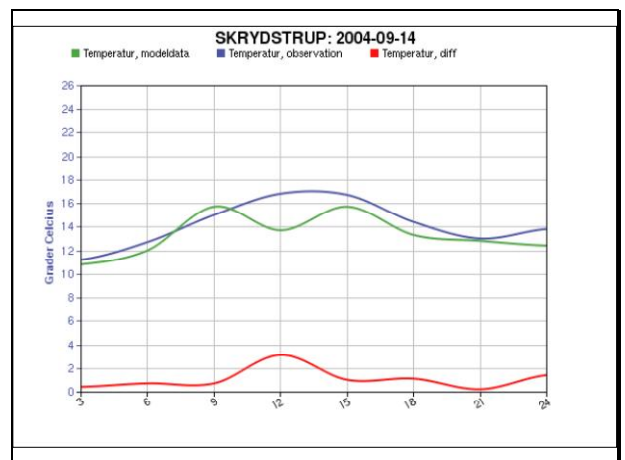
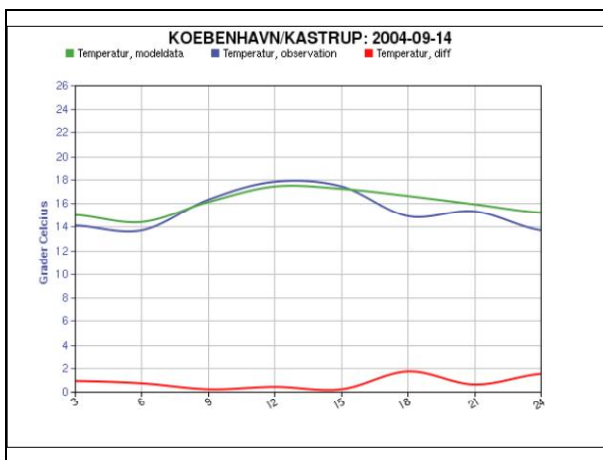
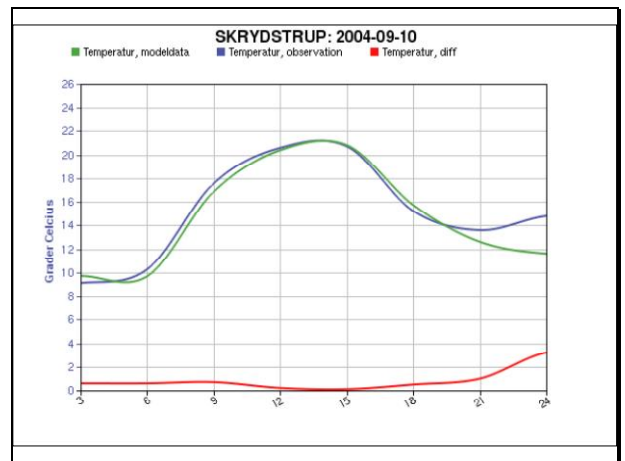
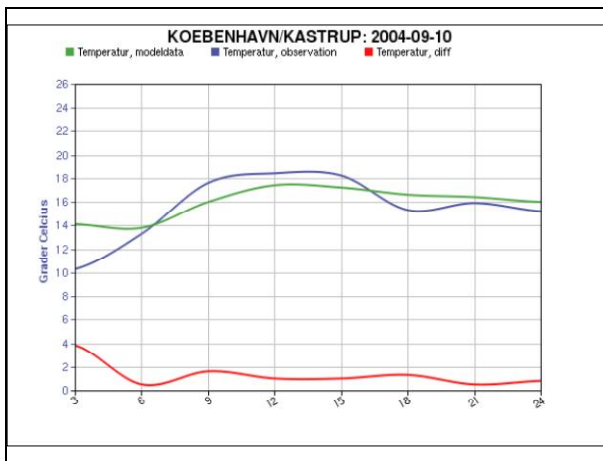
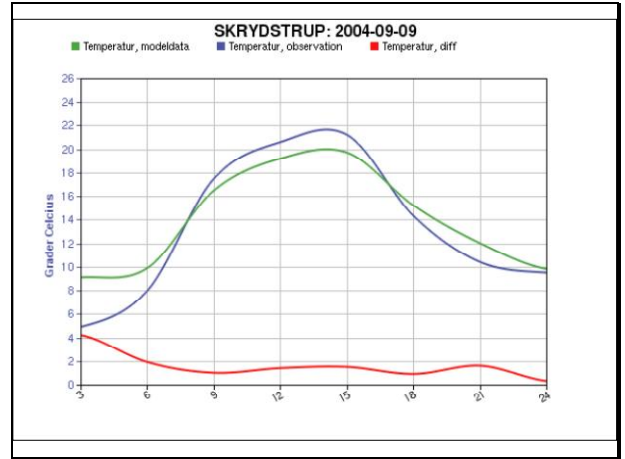
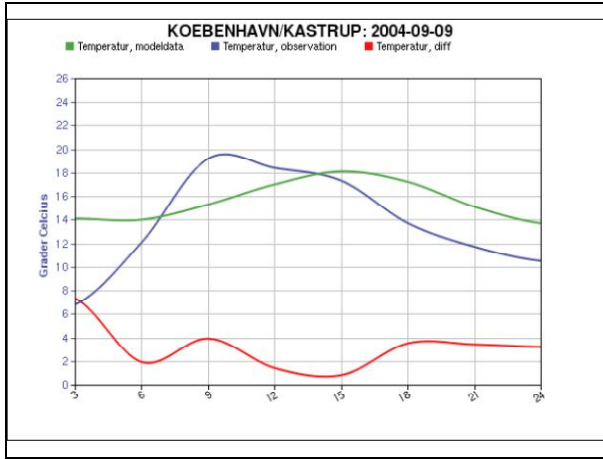


# Temperaturvariation over døgnet

## Udvalgte dage

### København/Kastrup

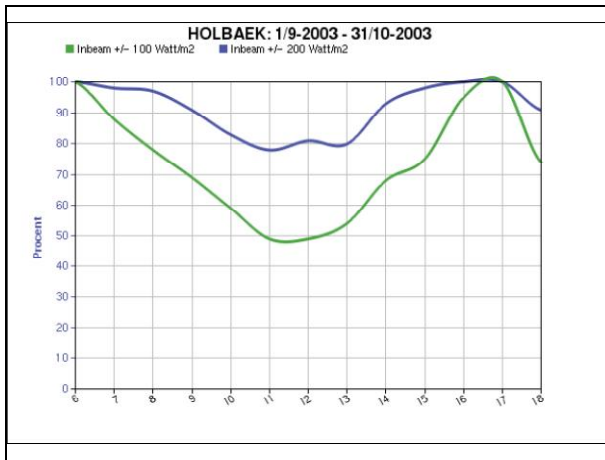
### Skrydstrup



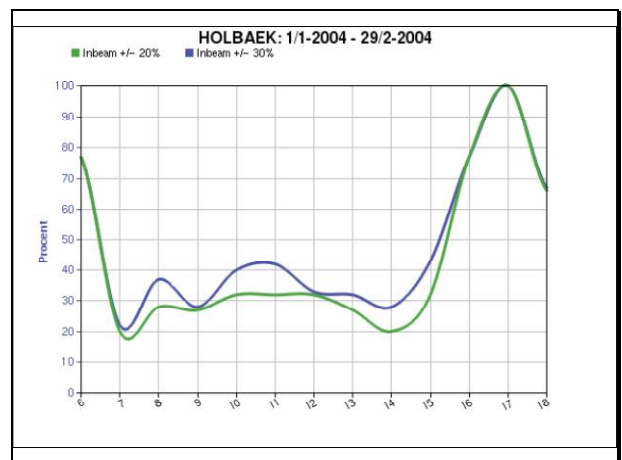
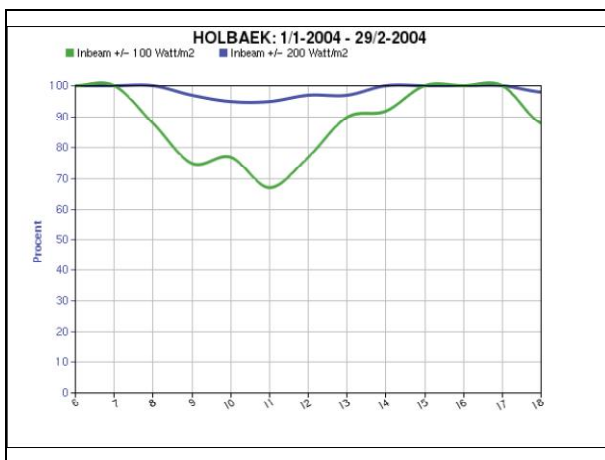
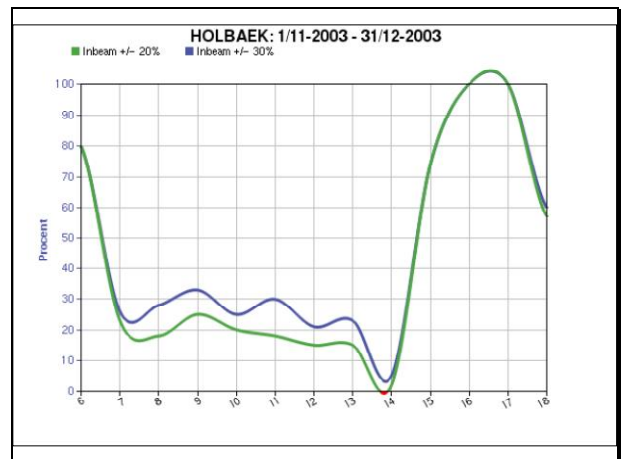
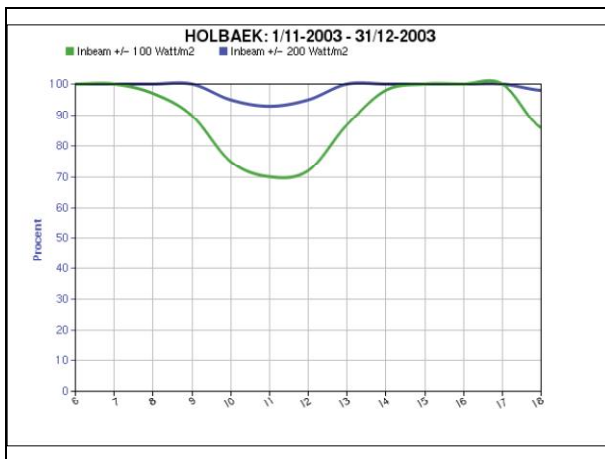
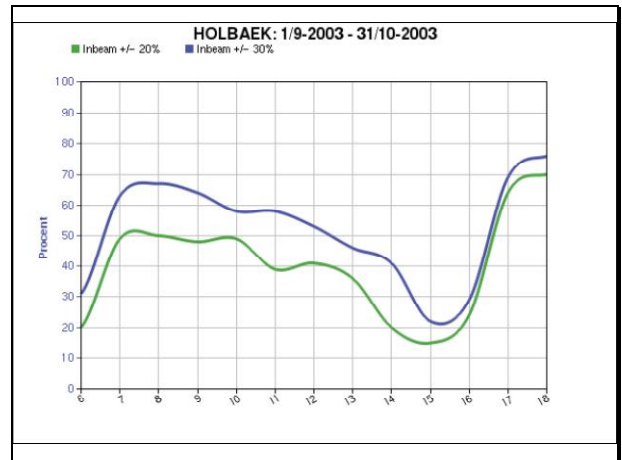


## Holbæk

### Forudsigelighed af solindstråling, Watt

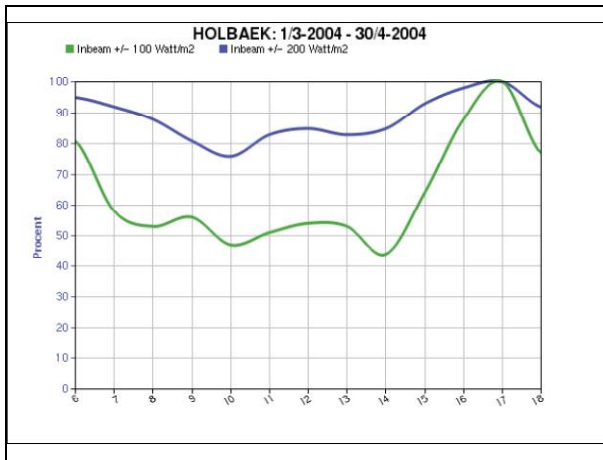


### Forudsigelighed af solindstråling, %

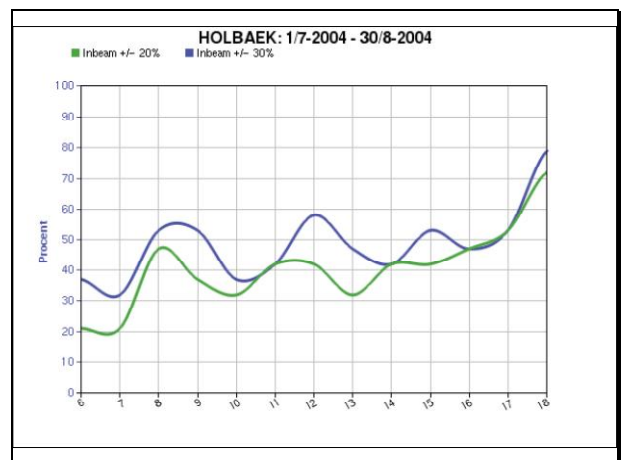
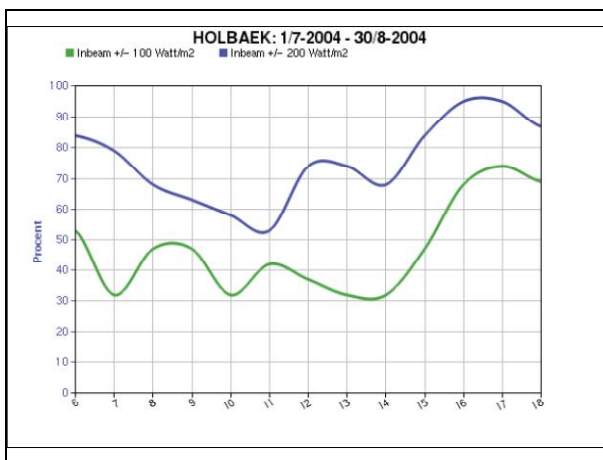
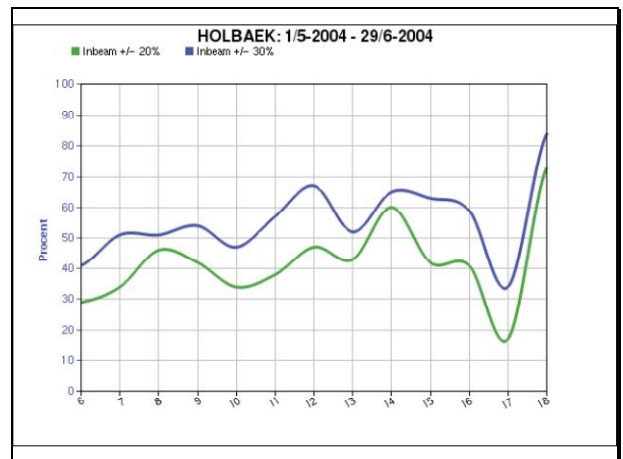
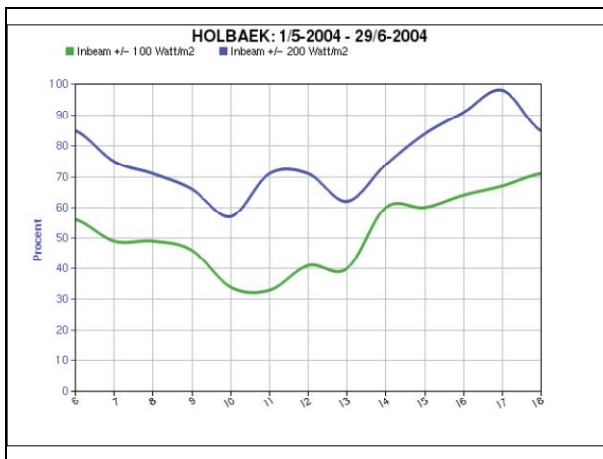
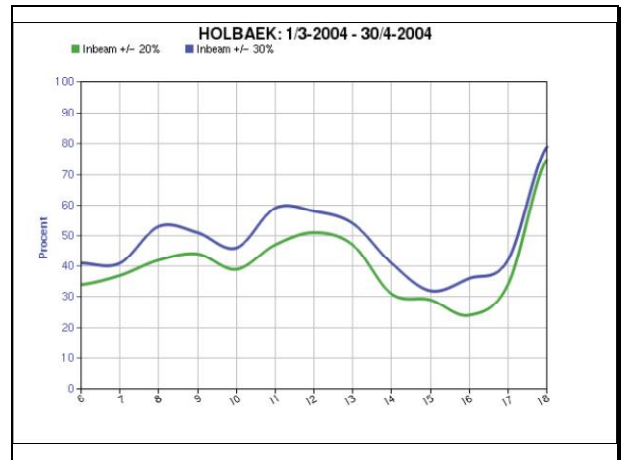


## Holbæk

### Forudsigelighed af solindstråling, Watt



### Forudsigelighed af solindstråling, %





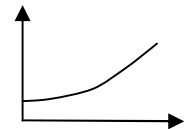
## 7.2 Tavlenoter fra opstartmøde

### 7.2.1 Tavlenoter fra opstartmøde den 2003-12-15

#### Forventet resultat

Optimering

- Underkøling >< boost med luftvarme
  - Ikke noget spec. for dette problem
  - Hvordan skal husene bygges for at kunne udnytte natkøl?
    - Gips/tæpper ..... → ..... ekspon. konstr. (à la SBI-184)
  - Hvordan forløber temp. i konstruktioner
    - Lokalisere konstr. eksempler
  - Hvor (u)sikre er vejrdata (0-16 timers sigt)
    - Solindfald
    - Lufttemp.
    - Vindhastighed



#### Udviklingsstigen

1. Uden natkøling
2. Med natkøling til ~ 21 °C
3. Med natkøling til ~ 18 °C
  - + boost med luftvarme
4. Som 3) + fremskrevne vejrdata

For forklaring til noterne, se bilag 7.3, Møde nr. 1

### 7.3 Uddrag af mødereferater

**Møde nr. 1** For "Analyse af lokale vejrprognosers nøjagtighed" opstilles konfidensintervaller for den statistiske nøjagtighed for prognoser for de kommende 0 – 16 timer for:

2003-12-15

- Solindstråling (global stråling)
- Lufttemperatur
- Vindhastighed og -retning

"Beregning af energiforbrug ved forskellige driftsformer" foretages for 4 driftsformer:

1. Uden natkøling
2. Med natkøling til ~ 21 °C
3. Med natkøling til ~ 18 °C  
+ boost med luftvarme
4. Som 3) + fremskrevne vejrdata

Det skal dog bemærkes, at pkt. 2. og 3. ikke er indeholdt i projektbeskrivelsen. Det vurderes imidlertid, at disse scenarier er vigtige at have med og at det kan rummes indenfor projektets økonomiske rammer.

**Møde nr. 2** **Opbygning af edb-model til analyse af potentialet**  
2004-04-20 Der opbygges en simpel bygningsmodel af et indeliggende rum.

Følgende parametre skal herefter varieres:

- U-værdi
- Glasareal
- Aktiv termisk tyngde (varmekapacitet)
- Aktiv termisk tyngde (modstand)
- Overgangsmodstand

Endelig gennemføres beregninger, hvor udeklimaet varierer efter følgende model:

1. Sinuskurve
2. TRY
3. Prognose

**Møde nr. 3**

2004-06-15

**Edb-model**

Opbygning af Edb-model igangsættes NU.

Special-version af BSIM drøftes med Karl Grau (SBI).

**Videre arbejde**

Analyse af bygningsfysiske forhold:

Der udarbejdes oplæg til beregning af potentialet.

Mulighederne for besparelser beskrives nærmere.

KBW kom med en idé om transport af varme og kulde ind og ud af bygningskonstruktionerne vha. heat-pipes og mulighederne blev diskuteret. Videre analyser ligger udenfor dette projekt.

Komfortkriterier ved strålingsasymmetri blev diskuteret. Komfortligningerne tilsiger, at termisk komfort kan opnås selv ved stor strålingsasymmetri. Praktisk erfaring viser imidlertid, at det kan være vanskeligt at tilvejebringe forhold, der ikke giver anledning til gener. For de teoretiske betragtninger i dette projekt, antages det, at det vil være muligt at skabe termisk komfort ved nedkøling af bygningskonstruktionerne med en passende forhøjelse af lufttemperaturen.

**Møde nr. 4**

2004-10-13

**Status**

*Vejrdata*

Registrerede timeværdier for temperatur og global stråling er sammenholdt med 16 timers prognose. Temperaturen kan forudsiges med en nøjagtighed på +/- 2K med ca. 97 % sandsynlighed og +/- 1K med ca. 70 % sandsynlighed.

Til sammenligning har en prognose baseret på det foregående døgns temperaturer kun en sandsynlighed på ca. 55 % ved en nøjagtighed på +/- 2K.

### Beregninger

Der er gennemført overslagsberegninger af potentialet. Disse indikerer, at besparelspotentialet vil være yderst begrænset i forhold til at styre efter en fast nattemperatur.

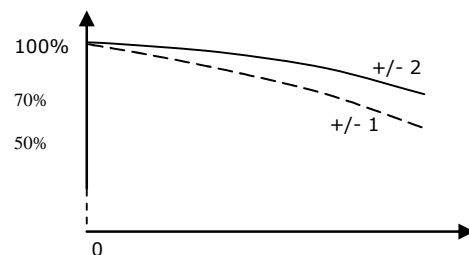
BSIM model til systematisk eftervisning af dette resultat er under opbygning.

### Videre forløb

#### Vejrdata

Grafisk præsentation af usikkerhederne blev diskuteret. Det blev besluttet at udarbejde 6 grafer, hver repræsenterende ca. 2 måneder, med prognose-sikkerheden som funktion af prognosens længde (0 – 16 timer).

Eksempel:



Global stråling præsenteres tilsvarende for de samme perioder.

For perioderne fra marts til oktober suppleres med 2-3 grafer, der skal tydeliggøre om temperaturforløbet over døgnet har betydning for prognosens nøjagtighed idet dette kan have stor betydning for udnyttelsen af natkøling. Der tænkes her også på om usikkerhederne skyldes et generelt højere eller lavere temperaturniveau for døgnet eller der er tale om en forskydning eller en udjævning i forhold til prognosen.

### Beregninger

Der arbejdes videre med opbygning af beregningsmodel. Specielle beregningsfaciliteter i BSIM drøftes med Karl Grau (SBI).

**Møde nr. 5**

2004-11-11

**Status**

*Vejrdata*

Vejr2 haft en brand på kontorerne, det har sat dem uger tilbage. (Efterfølgende er fremsendt grafer for Kastrup og Skrydstrup).

*Beregninger*

Nogle af de tidligere beregningsresultater fra BSIM kan tilsyneladende ikke reproduceres. Der arbejdes med at finde årsagen.

**Møde nr. 6**

2004-11-24

**Status**

*Vejrdata*

Vejr2 fremlagde grafer over temperaturprognoser for Kastrup og Skrydstrup samt prognoser for global stråling for Holbæk.

*Beregninger*

Forklaring på manglende reproducerbarhed er fundet.

**Videre forløb**

*Vejrdata*

Vejr2 skriver uddybende forklaring til graferne for temperaturafvigelse samt til graferne for stråling.

Desuden udarbejdes grafer for 2-3 udvalgte døgn i perioden 1/5 til 30/9, hvor der har været en stor afvigelse mellem prognose og registrerede data. Graferne skal vise, om temperaturforløbet er forskudt, udjævnet eller generelt for højt eller lavt.

*Beregninger*

Der gennemføres beregninger af energiforbruget, hvis natkølingen starter til et fast tidspunkt og fortsætter til en bestemt temperatur (fx 20 °C) er nået. Lufttemperaturen boostes ikke om morgenen.

Dernæst gennemføres beregninger af energiforbruget, hvis nat-

kølingen starter til et fast tidspunkt og fortsætter til en bestemt temperatur (fx 16 °C) er nået. Lufttemperaturen boostes om morgenen til fx 28 °C.

Endelig beregnes energiforbruget, hvis natkøling og morgenboost optimeres til den kommende dags belastning, idet denne forudsættes kendt med 100 % nøjagtighed.

Beregningerne gennemføres for en "normal" konstruktion, samt for en konstruktion, hvor bygningens store termiske masse er isoleret fra en mindre termisk masse, der har kontakt med opholdsrummene. Denne konstruktion vil muligvis kræve mindre energi til morgenboost, da overfladetemperaturerne hurtigt kan hæves. Til gengæld kræver den, at der er tilstrækkelig lang tid til at nedkøle konstruktionen i dybden.

**Møde nr. 7**  
2004-12-14

**Status**

*Vejrdata*

Vejr2 har skrevet forklaring til graferne for vejrdata.

*Beregninger*

De reviderede beregninger indikerer nu, at der kan være en ikke uvæsentlig besparelse ved at optimere natkølingen i forhold til en mere simpel styring.

**Videre forløb**

*Vejrdata*

Vejr2 udarbejder grafer for 2-3 udvalgte døgn i perioden 1/5 til 30/9, hvor der har været en stor afvigelse mellem prognose og registrerede data. Graferne skal vise, om temperaturforløbet er forskudt, udjævnet eller generelt for højt eller lavt.

*Beregninger*

Der arbejdes videre med analyse af besparelspotentialet.

**Møde nr. 8**

2005-02-11

**Status**

*Potentiale*

B&K har foretaget nogle grove vurderinger af potentialet. For en forholdsvis højt belastet bygning, hvor der er kølebehov året rundt, fås en potentiel besparelse på ca. 5 kWh/m<sup>2</sup> pr. år i forhold til en styring, der ikke tager højde for den kommende dags belastning.

*Beregninger*

SBi har udviklet en algoritme til Bsim, hvor natkølingen optimeres til mindst muligt samlet energiforbrug til køling og morgenboost. Beregning på en simpel celle viser en besparelse på kølingen på ca. 17 % og på opvarmning ca. 32 %. Især sidstnævnte skal verificeres; er det af hele opvarmningsforbruget eller kun forbruget til morgenboost?

**Videre forløb**

*Beregninger*

Der skal stadig også regnes på den situation, at der kun natkøles til fx 20 °C og der ikke morgenboostes (se ref. 06).

**Møde nr. 9**

2005-05-17

Som vi aftalte i dag, vil I foretage følgende ændringer til BSim (som jeg forstår det) inden næste møde på onsdag:

1. Check for starttemperatur overspringes ved prædiktiv styring, idet BSim selv beregner set-punkt og start-tidspunkt.
2. Radiatorvarme indregnes i optimeringen.
3. Der gives mulighed for ventilation uden ventilator (naturlig ventilation) ved natkølings-algoritmen.

**Møde nr. 10 Gennemgang af programmeringsrutinerne**

2005-05-25

Mødet startede med at tilrette programkoden efter de retningslinier, der blev enighed på mødet den 2005-05-17. Det blev dog hurtigt klart, at det var nødvendigt først at fastlægge følgende:

- de betingelser, der skal igangsætte optimeringsproceduren
- hvilke parametre, proceduren skal optimere på
- de betingelser, der skal stoppe optimeringsproceduren

*Startkriterie*

Forecast og iterativ bestemmelse af setpunkt for natkøling starter når en Schedule for Ventilation med NightCoolCtrl er aktiv, hvis den operative temperatur,  $t_{op}$ , i den aktuelle zone er højere end udetemperaturen,  $t_e$ .

*Optimering af energiforbrug*

Energiforbruget opdeles i energiforbruget til køleflade,  $E_{ClCoil}$ , energiforbruget til varmeplade,  $E_{HtCoil}$ , og energiforbruget til radiatorer,  $E_{Heating}$ .

Når betingelsen for at starte optimeringsproceduren er opfyldt, gennemføres følgende trin:

1. Energiforbruget for det efterfølgende døgn beregnes uden natkøling, men med øvrige systemer (herunder ClCoil og Cooling) aktive. Hvis  $E_{ClCoil} > 0$  fortsættes til næste trin, ellers afbrydes proceduren.
2. Dernæst beregnes energiforbruget, hvor der natkøles til en temperatur (operativ temperatur eller konstruktionstemperatur afhængigt af den valgte følerplacering), der sænkes i små step (fx 0,1 K) fra den aktuelle temperatur. Det samlede forbrug sammenlignes med forbruget ved den forrige beregning. Hvis forbruget er højere ved en ny beregning end ved den forudgående, anvendes temperaturen fra denne forudgående beregning som set-punkt for natkølingen. Hvis undervejs  $t_{op}$  eller  $t_{constr} \leq t_{indblæsning}$  (afhængigt af valgt følerplacering) afbrydes proceduren.



3. Hvis  $t_{op}$  senere i samme Schedule overstiger det beregnede setpunkt for natkølingen, starter proceduren igen.

En hurtig metode til at skyde sig ind på det nye setpunkt for natkølingen, er at se om  $E_{ClCoil}$  er større eller mindre end  $E_{HtCoil} + E_{Heating}$  og derefter sænke set-punktet, hvis  $E_{ClCoil}$  er større end  $E_{HtCoil} + E_{Heating}$  og hæve setpunktet, hvis  $E_{ClCoil}$  er mindre end  $E_{HtCoil} + E_{Heating}$ . Denne beregning vil imidlertid stoppe, når  $E_{ClCoil}$  er lig med  $E_{HtCoil} + E_{Heating}$ , og det giver ikke nødvendigvis det laveste samlede energiforbrug. Denne metode blev derfor forkastet.

### Eventuelt

Den optimale strategi for ændring af luftmængde og temperatur blev diskuteret. Problematikken er meget relevant, men ligger uden for dette projekts rammer.

Optimering af styringsstrategi kunne være et nyt selvstændigt projekt, hvis det da i øvrigt bliver relevant at tale om aktiv køling i fremtidens bygninger. Beregningen skal baseres på effektkurver for ventilatorer og kølemaskiners COP-faktor ved varierende ude-temperatur og belastning.

## 7.4 Paper til BS 05

7.4.1 *Paper til IBPSA's Building Simulation conference i Montreal  
15-18 august 2005.*

### **Use Of Weather Forecasts To Control Night Cooling**

Kim B. Wittchen, Danish Building Research Institute, Hørsholm, Denmark  
Ejvind Løgberg, Birch & Krogboe A/S, Consultants and Planners, Virum, Denmark  
Søren Pedersen, Birch & Krogboe A/S, Consultants and Planners, Virum, Denmark  
Rolf Djurtoft, Birch & Krogboe A/S, Consultants and Planners, Virum, Denmark  
Jesper Thiesen, Vejr2 – Private Weather-service of Denmark, Roskilde, Denmark

#### **ABSTRACT**

Traditional night cooling control strategies relies on the knowledge of the current situation – indoor and outdoor. The building is ventilated – passive or as free cooling via a mechanical ventilation system – with cool night air, hoping that the building will warm up the following day due to excess of free gains. In cool or moderate climates this often results in a thermal discomfort the next morning due to under-cooled constructions. As a consequence the system is often turned off. Alternatively the control system is modified to provide a hot air boost in the morning to compensate for the cold constructions. The latter is the best solution as the boost only heats the air and leaves the stored cooling energy inside the constructions for subsequent release to the room.

No matter which solution, the result is increased energy consumption for space cooling or heating compared to an optimal situation where heating and cooling is minimised for the next day. This paper focus on a method taking advantage of forecasts issued by the local meteorological office as background for making an intelligent decision about how to control night ventilation – set-point and air flow rate.

## USE OF WEATHER FORECASTS TO CONTROL NIGHT COOLING

Kim B. Wittchen<sup>1</sup>, Ejvind Løgberg<sup>2</sup>, Søren Pedersen<sup>2</sup>, Rolf Djurtoft<sup>2</sup> & Jesper Thiesen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Danish Building Research Institute, Hørsholm, Denmark  
+45 4574 2396, kbw@SBI.dk

<sup>2</sup>Birch & Krogboe A/S, Consultants and Planners, Virum, Denmark

<sup>3</sup>Vejr2 – Private Weather-service of Denmark, Roskilde, Denmark

### ABSTRACT

Traditional night cooling control strategies relies on the knowledge of the current situation – indoor and outdoor. The building is ventilated – passive or as free cooling via a mechanical ventilation system - with cool night air, hoping that the building will warm up the following day due to excess of free gains. In cool or moderate climates this often results in a thermal discomfort the next morning due to under-cooled constructions. As a consequence the system is often turned off. Alternatively the control system is modified to provide a hot air boost in the morning to compensate for the cold constructions. The latter is the best solution as the boost only heats the air and leaves the stored cooling energy inside the constructions for subsequent release to the room.

No matter which solution, the result is increased energy consumption for space cooling or heating compared to an optimal situation where heating and cooling is minimised for the next day. This paper focus on a method taking advantage of forecasts issued by the local meteorological office as background for making an intelligent decision about how to control night ventilation – set-point and air flow rate.

### INTRODUCTION

One way to reduce the energy consumption for conditioning spaces in a building is to cool down the constructions by letting cool night air flow into the building. The flow of cool night air can be obtained either as free cooling in a mechanical ventilation system or as ventilation driven by natural buoyancy. This control normally aims at cooling the building to a certain temperature, e.g. 18 °C, and thus start the next days heating up from this lower temperature level. The building will require less cooling energy during the next day, as cooling has been stored in the constructions during the previous night. The night ventilation will typically start when the night air has reached a temperature some degrees below the indoor temperature (Oestreicher et. al, 1996) and run until the room or the constructions have reached a certain temperature or until 1 hour before the work starts in the morning. The last hour, without night cooling

ventilation, before start of the work will allow the building to gain a little of the temperature drop and increase the comfort level. Previous works have showed that this approach have a good potential for saving cooling energy (Braun, 1990), (Givoni, 1998).

In cold or moderate climates, this traditional night cooling strategies have a tendency to create indoor climate problems during the first hours of work. If the constructions are cooled to eliminate the cooling load of the next day, the indoor operative temperature will normally be too low to be acceptable (Fanger, 1972). To avoid this, a hot air boost is often introduced in the morning to compensate for the cool constructions.

In a recent research project (PSO ELFOR 2003, Project no. 335-006, *Optimising of night cooling in buildings using local weather forecasts*) this problem has been addressed and the potential energy savings estimated for office buildings. New possibilities for control strategies have been evaluated using detailed thermal building simulations in combination with forecasts for the upcoming next hours of outdoor conditions. The passive night cooling control strategies are thus dependent not only on the current conditions in the building and the environment, but also on a forecast of the conditions of the outdoor climate. The outdoor climate prediction can either come as forecasts from the local meteorological office via a network connection or as in-house predictions of the outdoor climate. In the present project the weather forecasts was foreseen being provided by a local meteorological office. It was thus of importance to gain confidence in the accuracy of these forecasts.

A prototype of an intelligent control strategy has been implemented in a thermal building simulation tool. Preliminary results indicates that the energy consumption for space cooling and heating can be decreased, while at the same time improving the thermal indoor climate.

### RESEARCH PROJECT

A research project was set up to investigate the possible energy saving by having a better control strategy for night cooling in office buildings. The thesis of the research project was that having accurate knowledge of the weather (temperature and solar irradiation) for



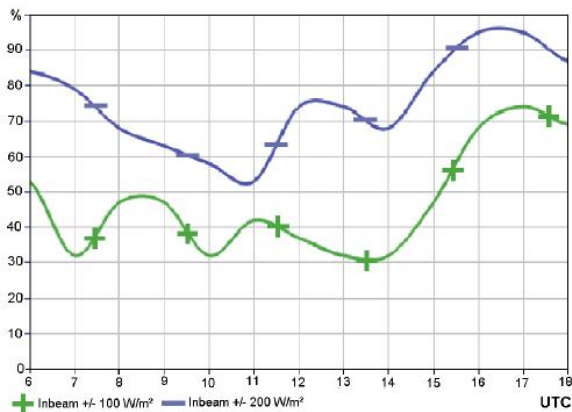


Figure 3. Predictability ( $\pm 100 \text{ W/m}^2$ ,  $\pm 200 \text{ W/m}^2$  respectively) for solar irradiation forecasts 6 - 18 hours ahead as average during July and August of 2004 for the meteorological station at Holbæk (coastal near).

In general the survey proved it possible to predict solar irradiation within a margin of  $\pm 100 \text{ W/m}^2$  for the coming day in less than 50 % of the cases. Solar irradiation with a margin of  $\pm 200 \text{ W/m}^2$  could be predicted in approximately 70 % of the cases (figure 3). The largest absolute errors are found around 11 UTC (1 PM local summertime), which normally is the hour with the highest absolute value of solar irradiation.

A numerical large error in predicted solar irradiation around noon is not necessarily critical for the prediction of the cooling load in a building. At this time of the day the solar altitude is high solar gain can thus easily be reduced by and horizontal, fixed shading.

From this retrospective survey, it seems that using forecasts from a meteorological office can give reasonable input for a predictive night cooling strategy. The analyses of the night cooling strategy in office buildings have thus been conducted under the assumption that it is possible to get reasonable accurate forecasts that makes it possible to establish a optimal night cooling strategy.

## NIGHT COOLING ANALYSES

The second part of the research project focused on determining the potential energy saving by using an optimised 24 hour weather forecast to control the night cooling level of an office building.

In this work the acceptable comfort level have been judged from the simulated operative (average of air- and mean radiant temperature) temperature of the room. This is not a precise evaluation of the comfort level, but the simulation model does not provide information about the comfort level (PMV or PPD, Fanger (1972)). The operative indoor temperature, which is assumed to give an acceptable comfort level, has been fixed to 21 °C in this study.

## Forecast model

The goal of the intelligent night cooling strategy is to eliminate or minimising the heating and cooling load of the next day by using passive cooling of the constructions to the right temperature. The right temperature is determined by a simulation of the next day's cooling and heating loads when using the weather forecast as input for the simulations.

To investigate the energy saving potential, a computer model was set up. The model uses knowledge of the climate data file to make a 100 % accurate prediction of the weather for the next 24 hours.

Such a prediction is the most extreme one can imagine and represents thus the maximum energy saving by optimising the control of a passive night cooling system. This forecast model was used as a first attempt to determine the energy saving potential when using advanced night cooling control strategies. Real energy savings due to less accurate predictions are thus less.

The "prediction" method was implemented in the hygro-thermal simulation tool BSim (Wittchen et. al, 2000-2005) (Rode & Grau, 2003). Results from simulations of the intelligent night cooling control were compared to results from simulations with a standard night cooling strategy and more traditional ventilation strategies.

## Model implementation

In the model two parameters can be adjusted when trying to find the optimum night cooling of the constructions in a building to meet the free gains. One is evidently the temperature that the constructions should reach during the night. The other parameter is the volume of the airflow to cool the constructions. The airflow volume together with the actual temperature difference determines the passive cooling capacity of the night air. Increase of the airflow will increase the cooling if the set-point temperature can not be reached during the time-span of the night.

The 100 % accurate forecast of the next 24 hours of climate was implemented in the BSim program package as:

1. The program is interrupted at the time of the beginning of a night cooling period. Optimisation iterations are then carried out.
2. Simulation, using the night cooling set point from the previous simulation until the end of the next day, is performed.
3. Results are compared to upper and lower acceptable limits (heating and cooling set points) of the operative indoor temperature. If the indoor temperature is within the limits, the program will try to minimise energy consumption for cooling and heating.



4. If the indoor temperature is *not* within the limits, a new night cooling set point and airflow is calculated in order to be inside the limits of the indoor operative temperature and minimising the energy consumption, and the simulation loops back to 2.
5. When the results are within the limits of the indoor operative temperature, or the cooling and heating load is minimised, results are added to the result log and normal simulation resumes.

A night cooling technique – with or without an advanced control strategy – should only be used if there is sufficient cooling potential in the night air. The advanced night cooling is thus subject to the general night cooling start conditions. The night cooling set point must be some degrees below the indoor operative temperature and the outdoor temperature must be some degrees below the night cooling set point – at least if the cool night air is to be moved by a mechanical ventilation system. This conditions ensures that the ventilation system do not run unless there is a reasonable cooling potential in the night air, and that this potential is higher than the energy consumption used by the fans to move the air.

## RESULT ANALYSIS

A simple building model was set up to investigate the potential of the forecasting technique to control night cooling. The rooms were equipped with standard office equipment and profiles of use. The investigated model (figure 4) has constructions with a relatively high thermal mass. The inner leaf of the walls is made of 50 mm concrete and the floor 150 mm concrete under a wooden floor. The ceiling is a lightweight construction with wood on insulation facing the room.

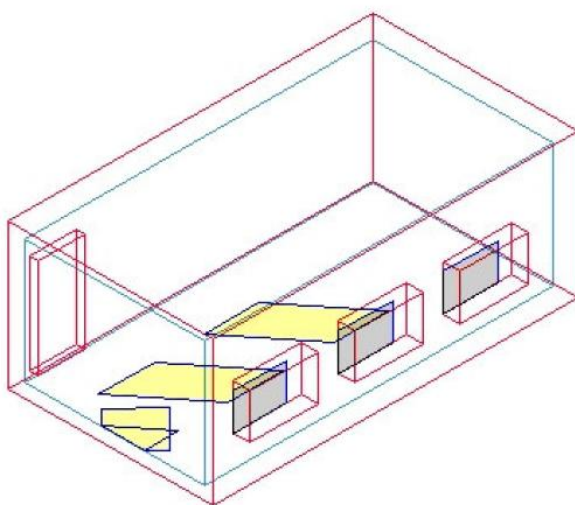


Figure 4. Wire frame diagram of thermally heavy model with indication of solar gains through windows in the facade.

In the simple building model the air is fully mixed – meaning there is only one air node. This situation is an advantage for the night cooling approach as no obstacles hinder the air from getting in contact with the constructions. In a real building, the constructions closest to the air inlets will first be influenced by the stream of cool night air. Furniture and other obstacles will in some other places hinder the air-movement over the constructions and thus reduce the storage effect of that part of the thermal mass. On the other hand, furniture does add to the surface and the thermal mass of a room. At least in thermally light rooms, furniture increases the thermal mass significantly. It is thus assumed acceptable to neglect the influence from full mixing of the air as the different parameters points in opposite directions.

## Reference case

The reference model is the same model as used for passive night cooling, just with the ventilation system running on normal control outside working hours. The cooling coil of the ventilation system must thus cope with the free gains during working hours and keep the indoor temperature at the same level as in the other models.

The goal of the simulation exercise was to keep indoor conditions at the same level. This means that the maximum indoor operative temperature and the number of hours - during working hours - with indoor temperatures below 20 °C, should be the same.

## Standard night cooling strategy

The case with standard night cooling strategy aims at reaching a fixed indoor temperature during the night by ventilating the building. The temperature set-point will normally be slightly lower than the desired temperature during the working hours.

The standard night cooling strategy is used as a supplement to the traditional cooling strategy during working hours.

In this case the standard night cooling set point is 18 °C. Night cooling will only be started if the operative temperature of the sensor zone is 3 °C (21 °C) above the night cooling set point and if the ambient temperature is 3 °C below the night cooling set point temperature (15 °C). These limitations will ensure that the cooling potential of the night air is sufficient to meet the energy consumption to the fans if the cool night air is moved via a mechanical ventilation system.

The standard night cooling strategy leads to 59 % savings of the energy requirement for cooling compared to the annual cooling load in the reference case. At the same time the energy consumption for the heating coil increases with 43 %. In total the energy saving due to utilisation of night cooling is 38 %.

Table 1. Annual energy consumption (kWh) for heating and cooling coil in the ventilation system for reference and standard night cooling case.

	REF.CASE	STD.NC
Heating coil	130	186
Cooling coil	494	203
Total	624	389

As a side effect to the energy savings, the indoor climate during summer time has been improved. The annual number of hours with indoor temperatures above 23 °C is almost cut to half. If one only look at the working hours, the number of hours with indoor temperatures above 23 °C have decreased due to the night cooling from 66 % of the hours to 52 % of the hours. At no time the indoor temperature rises above 24 °C in any of the models (see figure 5).

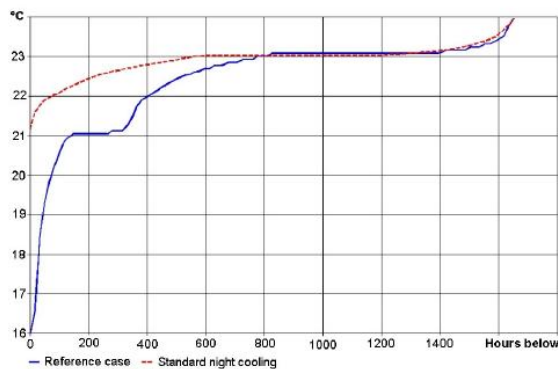


Figure 5. Working hours with indoor operative temperature below different levels in the reference case (+), and with normal night cooling.

In figure 6, heating and cooling consumption for a normal ventilation system (reference case) and a system with standard night cooling is shown during a hot summer week. Morning hot boosts are required when running night cooling, but the cooling load of the next day is decreased.

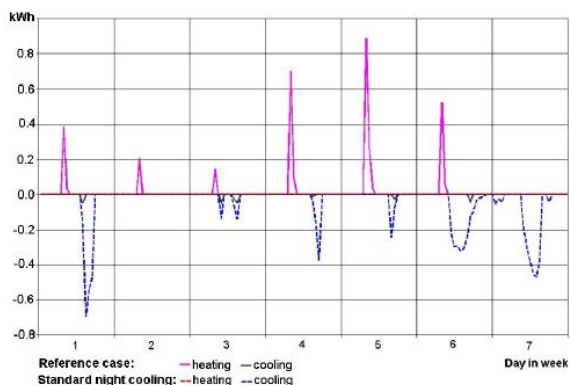


Figure 6. Cooling and heating requirement during a hot summer week in the reference case vs. a traditional night cooling strategy. Cooling energy shown as negative values.

The general indoor temperature level of the room have decreased significantly when using the night cooling compared to a normal mechanical ventilation system (figure 7). It is however necessary to heat the room air before work hours to avoid complains about the building being too cold. The reason for the discrepancy between the temperatures at the beginning of the week is due to lack of free gains from office equipment and persons during weekends and low outdoor temperatures during the weekend.

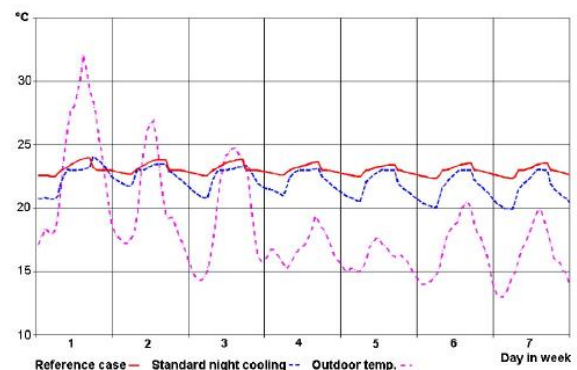


Figure 7. Indoor operative temperature during a hot summer week in the reference case and with standard night cooling.

### Forecasted night cooling strategy

The advanced night cooling strategy utilising weather forecasts aims at minimising energy consumption for conditioning the room over the next day and at the same time maintaining the level of indoor thermal comfort. The indoor thermal climate can not be kept at exactly the same level, but the number of hours between the heating and the cooling set points should not differ significantly.

Table 2. Annual energy consumption (kWh) for heating coil and cooling coil in ventilation system for standard night cooling case, and forecast night cooling case.

	STD.NC	FC.NC
Heating coil	186	240
Cooling coil	203	129
Total	389	369

The annual energy consumption for heating has increased by 28 % while the energy consumption for cooling has decreased by 36 % (table 2). The total energy consumption for conditioning the room has thus been decreased by 5 %.



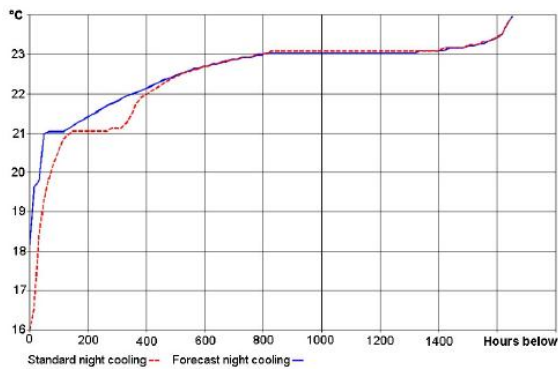


Figure 8. Working hours with indoor temperature below different levels in the standard night cooling case and with forecasted night cooling strategy.

At the same time the indoor climate has been improved. The cold morning temperatures (below 21 °C) have decreased. The number of hours with high indoor temperatures has not increased due to the use of forecasting night cooling strategy (figure 8).

Figure 9 show, as an example of the heating and cooling loads during a hot summer week in a system with normal night cooling strategy and with forecasted night cooling. The hot morning boost has increased using the forecast strategy while the cooling consumption has decreased.

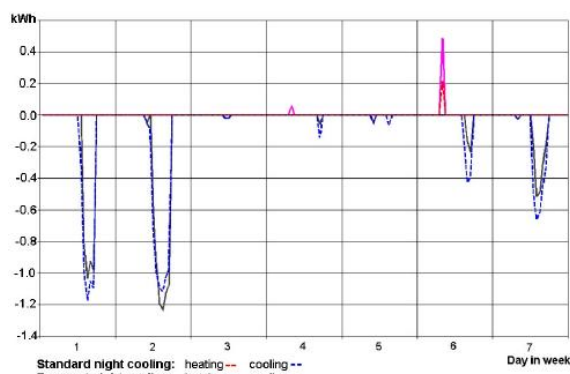


Figure 9. Heating and cooling requirement during a hot summer week with traditional night cooling strategy (red and blue), and a forecasted night cooling strategy. Cooling energy shown as negative values.

In figure 10, a graphical representation of the indoor operative temperature in the normal night cooling case and the intelligent night cooling case is shown. The forecasted night cooling control cools the building slightly more during the night. The installed cooling power and airflow is the same in the systems of the two models.

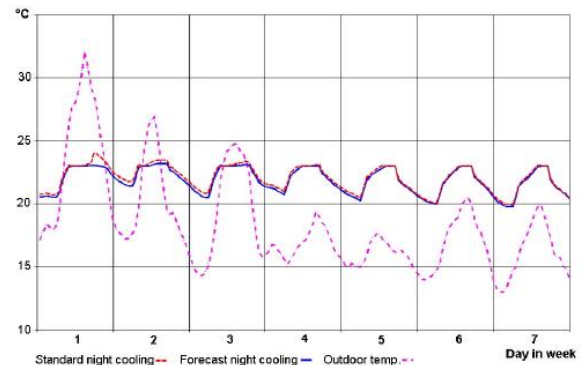


Figure 10. Indoor operative temperature during a hot summer week with standard night cooling strategy and with a forecasted night cooling strategy.

## DISCUSSION

The weather forecast of the coming 24 hours used in the simulation model is – contrary to real weather forecasts - 100 % accurate. This means that the energy savings identified by using this forecast method for controlling the passive night cooling is overestimated. In the real world, control according to a forecast issued by a meteorological office, will sometimes lead to too much night cooling and sometimes to too little night cooling. Real savings must thus be expected to be lower, but on the other hand, the investigation have shown that this control method have an energy saving potential. The potential might not necessarily lead to large energy savings, but it can definitely lead to improvements of the thermal indoor climate, especially in the morning.

The retrospective analyses of weather forecasts have been made for two Danish meteorological stations, and the uncertainties might thus not be valid for any geographical location and any meteorological office.

The forecast method is implemented as a control strategy of a mechanical ventilation system. The consumption of energy is thus connected to running the fans during night-time. A more energy efficient system configuration would be to operate the night cooling system as a natural ventilation system – i.e. by operating windows or shutters to allow cool night air to move into the building by natural buoyancy. The energy consumption for running the fans has thus been neglected in this study.

As the method has only been tested on a few theoretical models, it is not evident that the method will work for any arbitrary building configuration. The number of possible combinations in terms of internal free gains, climate conditions, glazing types, solar shading, air conditioning systems, building geometry, orientation, and thermal mass, etc. is unlimited.

For the time being the method have only been tested on theoretical basis. To prove its validity further development and tests have to be made. When

reaching a more final state, the method must be tested in real buildings and implemented in energy monitoring and control systems. At the end, the method must be implemented in a generally available thermal building simulation tool in order to allow consultants to simulate the control strategy for their specific, actual building projects.

Future research and development of the method is necessary in order to refine the method and optimise the control laws. As a result of the current research project, an application for funding of a second phase will be submitted. In this second phase, forecasts from the meteorological office will be fed into an energy monitoring and control system in a demonstration building. The system will be equipped with an algorithm to calculate the optimal night cooling set point, given the knowledge of next day's climate and the other free gains in the building.

Some factors drag in the direction in advantage of utilisation of the thermal mass. On the other hand, all models are subject to the same conditions. The results and conclusions are thus assumed to be valid.

## CONCLUSION

The use of local weather forecasts to control the passive night cooling in a building, aiming at reducing the energy consumption for cooling and morning boost heating, seems to be a promising methodology. The energy savings might not be the most important outcome from using such a method, but there are indications of improvements to the thermal indoor climate, without additional energy consumption.

If the airflow for night ventilation is driven by a mechanical ventilation system – utilising free cooling – it will lead to increase in the energy consumption for running the fans. This increase may well be of the same magnitude as the energy saving obtained by reducing of the cooling load due to efficient night cooling.

The method needs further development and testing before it can be implemented in real buildings for full-scale test and commercialisation.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The project (Project no. 335-006, *Optimising of night cooling in buildings using local weather forecasts*) has been supported financially by ELFOR's (Association of Danish Power Producers) PSO (Public Service Obligations) R&D programme 2003.

Without the corporation of the project partners from Birch & Krogboe A/S, Consultants and Planners and Vejr2 meteorological office this work would never have been made.

## REFERENCES

- Braun J.E., 1990. Reducing energy cost and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage. ASHRAE Transactions, Vol. 96, No. 2.
- Davis Energy Group, 2004. Alternatives to Compressor Cooling, Phase V: Integrated Ventilation Cooling. California Energy Commission. Public Interest Energy Research Program. P500-04-009.
- Fanger P.O., 1972. Thermal comfort analysis and application in environmental design. Mac Graw Hill.
- Givoni B., 1998. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Energy and Buildings, vol. 28 (1998) pp 25-32.
- Kummert M., 2001. Contribution to the Application of Modern Control Techniques to Solar Buildings. Simulation-Based Approach and Experimental Validation. Fondation Universitaire Luxembourgeoise, Luxembourg.
- Loisos G. & Springer D., 2000. Alternatives to Compressor Cooling. California Energy Commission. Public Interest Energy Research Program. 500-97-013.
- Oestreicher Y., Bauer M. & Scartezzini J.-L., 1996. Accounting free gains in a non residential building by means of an optimal stochastic controller. Energy and Buildings, Vol. 24, No. 3. pp 213-221.
- Rode C. & Grau K., 2003. Whole-building Hygrothermal Simulation Model. ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. Recent Advances in Energy Simulation: Building Loads, Symposium CH-03-09 - Chicago.
- Wittchen K.B. Johnsen K. & Grau K., 2000-2005. BSim User's Guide. Danish Building Research Institute, Hørsholm, Denmark ([www.bsim.dk](http://www.bsim.dk)).