



## Urban heat island i København

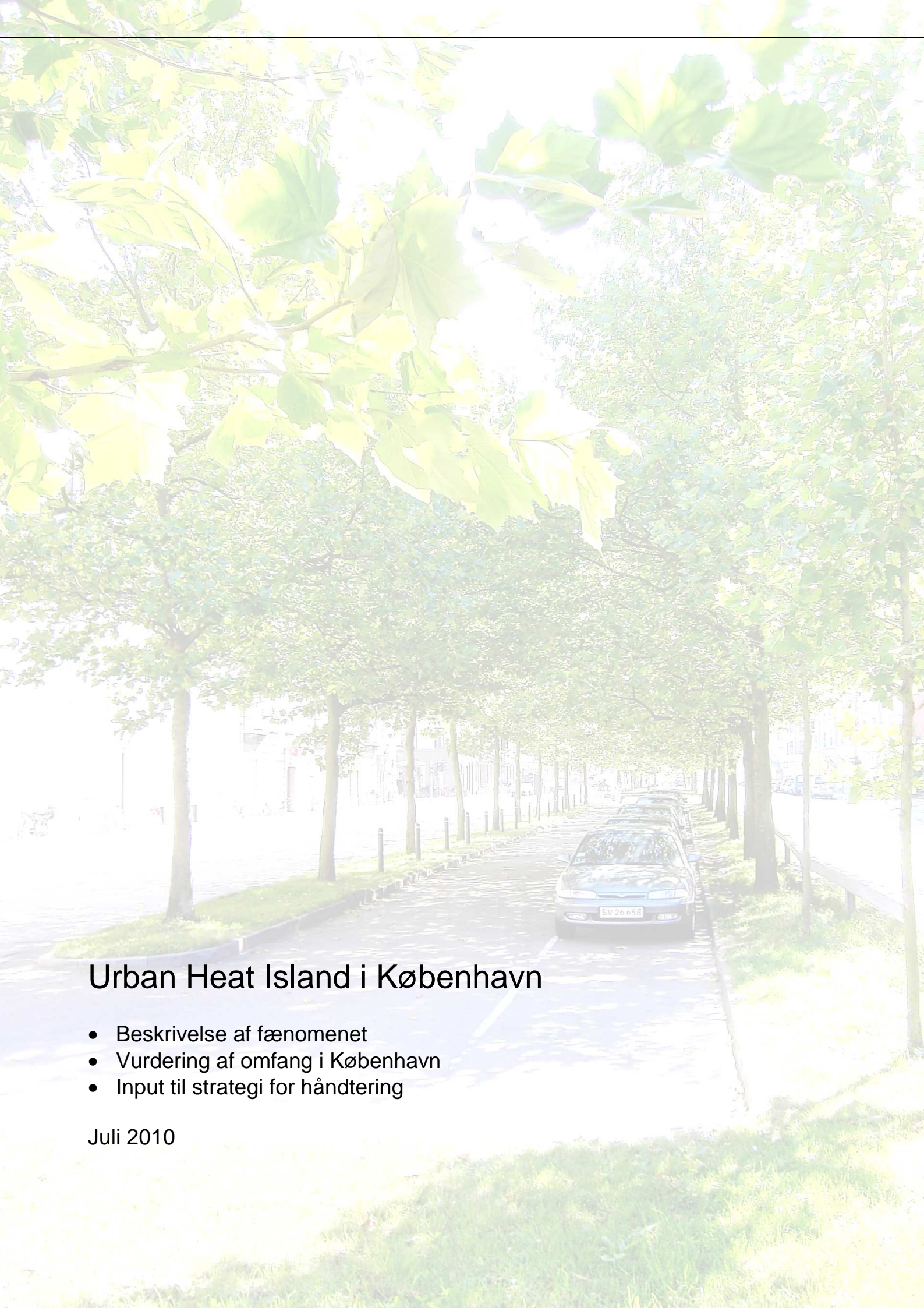
### beskrivelse af fænomenet, vurdering af omfang i København, input til strategi for håndtering

Bühler, Oliver; Tøttrup, Christian; Borgstrøm, Rasmus; Jensen, Marina Bergen

*Publication date:*  
2010

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Bühler, O., Tøttrup, C., Borgstrøm, R., & Jensen, M. B. (2010). *Urban heat island i København: beskrivelse af fænomenet, vurdering af omfang i København, input til strategi for håndtering*. Skov & Landskab, Københavns Universitet.



## Urban Heat Island i København

- Beskrivelse af fænomenet
- Vurdering af omfang i København
- Input til strategi for håndtering

Juli 2010

---

Udarbejdet i fællesskab af Skov & Landskab, DHI og GRAS på foranledning af Center for Park og Natur, Københavns Kommune.

## Sammendrag

Urban Heat Island (UHI) beskriver det forhold, at temperaturen i byområder er højere end temperaturen i tilgrænsende landområder. Årsagerne hertil ligger i den urbane arealanvendelse, med en mindre andel vegetationsdækket areal og større andel forseglede arealer.

Varme- og hedeølger har en veldokumenteret negativ effekt på byboeres velbefindende og sundhed, og der er påvist øget dødelighed i sammenhæng med hedeølger. I forbindelse med klimaforandringerne varsles det, at netop hedeølger vil være et tiltagende fænomen – både i antal og intensitet.

Grønne arealer og især træbevoksede arealer har en temperaturregulerende effekt, som afhængigt af arealets størrelse rækker ud over selve bevoksningen. Grønne tage og facader er ligeledes et instrument for at øge andelen af vegetation i byen og dermed reducere UHI-effekten.

Målinger af overfladetemperatur med satellit indikerer, at der også i Københavns Kommune kan påvises UHI. Ligeledes ses en klar gavnlig virkning af grønne arealer, især de træbevoksede.

Selvom UHI's sundhedsskadelige virkning hidtil har været et større problem i central- og sydeuropæiske storbyer sammenlignet med København, anbefales det at tage UHI alvorligt og bruge de rapporterede resultater fremadrettet i byplanlægningen. Jævnt fordelte grønne arealer som også omfatter grønne tage og facader, koblet med lokal anvendelse af regnvand for at sikre/øge vegetationens vandforsyning vurderes at bidrage til synergieffekter mellem grønne og grå byelementer.





## Konklusioner

På basis af litteraturgennemgang og de i det følgende præsenterede analyser kan konklusionerne sammenfattes som følger:

- Urban Heat Island er beskrevet for mange byområder i litteraturen, herunder en del byer i samme klimazone som København.
- Der er en veldokumenteret sammenhæng mellem temperatur og menneskers velbefindende og sundhed. Hedeølger har vist sig at øge dødeligheden markant. Klimaforandringerne varsles at øge antallet og intensiteten af hedeølger, og i byerne vil deres effekt på grund af UHI mærkes tydeligere.
- Der er mange undersøgelser, der fokuserer på sammenhængen mellem UHI og byens grønne struktur og dokumenterer en klimaregulerende effekt af vegetation generelt og især træer. Afhængig af det grønne areals størrelse og vindretning kan den temperatursænkende virkning måles i op til 1300 m's afstand.
- Urban Heat Island er en realitet i Københavns Kommune. For den undersøgte sommer 2006 er der konstateret absolutte forskelle i overfladetemperaturer på op til 12 °C mellem for eksempel områder uden for byen og de indre kvarterer. Vesterbro fremstår som det varmeste kvarter.
- Med kun få dage om året hvor gennemsnitstemperaturen for et område overskrider 25 °C (DMI's nedre temperaturgrænse for hvor ubehag kan forekomme) er det legitimt at stille spørgsmål ved problemets omfang, i hvert fald i forhold til direkte øget sygelighed. Gennemsnitstemperaturen dækker dog med stor sandsynlighed over betydelige lokale forskelle, parallelt til forskellene i overfladetemperaturer mellem de forskellige kvarterer. Derudover vil de varslede globale temperaturstigninger og især de varslede stigninger i de forskellige vejrtypers ekstremer, hvor meget våde år forventes at veksle med meget tørre år, og kølige år forventes at veksle med meget varme år, medføre at UHI generelt må formodes at blive markant kraftigere i de år, der både er varme og tørre.
- Der ses at være markante forskelle mellem forskellige befæstede og ikke befæstede arealer, og mellem forskellige bebyggelsestyper. Industriområder og områder med høj bebyggelse er markant varmere end områder med lav bebyggelse og rekreative arealer, der igen er varmere end de bynære skove. Overfladetemperaturer i industrikvarterer var d. 20. juli 2006 op til 10 °C varmere end i skov. For vegetation gælder, at især træplantninger har en lavere overfladetemperatur, mens græsarealer er mere følsomme over for tørke og derfor ikke har en målbar klimaregulerende effekt efter længere tørkeperioder.
- Der ses en tydelig ligefrem proportionalitet mellem andelen af grønt i et område (udtrykt ved NDVI), og områdets overfladetemperatur.

Rapporten afsluttes med en række anbefalinger.

## Indholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>3</b>
<b>Konklusioner</b>	<b>4</b>
<b>Forord</b>	<b>6</b>
<b>Formål</b>	<b>7</b>
<b>Overordnet tilgang</b>	<b>8</b>
<b>Urban Heat Island som fænomen</b>	<b>9</b>
Hvad er Urban Heat Island	9
Hvorfor opstår Urban Heat Island?	12
Hvilke faktorer er afgørende for omfanget af Urban Heat Island?	14
Hvordan påvirker Urban Heat Island byboernes velbefindende?	15
Forårsager Urban Heat Island et større behov for køling af bygninger?	19
Urban Heat Island og den grønne infrastruktur	20
<b>Forekommer Urban Heat Island i København?</b>	<b>23</b>
Målinger af overfladetemperatur	23
Sammenhæng mellem overfladetemperatur og lufttemperatur	25
Forskelle i overfladetemperaturer i og omkring København	28
Overfladetemperaturen som funktion af arealanvendelsen	33
Lufttemperatur, hedeølger og alment velbefindende (human comfort) i København	35
Hvor meget køligere er byens grønne områder?	36
Resultater forskellige vegetationstyper i forskellige temperaturer?	43
<b>Anbefalinger til København</b>	<b>46</b>
<b>Referencer</b>	<b>49</b>
<b>Bilag 1: Satellitdata og deres bearbejdning (processering)</b>	<b>52</b>
<b>Bilag 2: Bydelskort i A3-format (leveres elektronisk som pdf)</b>	<b>55</b>

## Forord

Københavns Klimaplan 2009 beskriver de overordnede klimamål for København. Klimaplanen skal omsættes til handling blandt andet via realisering af Københavns Klimatilpasningsplan, der udarbejdes i 2010. Som grundlag for tilpasningsplanen skal en række forhold belyses bedre, herunder i hvilken grad fænomenet Urban Heat Island (UHI) forekommer i København, og hvilke foranstaltninger, der evt. kan reducere generne affødt af UHI. Center for Park og Natur, Københavns Kommune, har på denne baggrund indgået aftale med Skov & Landskab ved KU-LIFE, DHI og GRAS om at gennemføre en udredning om Urban Heat Island med København som case. Udredningen skal både forbedre Københavns Kommunes vidensgrundlag, og initiere området som et forskningsfelt ved Skov & Landskab.

Arbejdsgruppen har bestået af

Anders Erichsen, DHI

Mikael Kamp Sørensen, GRAS-DHI

Christian Tøttrup, GRAS-DHI

Rasmus Borgstrøm, GRAS-DHI

Oliver Bühler, Skov & Landskab, KU-LIFE

Marina Bergen Jensen, Skov & Landskab, KU-LIFE (projektleder)

Projektarbejdet har været fulgt af en følgegruppe bestående af:

Jan Rasmussen, Københavns Kommune

Henriette Berggren, Københavns Kommune

Christine Nuppenau, Københavns Kommune.

Arbejdet er afsluttet august 2010.

Rapporten bedes citeret:

Bühler, O., Tøttrup, C., Borgstrøm, R. og Jensen, M.B. 2010. Urban Heat Island i København. Beskrivelse af fænomenet, vurdering af omfang i København, input til strategi for håndtering. Udgivet af Skov & Landskab, KU-LIFE....

UHI-tegneserier er gengivet med venlig tilladelse fra Stuart McMillen, [www.recombinantrecords.net](http://www.recombinantrecords.net).

## **Formål**

Projektets primære formål er at levere viden til brug for Københavns Kommunes klimatilpasningsplan. Specifikt handler det om at:

- 1) Give en generel beskrivelse af urban heat island (UHI)
- 2) Vurdere fænomenets omfang i København
- 3) Præsentere generelle metoder til afdæmpning af UHI.
- 4) Foreslå evt. yderligere analyser af UHI i København.

Et sekundært formål er at formidle om UHI-fænomenet generelt i Danmark, og publicere de resulterende analyser videnskabeligt.



## **Overordnet tilgang**

Den indledende beskrivelse af UHI er baseret på en gennemgang af relevant litteratur. Fænomenet defineres og de bagvedliggende fysiske faktorer beskrives. Urban Heat Island sættes i relation til begrebet "human comfort", der på dansk kan oversættes med "alment velbefindende". Der gives desuden et resume af centrale UHI-studier fra udlandet.

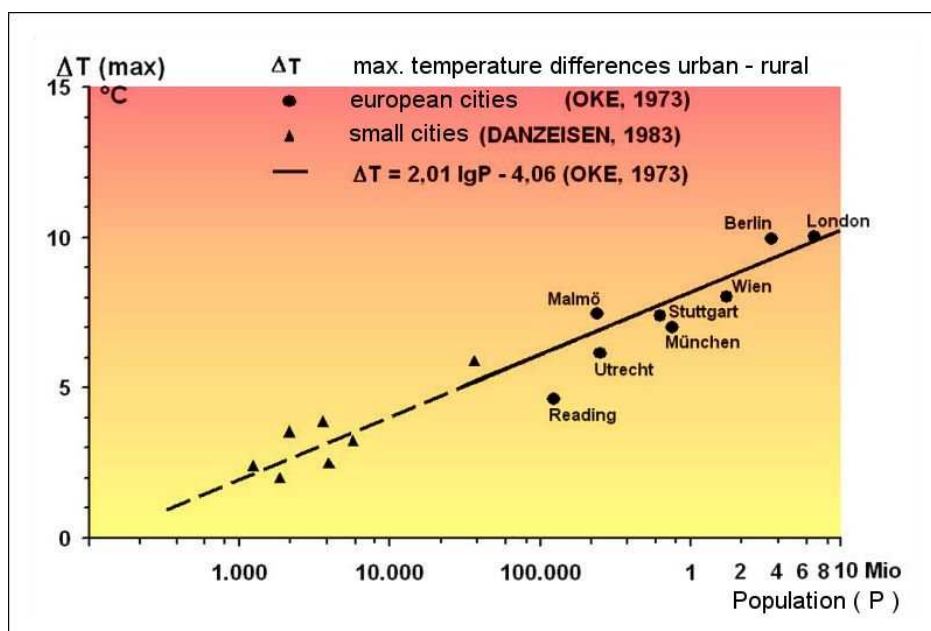
Vurdering af fænomenets omfang for København baseres på målinger af overfladetemperaturer og lufttemperaturer. De resulterende temperaturkort analyseres derefter ud fra forskellige vinkler, der alle beskriver væsentlige forhold omkring UHI, eksempelvis forskellen mellem land og by, og forskellen mellem forskellige byområder, og forskellige arealanvendelser, herunder vegetationsdækkede arealer versus bebyggede arealer. I infoboks 1 gives en generel beskrivelse af metoden, mens Bilag 1 uddyber de bagvedliggende principper og beregningsmetoder.

## Urban Heat Island som fænomen

### Hvad er Urban Heat Island

Helt generelt beskriver *Urban Heat Island* (UHI) eller *Urban Heat Island Effect* (UHIE) det forhold, at byområder har højere luft- og overfladetemperaturer end det omkringliggende landskab (Arnfield, 2003; Kuttler, 2004; Rizwan et al., 2008). Fænomenet er mest udpræget i egne med høj solstråling, altså tropiske og subtropiske klimabælter (Oke, 1982).

UHI kan beskrives via lufttemperaturen ( $T_a$ ), der i byen måles i luftlaget i et par meters højde. Denne zone kaldes *Urban Canopy Layer* (UCL). I tempererede klimater, hvor Danmark som bekendt befinder sig, er UHI på denne måde påvist med op til 5-8 °C forskel i lufttemperaturen mellem by og land (Figur 1).



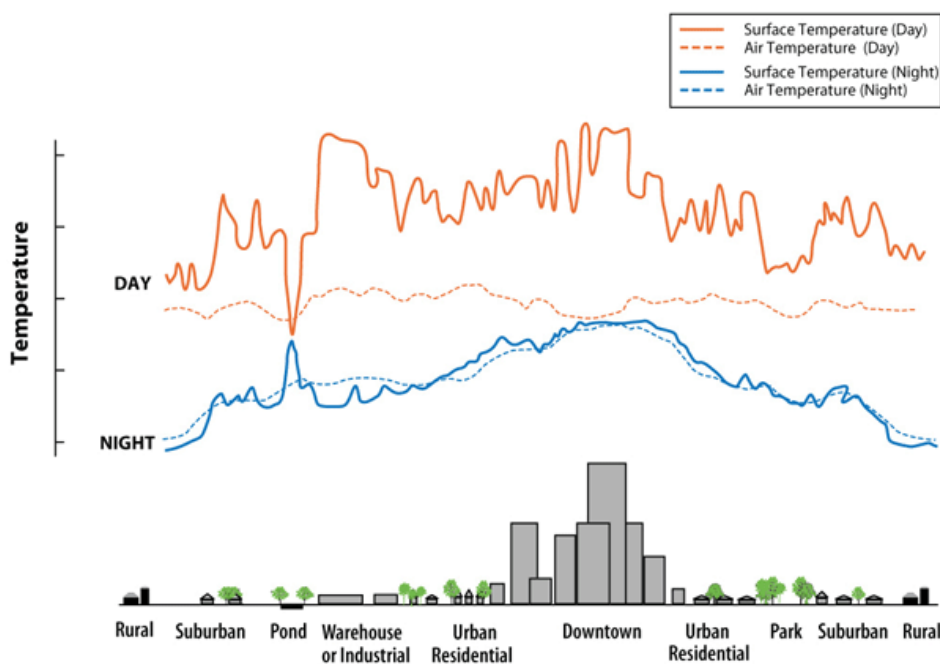
Figur 1: Maksimale målte temperaturforskelle mellem by og omegn. Resultater fra en række studier (Baumüller et al., 2008).

Beskrives UHI via overfladetemperaturen ( $T_s$ ), der er temperaturen af selve den hårde overflade, betegnes fænomenet *Surface Urban Heat Island* (SUHI). Overfladetemperaturen kan, som beskrevet i Infoboks 1 og Bilag 1, f.eks. måles via termografisk overflyvning eller fra satellit ved hjælp af remote sensing (Buyantuyev and Wu, 2009).

Lufttemperaturen og overfladetemperaturen hænger til en hvis grad sammen, men overfladetemperaturen varierer i langt større grad med en given lokalitets specifikke forhold end lufttemperaturen (Figur 2). Urban Heat Island effekten er størst om dagen, når den udtrykkes ved hjælp overfladetemperaturen, mens den er størst om natten, når lufttemperaturen benyttes. Når solen skinner vil overfladerne i en by typisk varmes stærkere op end overfladerne i landområder, og disse

opvarmede materialer vil så i løbet af natten afgive varme til luften. Nedkølingsraten om natten er derfor mindre i byer end i landområder.

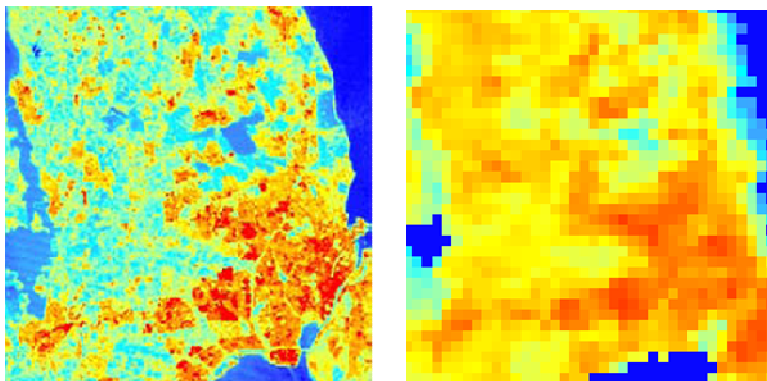
UHI er især veldokumenteret og undersøgt i varmere regioner (fra troperne til byer i USA, Syd- og Centraleuropa med tempereret fastlandsklima), men f.eks. er der også i tætte byområder i Göteborg målt lufttemperaturer som ligger 8 °C over mindre urbane områder (Svensson and Eliasson, 2002).



Figur 2: Overfladetemperatur (fuldt optrukne kurver) og lufttemperatur (stiplede kurver) om dagen (røde kurver) og om natten (blå kurver) for forskellige områder. Overfladetemperaturen om dagen svinger med de forskellige overflader (bemærk f.eks. forskellen mellem sø og bebyggelse) og er højest i byområder. Lufttemperatuen er forholdsvis ens over hele profilet om dagen, mens den om natten falder uden for byen, men forbliver høj i byen.

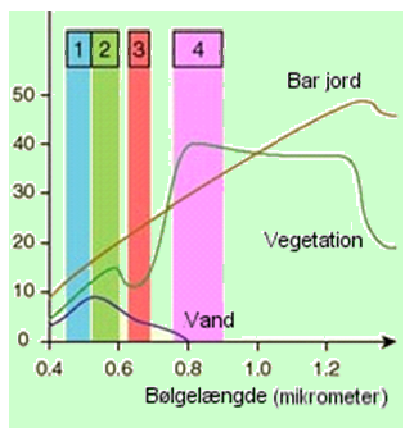
## INFOBOKS Remote sensing

Jordens overfladetemperatur kan bestemmes fra satellitbaserede målinger af jordens varmeudstråling. Jordens udstråling toppe i området omkring  $14\ \mu\text{m}$ , også kaldet langbølget varmestråling eller det termiske infrarøde område. Da der er en nøje sammenhæng mellem overfladetemperatur og den termiske strålingsmængde kan man således beregne overfladetemperaturen ud fra termisk infrarøde målinger. Sådanne målinger foretages af forskellige typer af satellitsensorer. Traditionelt skelner man mellem satellitter med henholdsvis høj og lav rumlig opløsning. Satellitter med høj rumlig opløsning leverer detaljerede temperaturmål for jordoverfladen (dvs. celler, der måler fra ca. 60-120 meter på hver led), men til gengæld er tidsrummet mellem billeder fra et givent område forholdsvis stor (fra uger til måneder). Omvendt er satellitter med lav rumlig opløsning ikke særligt detaljerede ( $\sim 1\text{km}$ ), men leverer til gengæld data på daglig basis.



*Illustration af rumlig opløsning. Begge kort viser temperaturforhold i Hovedstadsområdet på samme dag. Kortet til venstre har høj rumlig opløsning, mens kortet til højre har lav rumlig opløsning. Begge kort af farvegraderet fra blå (kold) til rød (varm).*

Udover den langbølgede varmestråling har de fleste satellitter også en optisk sensor som måler jordens refleksion af kortbølget solstråling. Et traditionelt flyfoto i naturlige farver viser refleksionen i det synlige bølglængdeinterval fra ca.  $0,4 - 0,7\ \mu\text{m}$  (det blå, grønne, og røde bånd på figuren nedenfor). Refleksionen i det nærinfrarøde område (lilla bånd på figuren nedenfor) er imidlertid meget vigtig for at skelne forskellige overfladetyper fra hinanden, især når det gælder vegetationskortlægning. Specielt forholdet mellem refleksion i det røde (specielt lav) og nærinfrarøde lilla lys (specielt høj) er unikt for grønne planter og betyder at det er relativt nemt at klassificere vegetation fra andre overfladetyper.



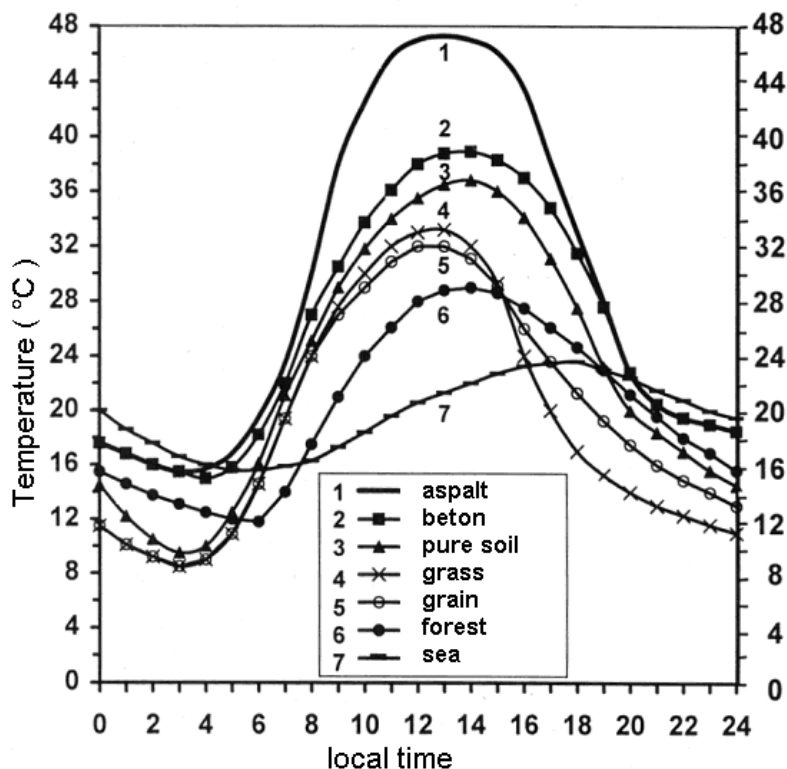
*Forskellige overfladers refleksion i forhold til bølgelængder.*

## Hvorfor opstår Urban Heat Island?

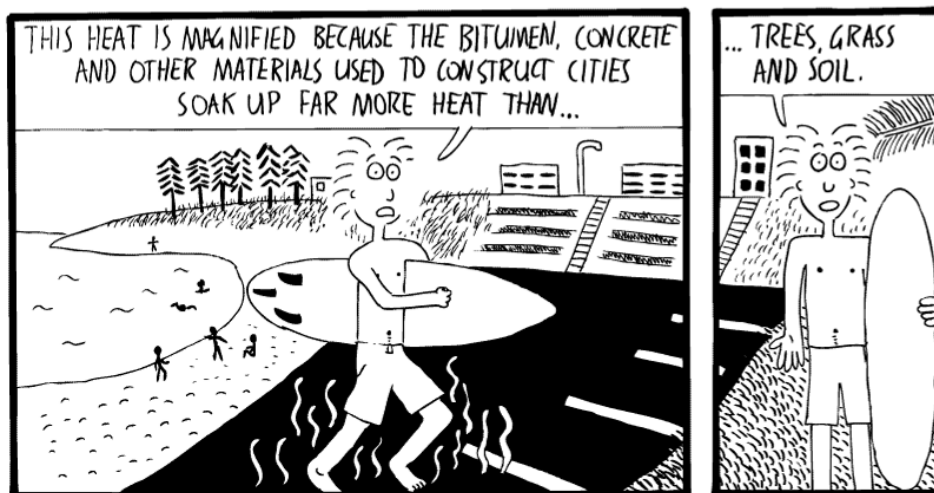
Fænomenet Urban Heat Island må ses som det samlede resultat af en række energibalancer, som ændres med tiltagende urbanisering af et område (se Figur 4 for en oversigt):

- Fordampning af vand fra planter og overflader (den såkaldte *evapotranspiration*) er mindre i byen, da der er færre vegetationsdækkede arealer, og da en stor del af nedbøren fra befæstede overflader ledes ud af byen. Herved reduceres den latente varmestrøm (det vil sige den mængde varme, der kunne forsvinde ved at vandet fordamper, og evt. driver væk som vanddamp, før det igen kondenserer og frigiver varmen), mens den frie, direkte og følbare opvarmning af luften øges – eller med andre ord: Solenergien bruges i mindre grad til at fordampe vand, og i højere grad til at øge temperaturen.
- De termiske egenskaber af mange byggematerialer såsom asfalt og beton bidrager til opvarmningen, når de om dagen absorberer solstråling og afgiver denne som varmestråling om natten (se Figur 3).
- Sammenlignet med det åbne land indeholder byluften mere støv og flere forureningspartikler, som absorberer og tilbagestråler byoverfladernes langbølgede varmeudstråling.
- Byens topografi og relief bidrager til udvikling af UHI, idet luftstrømmene begrænses, hvilket igen reducerer den konvektive og/eller turbulente afstrømning af varme. Varmen 'fanges' i for eksempel gadeslugter.
- Byens topografi og relief medfører også at en større del af den kortbølgede stråling fra solen bliver i byen. Når solens stråler rammer en overflade vil en andel absorberes, og resten reflekteres. Den reflekterede energi vil normalt stråle tilbage til universet, men kan i byen ramme en ny overflade, og her absorberes delvist. Det samme gælder den langbølgede varmestråling, hvor der i det åbne land vil være en forholdsvis stor udstråling af varmeenergi til himlen, mens byens horisont genabsorberer en del af varmen. Betydningen af byens topografi og relief for UHI betegnes "sky-view"-faktoren.
- Byens farve har betydning. Tilbagestråling af den kortbølgede stråling fra solen afhænger af overfladernes albedo, der kan antage værdier mellem 0 og 1. Hvide overflader har en høj albedo og tilbagekaster dermed meget af solens energi, mens mørkere materialer absorberer en større andel og reflekterer mindre. Lyse byer opvarmes derfor mindre end mørke byer.
- 'Menneskeskabt' varme fra afbrænding af energi, ved f.eks. opvarmning og evt. nedkøling af bygninger, eller transport, bidrager yderligere til opvarmningen.

Mange undersøgelser af fænomenet viser tydelige sammenhæng mellem UHI og byens størrelse, målt som areal eller indbyggertal (Figur 1). Et studium fra München angiver direkte en sammenhæng mellem stigning i andel af impermeabel overflade (tage, veje, øvrige impermeable belægninger) og udviklingen i UHI; hver gang det befæstede areal øges med 10 % stiger den årlige gennemsnitstemperatur med 0,2 °C (Baumüller et al., 2008).



Figur 3: Forløb af overfladetemperaturer (solrig sommerdag) på forskellige materialer. Asfalt og beton har de højeste overfladetemperaturer, i modsætning til vegetation og vandoverflader (Baumüller et al., 2008).



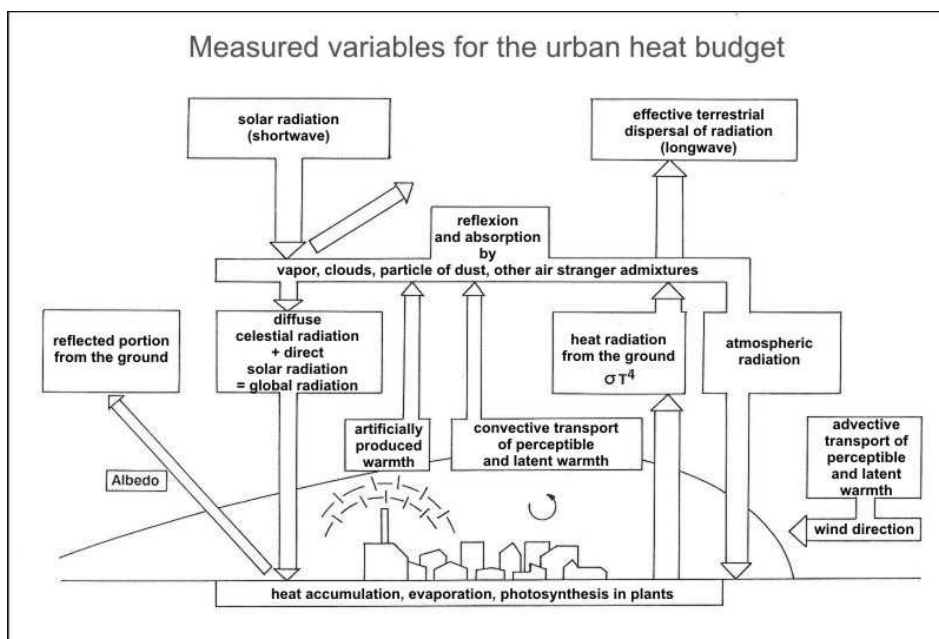
## Hvilke faktorer er afgørende for omfanget af Urban Heat Island?

Omfanget af UHI betegnes ofte *Urban Heat Island Intensity* (UHII), som er et udtryk for temperaturforskellen mellem by og land. Det er især forskelle i luftens nedkølingsrate mellem by og land der er afgørende for UHII. Derfor er UHII højest, når den varme, som byens overflader samler om dagen og afgiver til luften om natten ikke transporteres væk (dvs. der er vindstille), alt imens udstrålingen i byens omegn på grund af en skyfri himmel er meget høj. Med andre ord en vindstille, skyfri sommernat, typisk 3-5 timer efter solnedgang.

I 1982 opstillede Oke en række postulater omkring faktorer med betydning for udviklingen af UHI. Selvom det kan være problematisk at generalisere for meget over et så komplekst fænomen, har empiriske studier altovervejende bekræftet følgende punkter (Oke, 1982; Arnfield, 2003):

- Intensitet aftager med tiltagende vindhastigheder
- Intensitet aftager med stigende skydække
- Intensitet er mest udpræget om sommeren
- Intensitet stiger når byen vokser (gælder areal og befolkning)
- Intensitet er størst om natten.

UHI-effekten skal ikke forveksles med de forventede klimaforandringer, som rammer både by og land. Men med højere temperaturer og længere tørkeperioder vil de i forvejen varmere byer påvirkes i særlig grad. Hedeølger har netop vist sig at være mest udbredte og mest skadelige i storbyerne, hvor et varmt baggrundsklima forværres af UHI-effekten (WHO, 2009).



Figur 4: Faktorer, der bestemmer byens varmebalance. Indstråling fra solen og egenproduceret varme sørger for det primære varme-input. Skal stråling eller varme ud af byen, er det via refleksion af den indkommende stråling (her kommer overfladers albedo i spil, jvf hvide/lyse tage), via fordampning af vand fra jord og planter, og via luftbevægelser. Den absorberede solstråling (kortbølget) kan også i form af langbølget varmestråling sendes tilbage til universet, dog i mindre grad end over landområder, da byens mange vertikale overflader, partikler og gasser i luften kan reflektere/absorbere denne varmestråling så den ikke når ud af byen.



### **Hvordan påvirker Urban Heat Island byboernes velbefindende?**

Helt basalt bliver det med stigende varme og luftfugtighed tiltagende svært for mennesket at komme af med varme og opretholde en tilpas kropstemperatur. Især den for UHI typiske manglende afkøling om natten har vist sig at være korreleret med en øget dødelighed (Luber and McGeehin, 2008).

Det generelt varmere byklima påvirker byboernes livskvalitet i form af øget risiko for hederelaterede sygdomme (som f. eks. udmattelse, solstik, hede krampe, hedeslag), og i form af generelt øget ubehag. Men afhængigt af stedets generelle temperaturforhold kan varmeeffekten også opfattes positivt.

På de nordlige breddegrader og i områder med et 'koldt' baggrundsklima kan UHIE opfattes som behagelig, men i varmere områder eller ved høj intensitet kan UHI udløse ubehag og nedsat livskvalitet, samt en række varmerelaterede sundhedsproblemer, der i sidste ende kan øge dødeligheden (Patz et al., 2005). Klimaforandringerne vil dog medføre, at negative konsekvenser også kan mærkes i regioner, som har et mere køligt baggrundsklima. Således regnes der for eksempel også i Sverige med stigende dødelighed under hede bølger, grundet en stigning i de førnævnte hederelaterede sygdomme, især blandt udsatte befolkningsgrupper som de helt unge, de ældre og de syge (SoU 2007). Det er her i mindre grad den generelle temperaturstigning, som menes at udgøre en risiko for sundhed og velbefindende, men snarere den varslede tiltagende hyppighed, intensitet og længde af hede bølger.

### **Hederelaterede sygdomme og dødsfald**

I USA er hede bølger, der her er defineret som mindst 3 dage med temperaturer over 32,2 °C, årsag til flere dødsfald end orkaner, tornadoer, jordskælv og oversvømmelser tilsammen. I Vesteuropa medførte hede bølgen i 2003 40.000 dødsfald, heraf 15.000 i Frankrig, 10.000 i Italien og 7.000 i Tyskland (Golden et al., 2008; Champiat, 2009). Svigt i hjerte-kar-systemet, luftvejene og nyrerne hørte til de mest udbredte direkte dødsårsager, og den mest udsatte befolkningsgruppe var her de ældre (>70 år) samt kronisk syge. En socioøkonomisk effekt med højere dødelighed blandt indkomstsvage borgere under en hede bølge er vist for USA, mens den er mindre klar i Europa (WHO, 2009). I Tyskland er der med baggrund i hede bølgen 2003 oprettet et varslingssystem. Systemet er baseret på "følte temperatur", der er et indeks beregnet ud fra bl.a. lufttemperatur, luftfugtighed og varmestråling, og som kan resultere i to varsler (Anon., 2008):

- *Stærk varmebelastning*: Optræder efter flere dage med intensiv solstråling, lufttemperaturer omkring 29 °C i skyggen, høj luftfugtighed og lille luftbevægelse. Følt temperatur er over 32 °C
- *Ekstrem varmebelastning*: Som under *stærk varmebelastning*, men med lufttemperatur omkring 35 °C i skyggen og manglende natlig afkøling. Følt temperatur ligger over 38 °C.

For danske forhold har DMI defineret en varme bølge som mindst 3 sammenhængende dage, hvor "midlet af de højest registrerede temperaturer skal overstige 25 °C". Overstiger midlet af de højest registrerede temperaturer målt over tre sammenhængende dage 28 °C, er der tale om en 'hede bølge'. Sundhedsstyrelsen beskriver på deres hjemmeside en række 'varmesygdomme' og

risikogrupper, og giver forholdsregler som forebygger sundhedsskader under hedeølger (<http://www.sst.dk/Sundhed%20og%20forebyggelse/Miljoe%20og%20helbred/Varmt%20vejr%20og%20hedeboelge.aspx>).

### **Påvirkning af alment velbefindende (Human comfort)**

Der er således ingen tvivl om at ekstreme klimapåvirkninger som hedeølger er direkte årsag til hederelaterede sygdomme og dødsfald. Men allerede før der opnås en sundhedsskadelig eller direkte farlig temperaturpåvirkning er "human comfort", eller mere præcist "human thermal comfort", en vigtig parameter for livskvaliteten i urbane områder. I definitionen af den "termiske komfort", eller "det varmerelaterede almene velbefindende" spiller målbare parametre som lufttemperatur, sol- og varmestråling, luftfugtighed og vindhastighed sammen med psykologiske og fysiologiske faktorer, herunder individuel klimatilpasning, aktivitetsniveau og påklædning. Der opereres derfor med mange mere eller mindre komplekse modeller for kroppens energibalance, som søger at beskrive menneskers opfattelse af temperatur og behagelighed (Tabel 1).

*Tabel 1: Forskellige modeller til beskrivelse af menneskets velbefindende ved forskellige temperaturer ("thermal comfort"). Modificeret efter Jendritzky and de Dear (2009).*

<b>Indeks</b>	<b>Enhed</b>
DMI's Hedeindeks (se Figur 5)	°C
Predicted Mean Vote (PMV)	-
Perceived Temperature (PT)	°C
Physiological Equivalent Temperature (PET)	°C
Outdoor Standard Effective Temperature (OUT_SET)	°C
Apparent Temperature (AT)	°C
Wind Chill Temperature (WCT)	°C
Skin Temperature ( $T_{sk}$ )	°C
Sweat Rate (SR)	$\text{kg s}^{-1}$
Evaporative Heat Loss ( $E_{sk}$ )	$\text{W m}^{-2}$
Wetness of the Skin ( $W_{sk}$ )	%

---

Insulation Value of Clothing ( $I_{cl}$ )

---

Clo

Et eksempel på et simpelt hedeindeks finder man på DMI's hjemmeside (Figur 5). Dette indeks tager udgangspunkt i lufttemperatur og relativ luftfugtighed. Det ses, at ved samme temperatur forværres hedeindekset af høj luftfugtighed. Hedeindekset viser f.eks. at ubehag, solstik og udmattelse kan opleves fra temperaturer mellem 28 og 36° C. Sådanne temperaturer måles kun på få dage om året (Figur 21).

Rel. Fugt %	Temp i °C																				
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
40	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35	37	39	41	43	45	48	50	53	56	59	62
45	25	26	27	28	29	30	31	33	34	36	38	41	43	45	48	51	54	57	60		
50	25	26	27	28	29	30	32	34	36	38	40	43	45	48	51	54	58	61			
55	25	26	27	28	30	31	33	35	37	40	42	45	48	51	54	58	62				
60	25	26	28	29	31	32	34	37	39	42	45	48	51	54	58	62					
65	25	27	28	30	31	33	36	38	41	44	47	51	54	58	62						
70	25	27	28	30	32	35	37	40	43	46	50	54	68	62							
75	25	27	29	31	33	36	39	42	45	49	53	57	62								
80	25	27	29	32	34	37	40	44	48	52	56	61									
85	25	27	30	32	35	39	42	46	50	55	59										
90	25	28	30	33	37	40	44	48	53	58											
95	25	28	31	34	38	42	46	51	56	61											
100	25	28	31	35	39	44	49	54	59												

Hedeindeks	Ved vedvarende påvirkning
26°C til 32°C	Minimal risiko, udmattelse mulig
32°C til 40°C	Tiltagende risiko, solstik og udmattelse mulig
40°C til 55°C	Fare, hedeslag, solstik og udmattelse sandsynlig
over 55°C	Stor fare, hedeslag eller solstik meget sandsynlig

Figur 5: Hedeindeks fra Danmarks Meteorologiske Institut (DMI).

[http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/temaer/kuldeindeks\\_og\\_hedeindeks/bedeindeks.htm](http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/temaer/kuldeindeks_og_hedeindeks/bedeindeks.htm)

Den fysiologisk ækvivalente temperatur (physiological equivalent temperature, PET) er et eksempel på et mere komplekst hedeindeks, som tager højde for flere variable. Mens mange af de mere komplekse indekser opererer med for lægmand ikke umiddelbart forståelige skalaer, bruger PET °C og er derfor mere tilgængeligt.

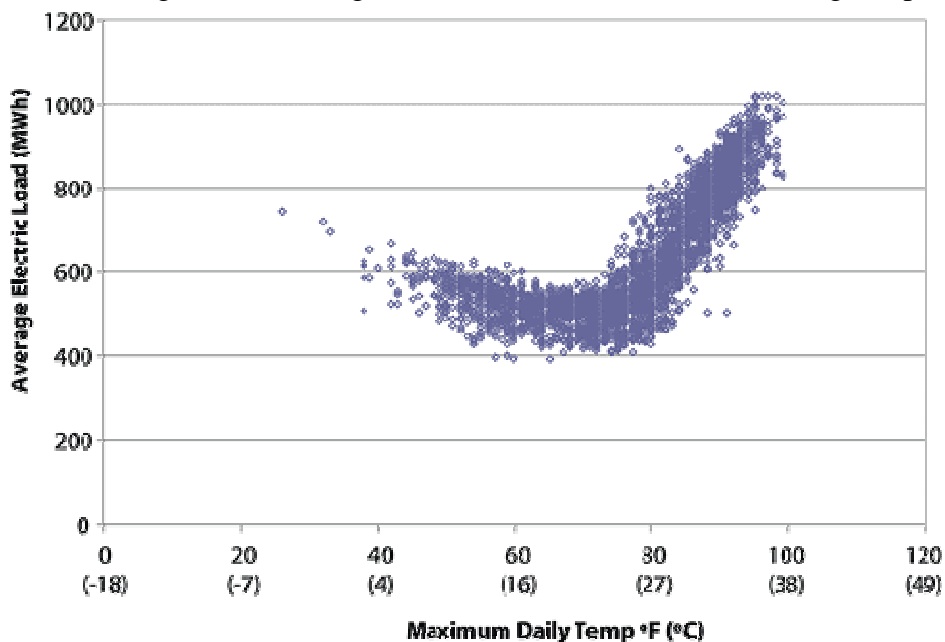
Ideen bag PET er at ”oversætte” udendørsklimaet til det tilsvarende indendørsklima uden vind og direkte sol – og dermed returnere den rumtemperatur, der har samme effekt på kroppens energibalace som det givne udendørsklima. På denne måde kan PET-værdien for en sommerdag med direkte sol ligge 20° C over lufttemperaturen, mens den på en blæsende vinterdag kan ligge 15 grader under lufttemperaturen (Tabel 2) (Höppe, 1999).

Tabel 2: Fysiologisk ækvivalens-temperaturer (PET) ved forskellige klimaforhold. MRT står for 'Mean Radiant Temperature' og er et udtryk for de omgivende overfladers temperatur og varmestråling. Damptryk er et udtryk for luftfugtighed (efter (Höppe, 1999).

Scenario	Lufttemp. (°C)	MRT (°C)	Vindhastighed (m/s)	Damptryk (hPa)	PET (°C)
Indendørs	21	21	0,1	12	<b>21</b>
Vinter, sol	-5	40	0,5	2	<b>10</b>
Vinter, skygge	-5	-5	5,0	2	<b>-13</b>
Sommer, sol	30	60	1,0	21	<b>43</b>
Sommer, skygge	30	30	1,0	21	<b>29</b>

#### Forårsager Urban Heat Island et større behov for køling af bygninger?

Som en mere indirekte effekt af menneskenes forsøg på at skabe et behageligt klima inden døre vil en udpræget UHIE også påvirke energiforbruget. Om vinteren vil energibehovet til opvarmning være mindre, mens energiforbruget til nedkøling om sommeren stiger. Dette er illustreret i Figur 6, der viser strømforbruget til nedkøling som funktions af den maksimale dag-temperatur.



Figur 6: Når den daglige maksimum-temperatur er over 25 °C begynder strømforbruget til nedkøling at stige. Eksempel fra New Orleans, USA. Efter Sailor, 2002, <http://www.epa.gov/biri/impacts/index.htm> (fundet 2. juni 2010).

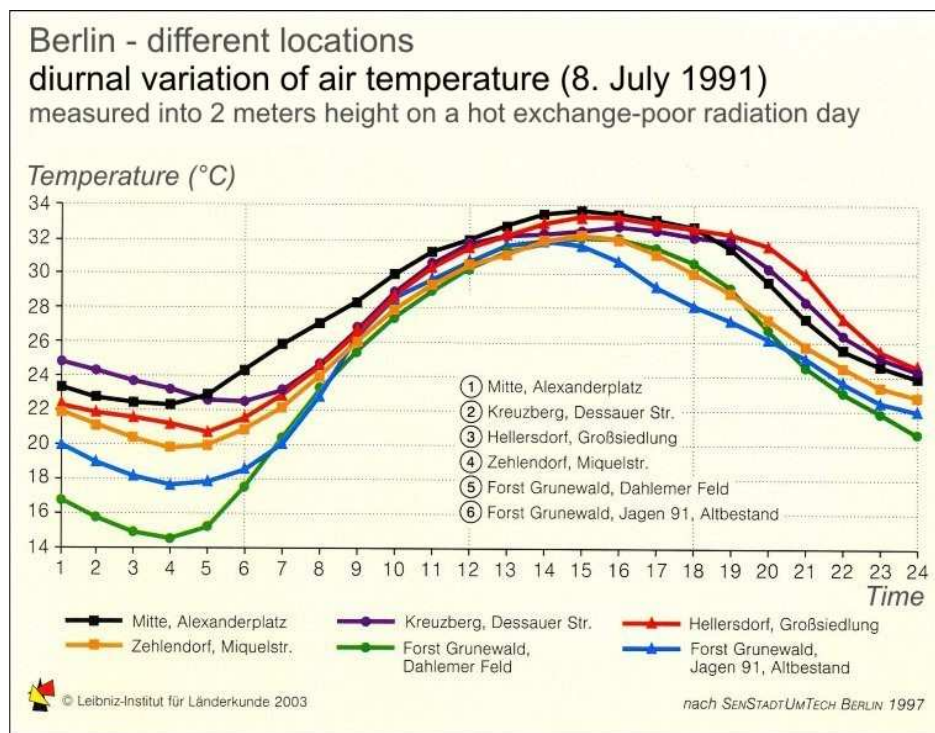
## Urban Heat Island og den grønne infrastruktur

Grønne planter absorberer solstrålingen med deres blade og bruger den opfangede energi til at drive fotosyntese. Samtidig fordampes vand. Det vil sige at solstrålingen omdannes til latent varme i form af vanddamp, eller kemisk energi i planten i stedet for at opvarme beton, asfalt eller andre overflader. Den følbare varme omdannes dermed til latent (eller skjult) varme. Grunden til at vandfordampning virker nedkølede er at fordampning er en energikrævende proces. Derudover er der skyggeeffekten – især større træer forhindrer at solstrålingen kan opvarme belægninger og andre overflader under deres kroneprojektion. I overensstemmelse hermed er der efterhånden mange undersøgelser, som viser at grønne områder vitterlig har en effekt på byklimaet. En oversigt over nogle af disse undersøgelser er samlet i Tabel 3.

Tabel 3: Oversigt over udvalgte studier om vegetationens klimaregulerende effekt på temperaturforhold i byen. Detaljeret kildeangivelse findes i rapportens referenceliste.

Kilde	Lokalitet	Hovedresultater
Hardin and Jensen, 2007	Terre Haute, Indiana, USA	Med stigende bladareal falder temperaturen: For hver gang bladarealindekset (LAI) stiger med 1 falder overfladetemperaturen (dag) med 1,3 ° C.
Walz and Hwang, 2007	Huntington, West Virginia, USA	Især store træer bidrager til at sænke overflade- og lufttemperaturer, da de kan skygge store arealer. Selv 'en enkelt blok' med høj vegetation har en effekt på omkringliggende tæt bebyggede arealer.
Georgi and Zafiriadis, 2006	Thessaloniki, Greece	Under træer kan lufttemperaturen være op til 24 % lavere og den relative luftfugtighed op til 41 % højere end i fuld sol.
Leuzinger et al., 2010	Basel, Schweiz	Målte maksimale overfladetemperaturer: Vand: 18 °C Vegetation: 26 °C Gader: 37 °C Tage: 45 °C Artsforskelle i træers tolerance over for høje temperaturer og evne til at nedkøle. Småbladede arter (fx <i>Gleditsia triacanthos</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> ) bedre egnet til varme lokaliteter end storbladede arter som <i>Acer platanoides</i> , <i>Aesculus hippocastanum</i> ). Vandforsyning skal sikres for at transpirationen og dermed vandfordampningen fortsætter længst muligt.
Hamada and Ohta, 2010	Nagoya, Japan	Lufttemperaturforskelle park/bymæssig bebyggelse om sommeren 1,9 °C (parkens størrelse 147 ha). Afkølingseffekten kunne måles ca. 300 m (og aldrig længere end 500 m) fra parken. Anbefaling om at fordele grønne områder i byen.
Mayer et al., 2009	Freiburg, Germany	PET op til 12 °C lavere under gadetræers kroner. Forskellen især udpræget i tidsrummet kl 11-16. Lufttemperaturen meget ens, forskellen primært pga varmestrålingen (mean radiant temperature).
Zoulia et al., 2009	Athen, Grækenland	Undersøgelse af temperaturforskelle mellem park (15 ha) og dens omgivelser. Parken i alle tilfælde køligere. Temperaturforskelle have/befærdet gade op til 13 °C (målt om dagen). Om natten forskelle op til 7.2 °C. Ingen temperaturforskelle på dage med tæt skydække og/eller nedbør.

Gill et al., 2007	Manchester, UK	Grøn infrastruktur kan moderere klimaforandringens temperaturstigninger.
Stülpnagel, 1987	Berlin	Parkens størrelse er vigtigt. 3,5 ha angives som mindste størrelse før temperatursænkninger kan måles i tilstødende arealer. Afhængig af vindretning og parkstørrelse måles temperatursænkninger i op til 1300 meter afstand fra parken.



Figur 7: Daglige lufttemperaturforløb for forskellige lokaliteter på en varm og vindstille dag i Berlin. Bynær skov (blå og grøn linje) afkøles stærkere om natten end de centrale byområder (sort og violet).

[http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/eda404\\_01.btm#fig1](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/eda404_01.btm#fig1)

Som opsummering noterer Matzarakis (2008), at især træer altovervejende har positiv virkninger på byklimaet (se også figur 8) fordi:

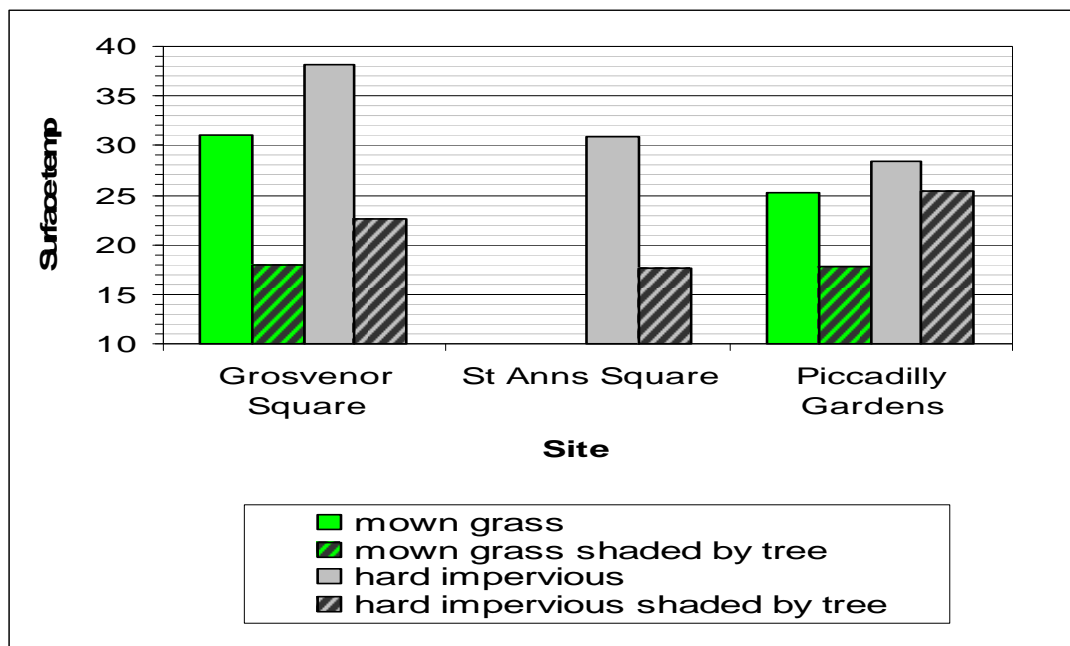
- Klimaekstremer dæmpes
- Urban Heat Island-effekten dæmpes
- Energiforbruget til opvarmning og nedkøling reduceres
- Overfladetemperatur af parkerede biler reduceres.

Både andelen af grønt i byen og det grønnes fordeling har betydning for vegetationens UHI-dæmpende effekt. Undersøgelser viser således at parkerne skal have en hvis størrelse før der kan måles en effekt – for Berlin blev der således i en ældre undersøgelse kun fundet forskelle for parker større end 3,5 ha (Stülpnagel, 1987). I samme undersøgelse beskrives, at effekten også kan måles i tilstødende arealer – for Berlins største park (Tiergarten, med 212 ha) afhængigt af vindstyrke og vindretning, i afstande på mellem 200-1300 m. Lignende resultater rapporteres i et nyere arbejde fra Japan (Hamada and Ohta, 2010), og anbefalingen lyder her, at et net af jævnt fordelte grønne arealer med betydelig andel træbevoksning (gerne større end 60 % kronedækket areal) er at



foretrække frem for få meget store parker. Hertil kommer, at også i meget tæt bebyggede områder kan der findes plads til træer, f. eks i form af gadetræer. Selv om disse ikke nødvendigvis sænker lufttemperaturen mærkbart er deres skyggevirkning med til at mindske oplevelsen af varme/hede (for eksempel udtrykt som PET) (Mayer et al., 2009).

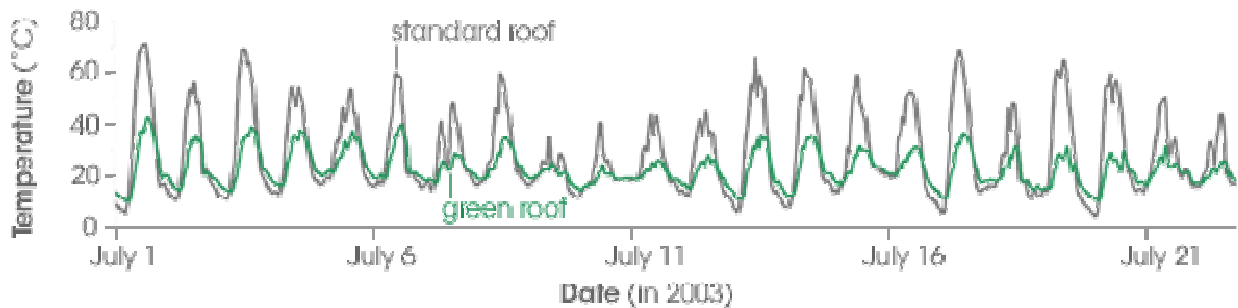
Typisk beskrives den samlede effekt af vegetation som en reduktion af årlige gennemsnitstemperatur på 1-2 °C. I klare, vindstille nætter kan forskellen overstige 5 °C. Træer har generelt vist sig at have den største effekt på overfladetemperaturen (Figur 7 og 8).



Figur 8: Overfladetemperatur af græs (grøn) og belægninger (grå), henholdsvis uden og med skygge (skraveret). Eksemplet fra Storbritannien viser, at træer er særlig effektive i forhold til at reducere temperaturer, fordi de kombinerer skyggevirkning med fordampningseffekten (Gill 2006)

En stor del af byens overfladeareal udgøres af tagflader. Disse arealer kan inddrages på forskellig måde. Hvide tagflader vil på grund af en høj albedo reflektere en større del af solens stråling. Tagbeplantning eller grønne tage vil ligesom anden vegetation kunne bruge solenergien til fotosyntese og transpiration af vand. Dermed kan eksempelvis grønne tage også bidrage til at sænke temperaturen (Figur 9). Der foreligger derudover modelberegninger fra New York, som indikerer at man med en tagbeplantning på 50 % af tagfladerne kan reducere den gennemsnitlige overfladetemperatur i hele byen med op til 0,8 °C. For Toronto i Canada viser modelleringer at vegetation på alle tage kan reducere UHI-effekten (lufttemperatur) med 2 °C.

I forhold til hvide tage kan grønne tage derudover også lagre og bruge nedbør og kan dermed udgøre et delelement i en lokal håndtering af regnvand.



Figur 9: Overfladetemperatur af mørket tag sammenlignet med tagflade dækket med vegetation. Målinger fra Penn State, U.S.A. (Stuart Graffin på <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GreenRoof/greenroof3.php>).

Også i forhold til de prognosticerede klimaforandringer spiller den grønne struktur en vigtig rolle. Et studie fra Manchester, som modellerer byklimaet, inklusive de varslede klimaforandringer, kommer frem til, at øger man andelen af grønne områder med 10 %, kan dette kompensere for de forventede temperaturstigninger indtil 2080. Omvendt vil en reduktion af de grønne arealer med 10 % øge temperaturen med 8 °C i bymidten (Gill et al., 2007).

## Forekommer Urban Heat Island i København?

### Målinger af overfladetemperatur

Som udgangspunkt for kortlægningen af Urban Heat Island fænomenet i København er overfladetemperaturen blevet kortlagt ved hjælp af satellitdata med både høj og lav rumlig opløsning (jf. Infoboks 1 og Bilag 1) for fire udvalgte dage i sommeren 2006 (Tabel 4 og 5, Infoboks 2).

Tabel 4. Input data og specificationer.

Satellit Sensor	Rumlig opløsning		Tidslig opløsning	Optagelses tidspunkt
	Termal sensor	Optisk sensor		
Landsat TM	120 x 120 m	30 x 30 m	Hver 18 dag	Ca. 10:15
MODIS AQUA	1 x 1km	Ikke brugt	Daglig	Ca. 14:00

Af Tabel 4 fremgår, at både data fra satellitterne Landsat og MODIS er blevet brugt, hvilket skyldes at de to sensorer komplementerer hinanden godt. Med Landsatdata kan man således analysere relativt detaljerede geografiske temperaturvariationer, men kun for udvalgte tidspunkter, mens MODIS-data tillader tidsmæssigt detaljerede analyser, men altså på bekostning af den geografiske detaljeringsgrad. Data fra hhv. MODIS og Landsat leveres i forskellige forarbejdningsstadier.

MODIS-data leveres som færdigbearbejdede overfladetemperaturer (Wan, 1999), hvorimod Landsat-data, som beskrevet i Bilag 1, kræver en betydelig indsats med hensyn til klargøring af data.

*Tabel 5. Årstal og dato for Landsatdata rekvireret til dette projekt.*

Årstal	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4
1986	26. maj	11. juni	27. juni	-
2006	2. juni	18. juni	20. juli	22. sep.

Med inputdata fra to forskellige sensorer er det selvfølgelig interessant at teste om de to data leverer konsistent information fra overlappende datoer. Dette gøres ved at først at nedskalere Landsatdata fra 20. juli 2006 til 1 km opløsning, som herefter sammenlignes med MODIS-data fra samme dato. Sammenhængen er vist i Figur 10. Øvelsen bekræfter en høj korrelation mellem de to datasæt. Forskelle i opløsning, optagelsestidspunkt og databearbejdning har alle en indflydelse på sammenligningen og betyder at 1:1 linjen ikke nødvendigvis er den statistisk mest optimale (jf. stiplede linje).

#### *Infoboks 2*

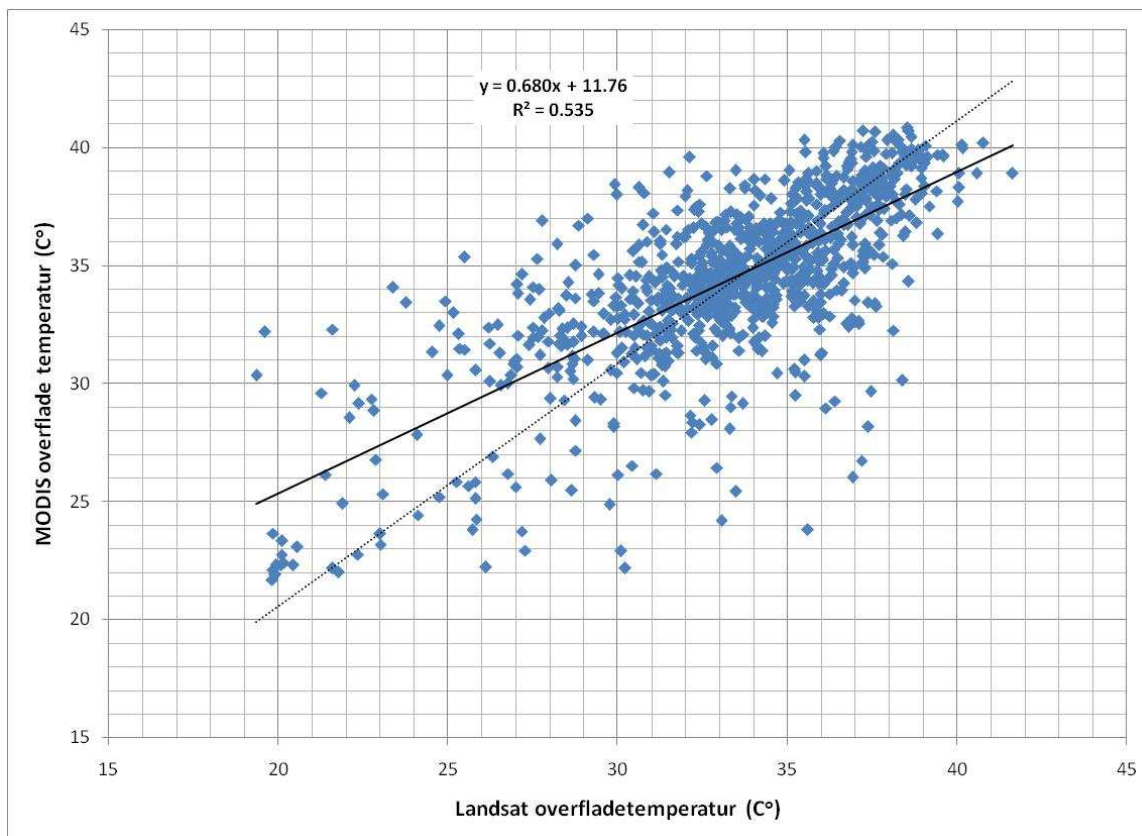
##### **DMI facts om sommeren 2006**

Kalendersommeren 2006 var som helhed meget solrig, varmere end normalt og det regnede kun lidt mere, end det plejer.

Det rigtige sommervejr kom omkring den 12. juni og varede faktisk helt frem til starten af august.

Juli måned blev helt exceptionel rekordvarm med en middeltemperatur på 19,8 °C, hvilket er 0,3 °C over den tidligere rekord fra 1994.

Torsdag den 20. juli blev den hidtil varmeste dag i Danmark i 2006. Samtidig viser analyser, at juni 2006 globalt blev meget varmt og at det første halvår af 2006 ligger i den meget varme ende.



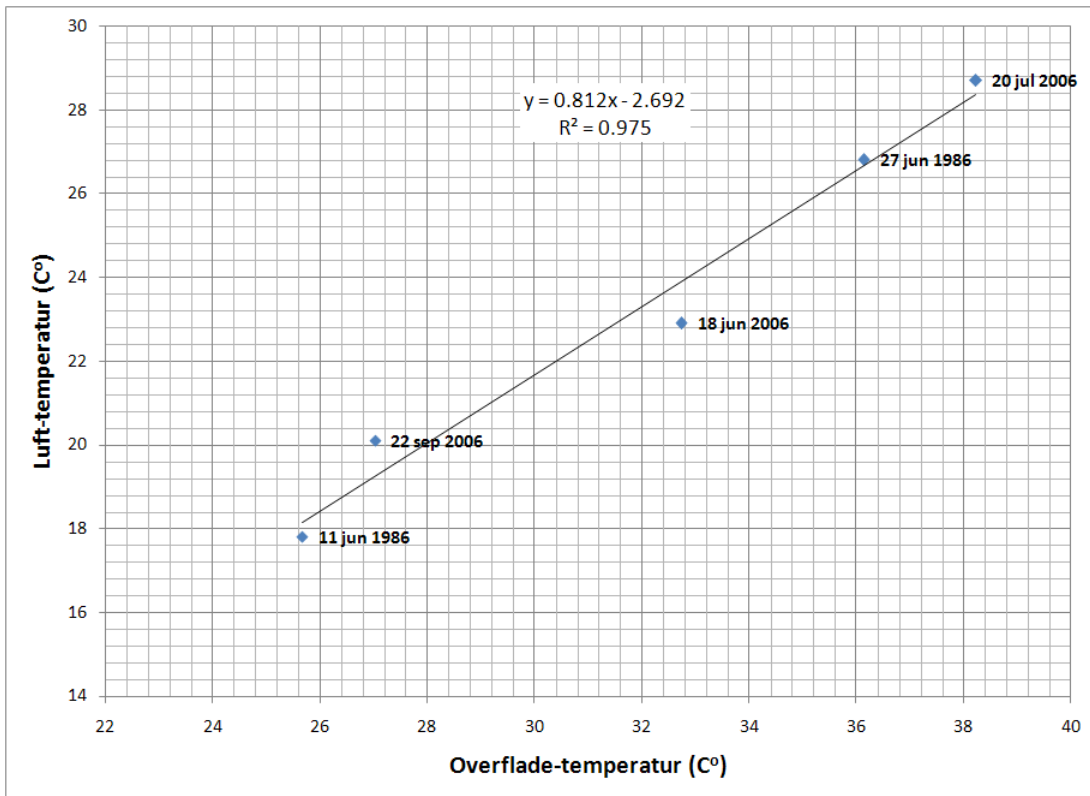
Figur 10. Sammenhæng mellem overfladetemperatur for København d. 20. juli 2006 bestemt fra henholdsvis Landsat og MODIS. Sammenhængen er baseret på et systematisk grid bestående af ca. 1000 punkter.

### Sammenhæng mellem overfladetemperatur og lufttemperatur

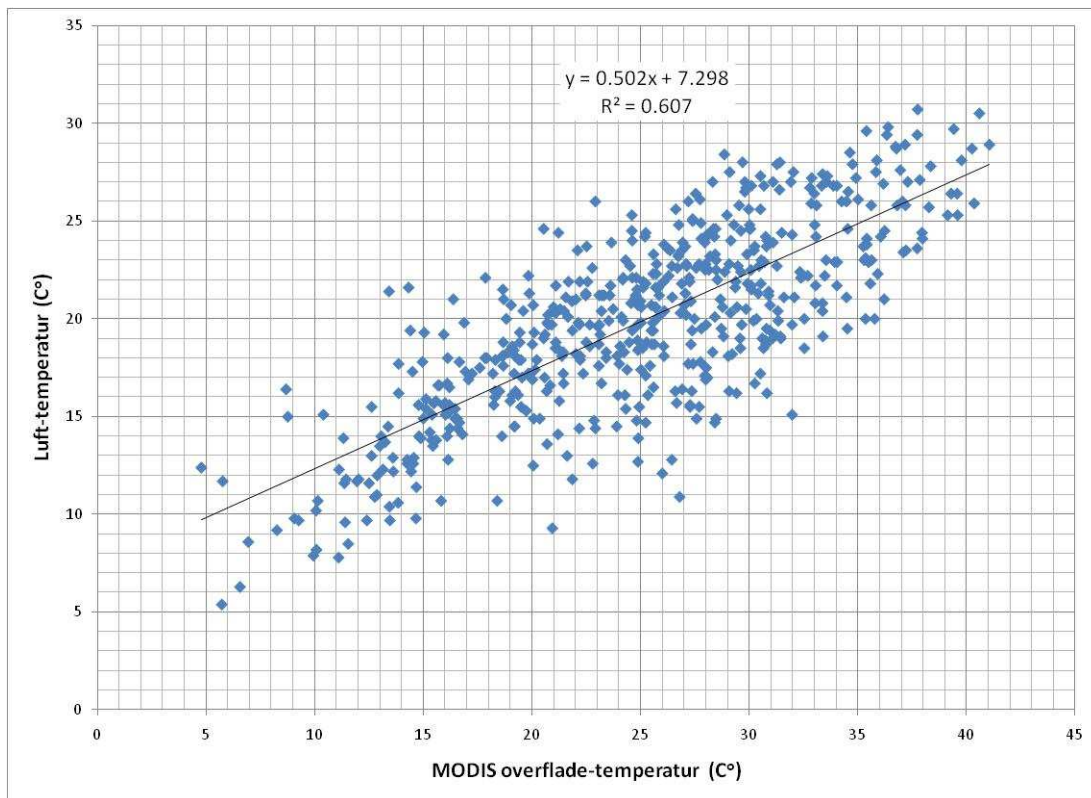
Da satellitterne måler overflade-temperatur er det en forudsætning i vurderingen af UHI at der er en sammenhæng ml. overfladetemperaturen og den omgivende lufttemperatur, der er den følte temperatur. Om denne forudsætning holder, er testet ved at sammenholde tilgængelige data for lufttemperatur fra DMIs målestation ved Landbohøjskolen (nu KU-LIFE) (Cappelen 2010) med overfladetemperaturer fra Landsat-satellitten. Målestationen er placeret i haven omkring KU-LIFE, og dermed i et grønt område. Resultatet fremgår af Figur 11.

Figur 11 antyder at der er en entydig relation mellem de to temperaturmål, med luft-temperaturen værende væsentligt lavere end den tilsvarende overfladetemperatur. Det skal understreges at relationen er lavet på basis af et relativt beskedent datamateriale på kun fem observationstidspunkter.

Et bedre statistisk grundlag kan opnås ved at sammenligne DMI-målestationens daglige målinger af temperaturen ved KU-LIFE med daglige skyfrie MODIS-optagelser i perioden 2003 til 2009. Dette er gjort i Figur 12. Den grovere opløsning på MODIS-data betyder at sammenhængen er mindre markant, men til gengæld er datagrundlaget væsentligt bedre. Det er interessant at bemærke at for de varme dage er overfladetemperaturen højere end lufttemperaturen, mens de to temperaturmål er mere ens på de koldere dage ( $< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Det konkluderes at der kan antages en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem overfladetemperaturer målt med satellit og lufttemperaturen.



Figur 11. Sammenbæng ml. overflade-temperatur bestemt fra Landsat satelliten og lufttemperatur målinger for DMI's målestation ved Landbobøjskolen. Bemærk at pga skydække har det ikke været muligt at bruge Landsat billederne fra 26. Maj 1986 og 2. juni 2006.

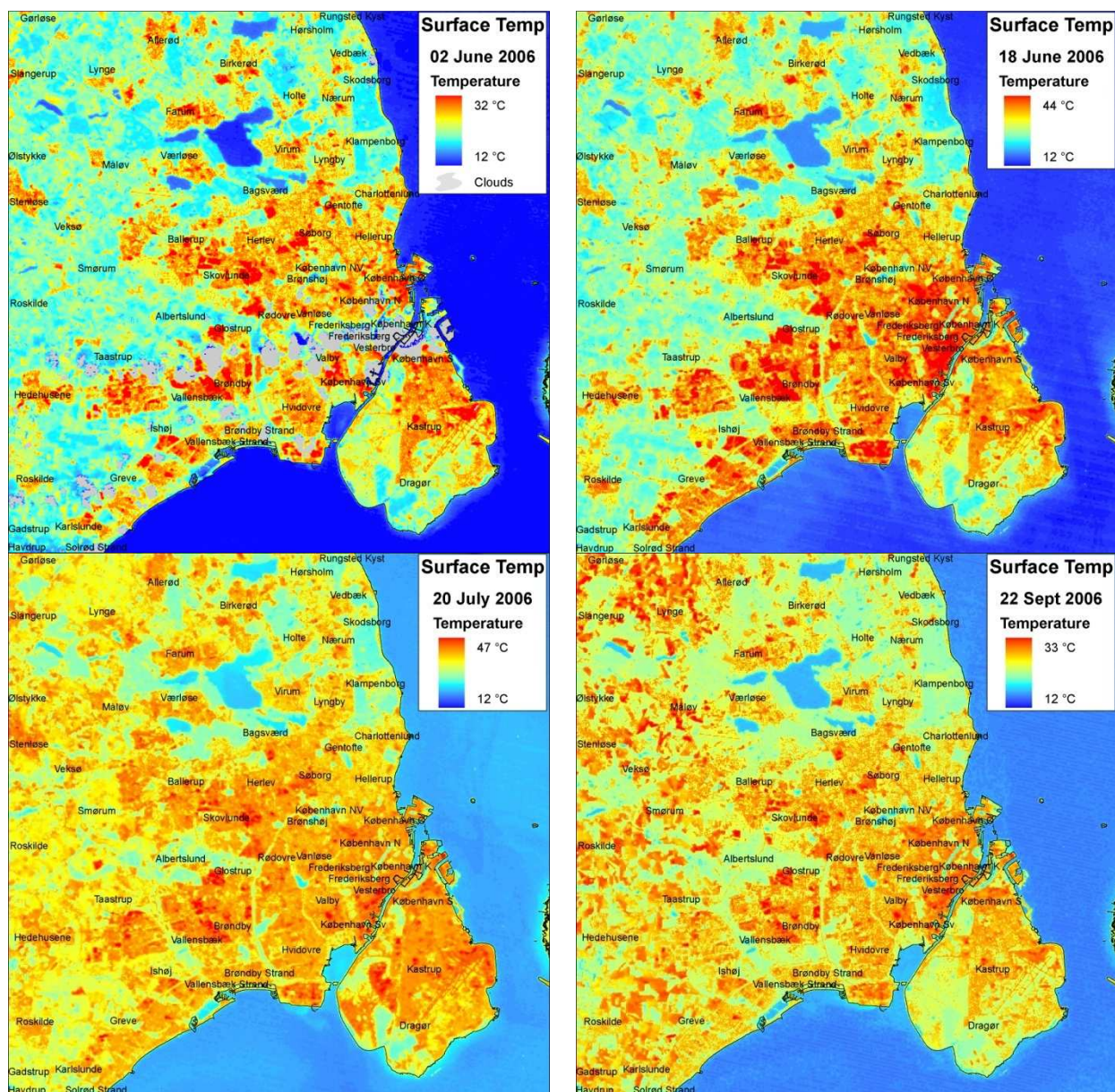


Figur 12. Sammenhæng mellem overfladetemperatur bestemt fra MODIS-satelliten og lufttemperatur-målinger for DMI's målestation ved Landbohøjskolen. Sammenhængen er baseret på skyfrie MODIS-optagelser i perioden 2003 til 2009.



## Forskelle i overfladetemperaturer i og omkring København

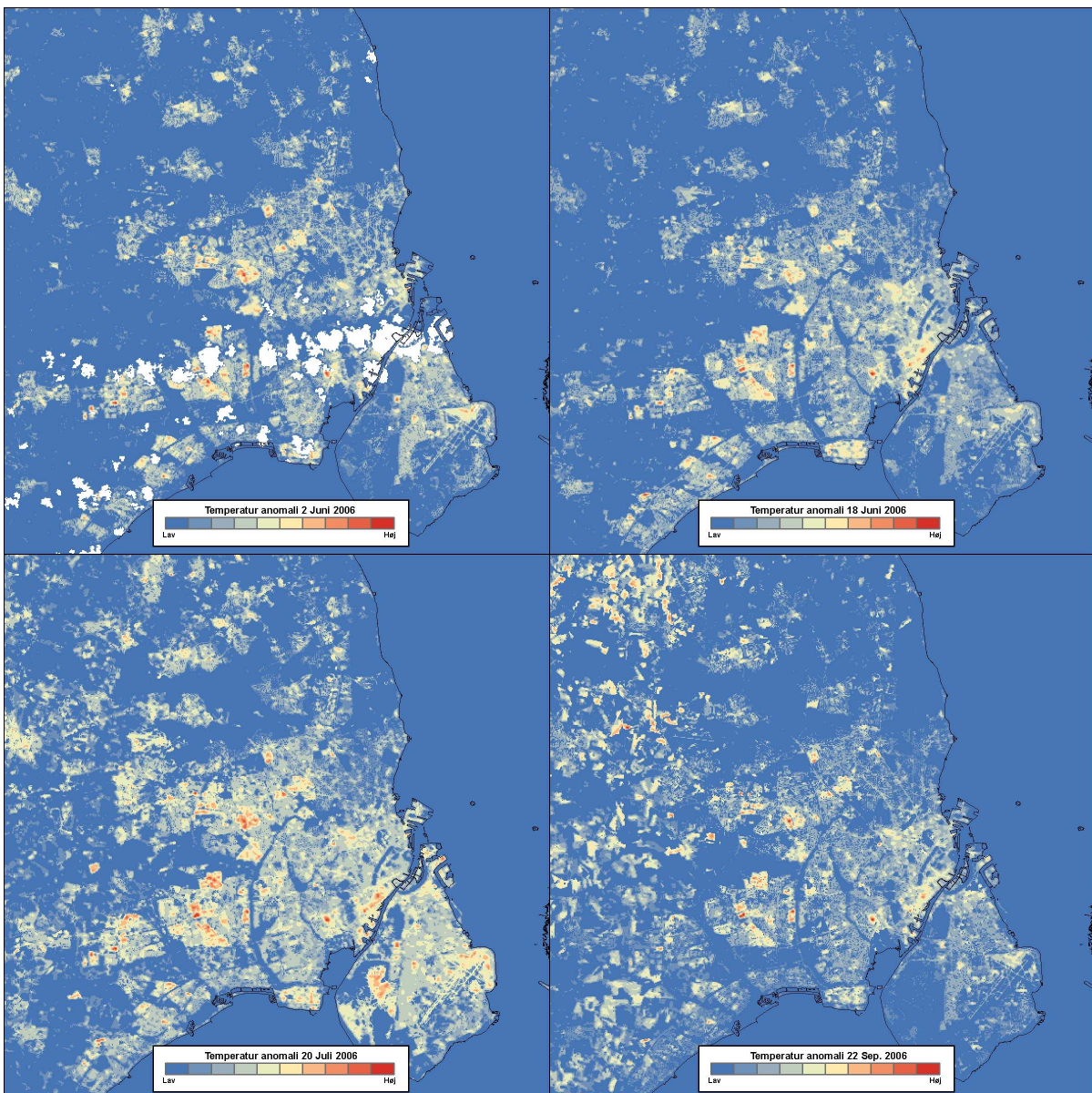
Figur 13 viser overfladetemperaturen i Københavns Kommune og omegn for de fire udvalgte dage i sommeren 2006. Der ses at være store regionale variationer med en klar tendens til højere overfladetemperaturer i bebyggede områder, herunder Københavns indre bydele. De koldeste områder er vandoverflader (hav, søer) efterfulgt af de større skovområder (Dyrehaven ved Klampenborg, skovene omkring Furesøen, og Vestskoven ved Albertslund). Sommerens varmeste dag, d. 20. juli, resulterede i overfladetemperaturer på op til 47 °C, mens de øvrige 3 dage lå fra 32 °C til 44 °C.



Figur 13: Kort over overfladetemperaturer i København og omegn på fire dage i 2006, nemlig d. 2. juni, d. 18. juni, d. 20. juli og d. 22. september. Kortene er fremstillet ud fra en bearbejdning af Landsat-data.

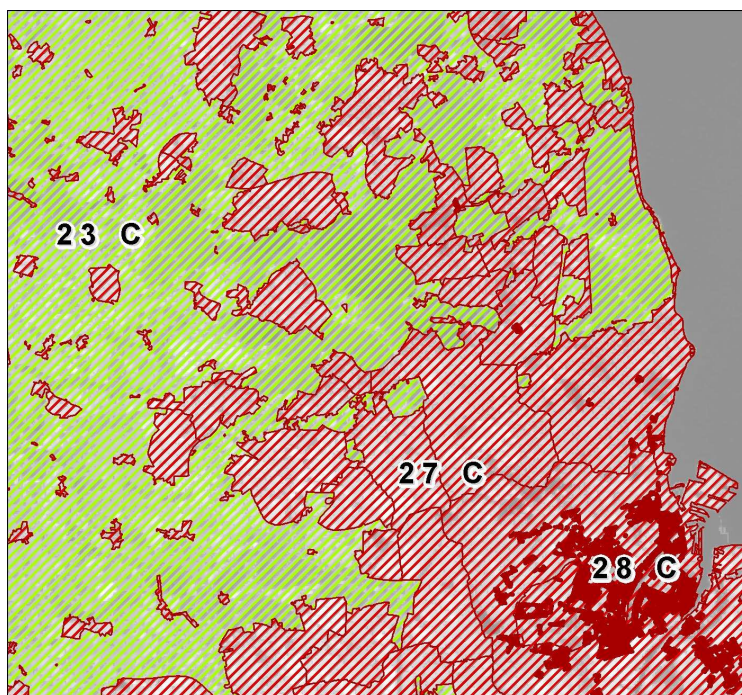


For at vurdere om det hver gang er de samme områder, der optræder som de varmeste på de fire dage i 2006 er der fremstillet såkaldte anomalikort, hvor kun forskellen mellem den enkelte celledes temperatur og hele områdets gennemsnitstemperatur vises (Figur 14). Derved normaliseres temperaturskalaerne for de fire dage, og det bliver lettere at se om det er de samme "hotspots", der går igen ved alle fire målinger. Ved sammenligning af de fire anomalikort ses, at det tilsyneladende er omtrent de samme områder der hver gang opvarmes mest.



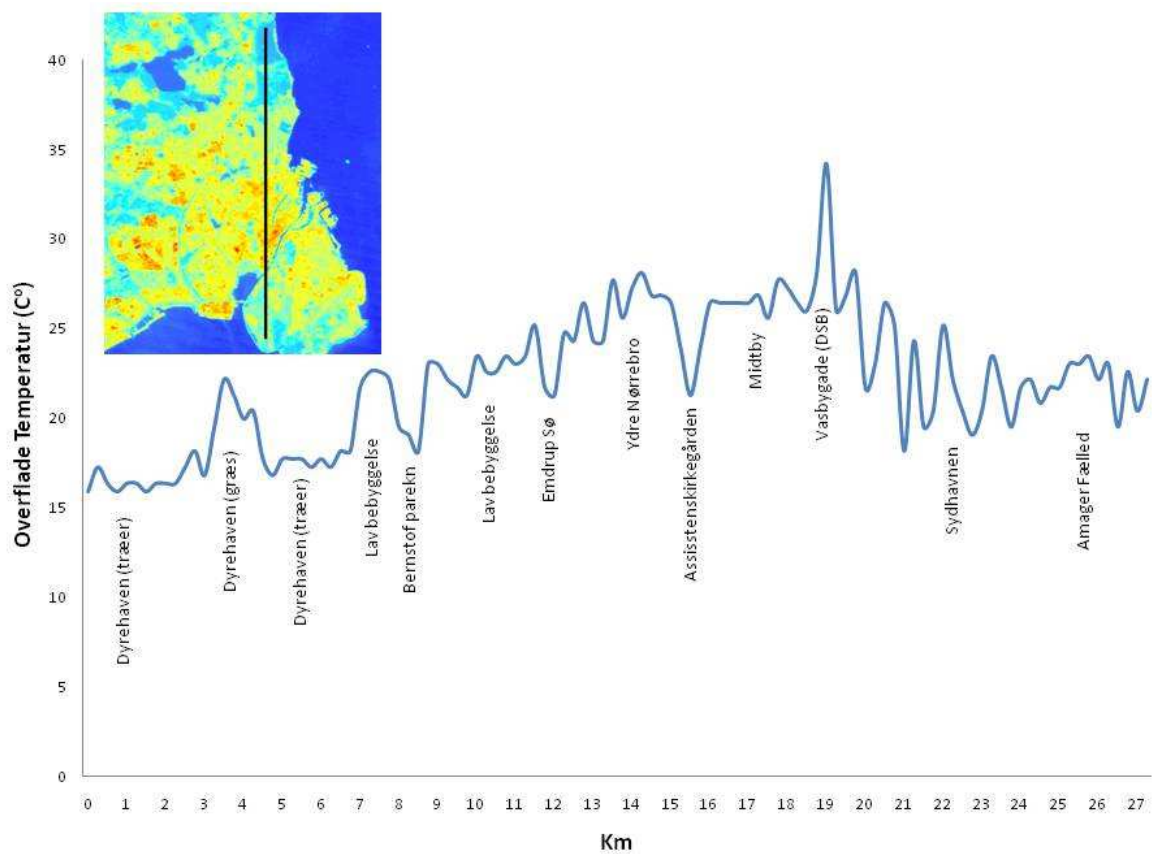
Figur 14: Anomalikort for overfladetemperaturen i Københavnsområdet d. 2. juni, 18. juni, 20. juli og 22. september 2006. Samme kort som i Figur 13, men hver celledes temperatur er blevet sat i forhold til hele områdets middeltemperatur og farveskalaerne er harmoniseret.. NB: Hvide pletter kortet øverst til venstre er skyer.

Det er muligt at give et estimat af lufttemperaturen ud fra overflademålingerne, ved hjælp af sammenhængen beskrevet ovenfor (Figur 12). Det resulterer for d. 20. juli i temperaturer som vist i Figur 15. Der er beregnet gennemsnitstemperatur for celler i åbent land, bymæssig bebyggelse (rød-skraveret) og indre by (rød), baseret på AIS-data. Der ses at være en forskel på ca. 5 °C mellem det åbne land uden for byen og selv den bymæssige bebyggelse. Indre by skiller sig kun svagt ud fra øvrig bymæssig bebyggelse, men det skal bemærkes at gennemsnittet kan dække over betydelige forskellige mellem de forskellige kvarterer, jf. de efterfølgende analyser.



Figur 15: Temperaturforskelle mellem land og by. Kortet viser gennemsnitstemperaturen for det centrale København (rødt område), forstæderne (rød skravering) og det ubebyggede areal (grøn skravering). Bemærk at de viste temperaturmål er estimerede lufttemperaturer, baseret på korrelationen fundet for 20. juli 2006, jævnfør Figur 12.

De regionale forskelle d. 20. juli 2006 er på figur 16 udtrykt som et nord-syd-gående transekt. Det ses, at temperaturerne er lavest i de grønne områder uden for byen, stigende over forstæderne, og kulminerende i centrum. I transektet ses de grønne og blå områder overalt at virke kølende. Omvendt er det absolut varmeste området DSB's jernbaneterræn nær Vasbygade i København SV.

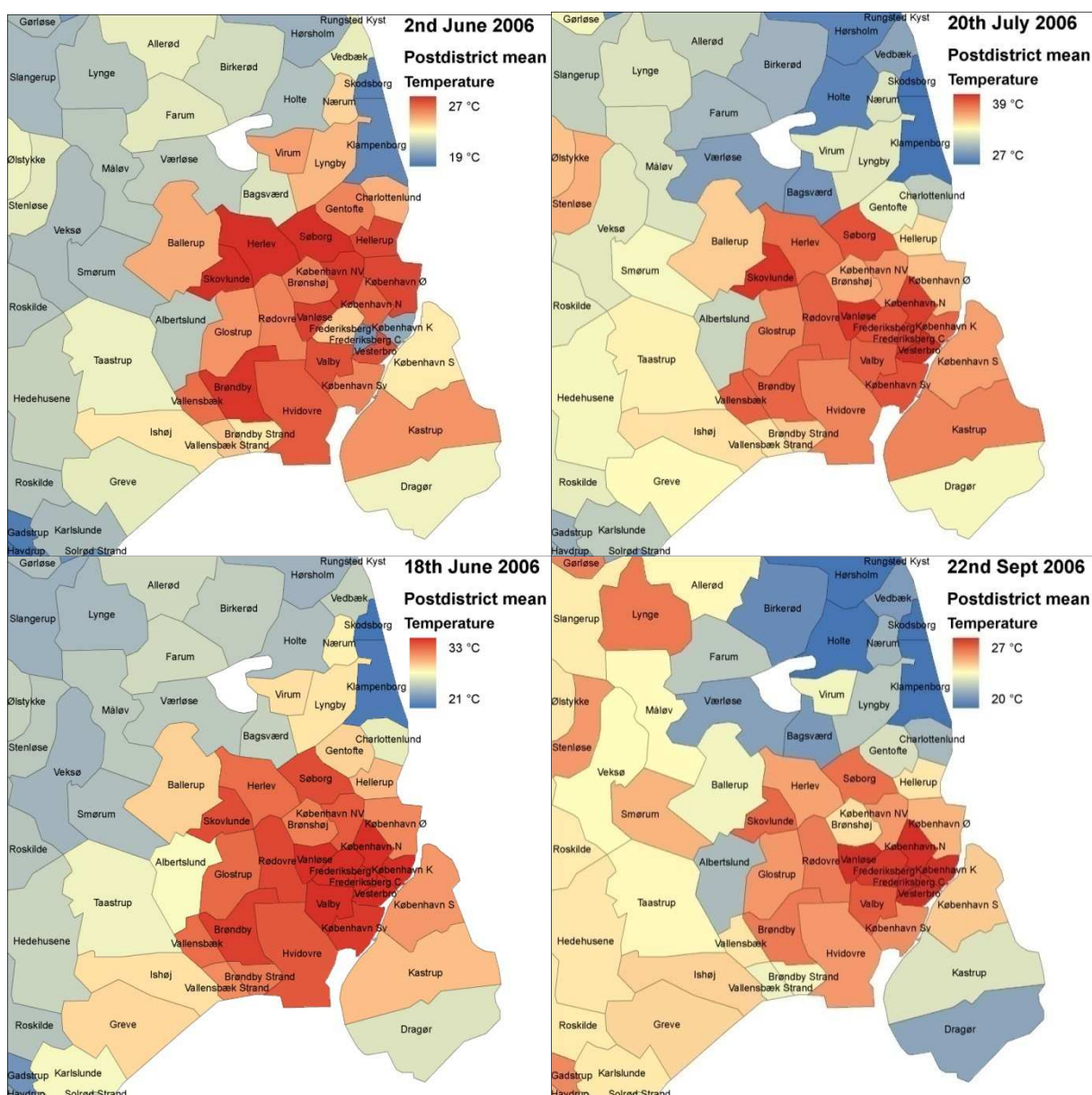


Figur 16: Overfladetemperaturer i et nord-syd gående transekt gennem København d. 20. juli 2006.

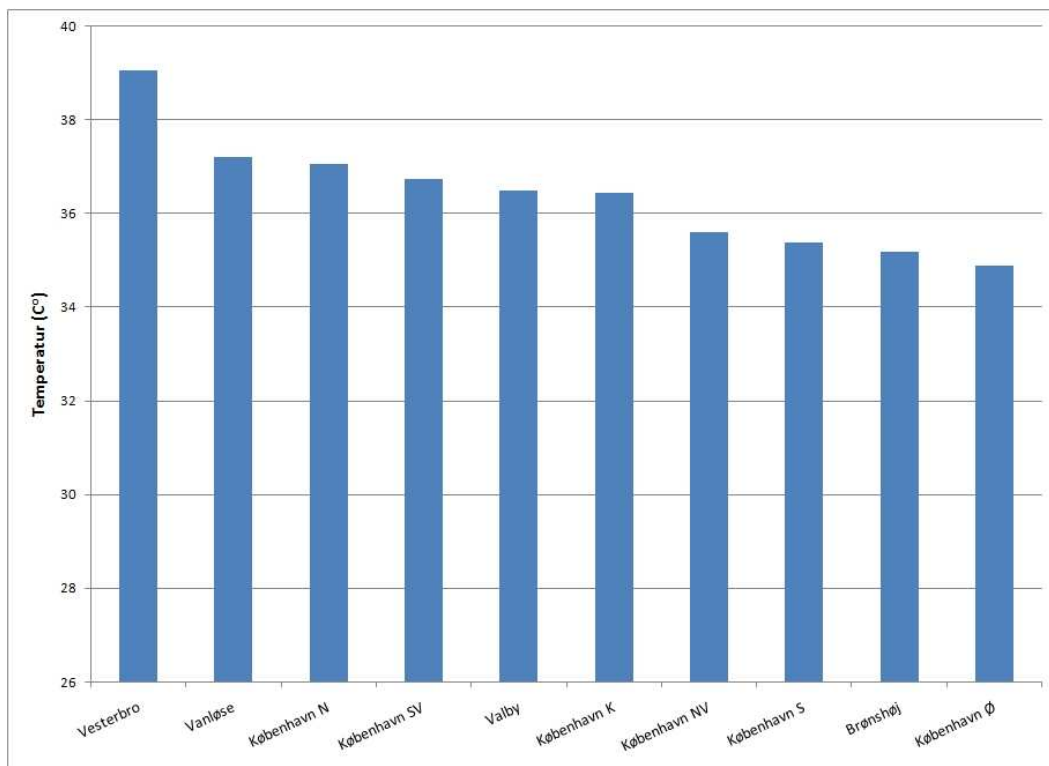


En anden måde at kigge efter mønstre på er at beregne den gennemsnitlige overfladetemperatur for de enkelte postdistrikter, som gjort i Figur 17. Efterfølgende figurer viser så Københavns postdistrikter rangordnet efter den målte gennemsnitstemperatur den 20. juli (Figur 18).

Det ses at de gennemsnitlige overfladetemperaturer på tværs af alle postdistrikter spænder over forskelle på 7 – 12 °C på de fire undersøgte dage. Inden for kommunen er der d. 20. juli absolutte forskelle på ca. 4 °C i de gennemsnitlige temperaturer, med Vesterbro som det absolut varmeste distrikt og København Ø som det køligste sammen med Brønshøj og København SV.



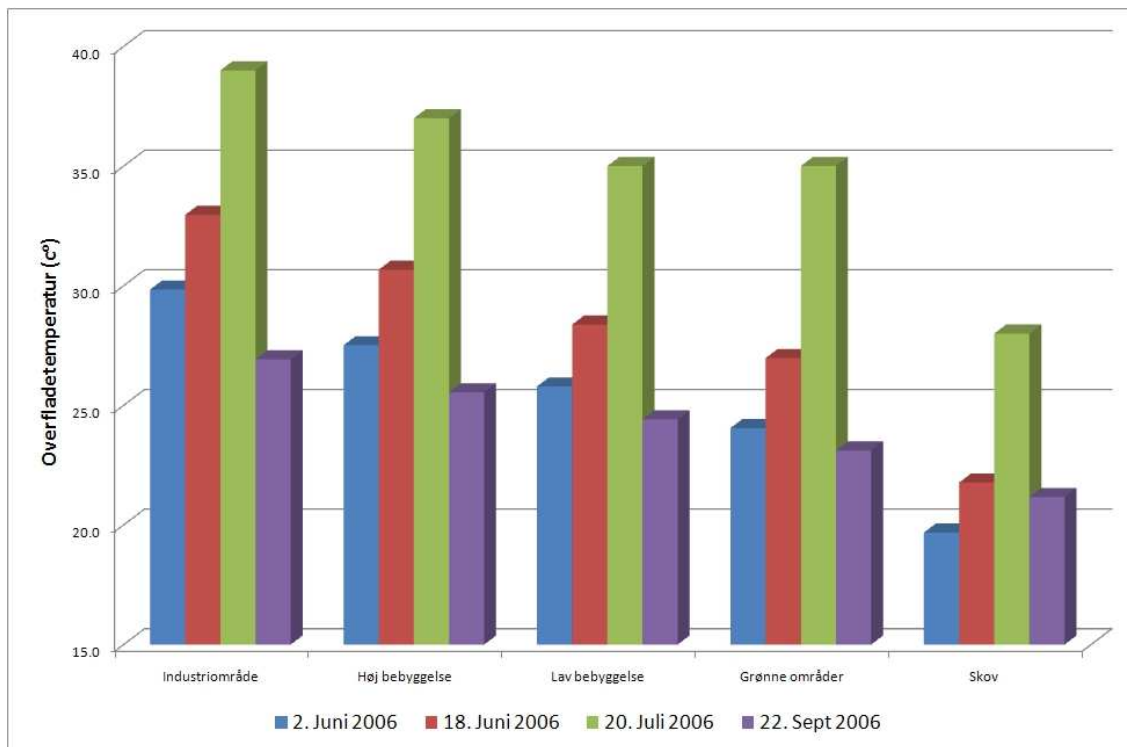
Figur 17: Den gennemsnitlige overfladetemperatur d. 20. juli 2006 i postdistrikter i København og omegn. Bemærk at der optræder skybilledet fra d. 2. Juni, hvilket medfører en kunstig lav gennemsnitstemperatur (blå distrikter) i bl.a. indre København.



Figur 18: Postdistrikter i Københavns Kommune opstillet efter middelloverfladetemperatur d. 20. juli

### Overfladetemperaturen som funktion af arealanvendelsen

Overfladetemperaturen afhænger tydeligvis af om et areal er befæstet eller ej. For at præcisere forskellene mellem forskellige arealanvendelser er områder med samme arealanvendelse samlet i 5 kategorier (lav bebyggelse, høj bebyggelse, industri, rekreativt område, skov) og den gennemsnitlige overfladetemperatur beregnet for de fire undersøgte dage i 2006. Resultatet er vist i figur 19. Det kan konstateres at de forskellige bebyggelsestyper resulterer i tydeligt forskellige overfladetemperaturer, og at rækkefølgen er den samme for alle fire datoer: Industriområder, høj bebyggelse, lav bebyggelse, rekreative områder og skov. De største forskelle ses mellem industriområder og skov, hvor forskellen på den varmeste dag er på ca. 10 °C. Men også mellem høj og lav bebyggelse er der betydelige forskelle, omtrent 3 °C. Endelig er det interessant at lav bebyggelse ikke kan skelnes fra decideret grønne områder.



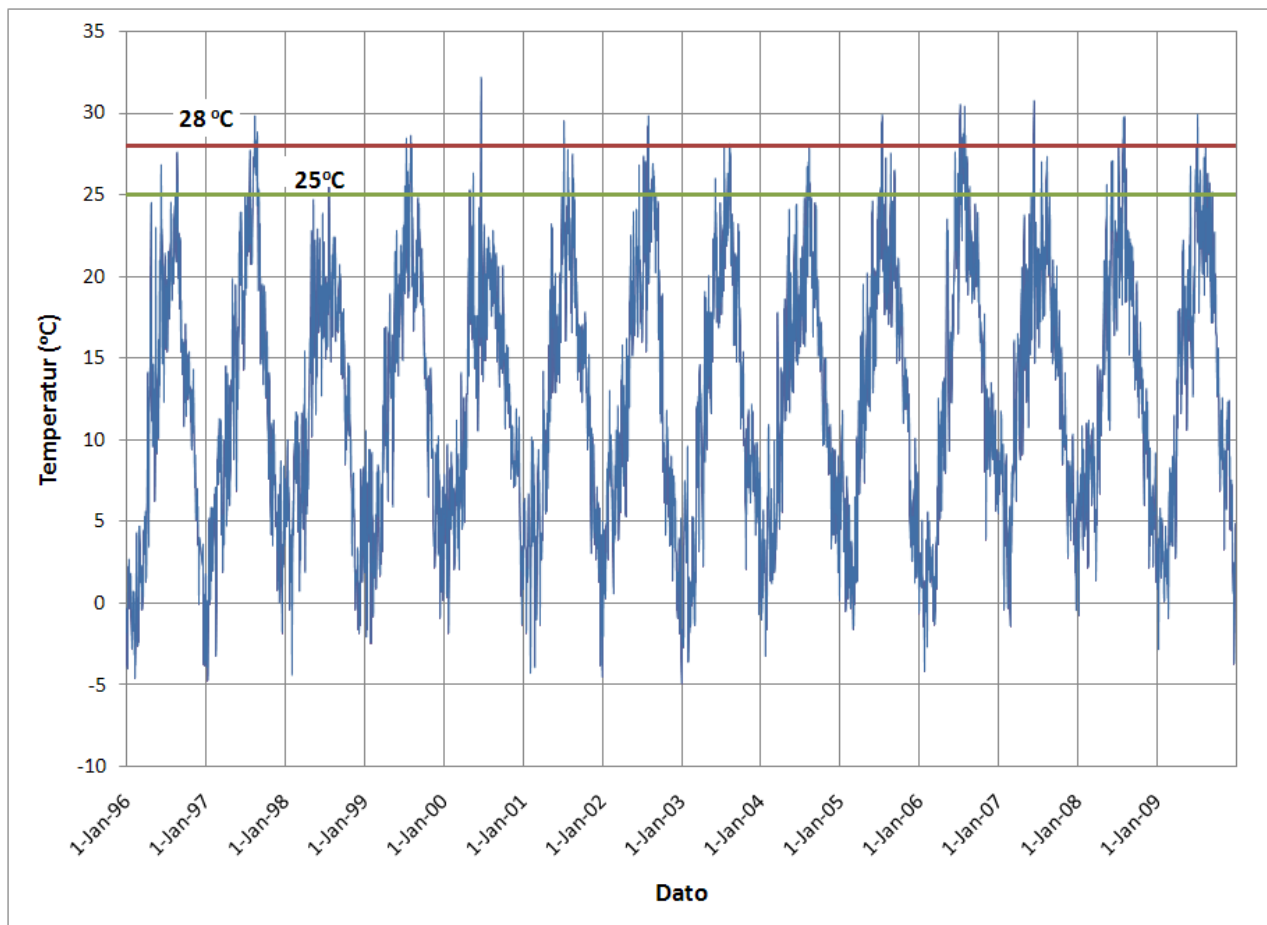
Figur 19: Gennemsnitlig overfladetemperatur for forskellige arealtyper på hver af de fire undersøgte dage i 2006. Sammenlignes denne figur med figur 24, fremgår det at vegetation er en vigtig forklaring for de målte temperaturforskelle.

### **Lufttemperatur, hedeølger og alment velbefindende (human comfort) i København**

På basis af de daglige lufttemperaturdata er det muligt at vurdere i hvilket omfang lufttemperaturen har en potentiel negativ indflydelse på Københavnerens dagligdag. Figur 20 viser de årlige temperaturprofiler fra 1996 til 2009 sammen med temperaturgrænserne for DMI's hedeindex (se figur 5). I hele perioden (14 år) er der sammenlagt 227 dage med temperaturer over 25 °C, som er den laveste temperatur, der indgår i indekset. Ved denne temperatur er der "minimal risiko, udmattelse mulig". Inden for perioden er der 37 dage med en temperatur over de 28 °C, som i kombination med høj luftfugtighed kan give "tiltagende risiko, solstik, og udmattelse". Disse gennemsnitsdata dækker sandsynligvis over betydelige lokale variationer inden for Københavns Kommune og er derudover målt i Landbohøjskolens have og vil derfor være påvirket af vegetationens temperatursænkende effekt. En nærmere analyse af forholdet bør tage udgangspunkt i målinger af lufttemperaturen på forskellige lokaliteter af forskellig karakter i byen (se afsnittet *Anbefalinger*).

I et videre perspektiv bør de forventede klimaforandringer med fremtidige temperaturstigninger på mindst 2 °C frem mod år 2100 dog bringes i erindring, og især det forhold, at hedeølgerens antal og intensitet vil stige. Dette vil kunne rykke betydeligt ved forekomsten af hede i Danmark. Hertil skal så lægges UHI, der populært sagt betyder at en hedeølge over Danmark rammer byboere hårdere end folk på landet, og at byboerne i de tætteste, mest befæstede og mindst grønne kvarterer dør mest. Her vil det almene velbefindende falde mest, og især om natten vil det være ekstra ubehageligt, fordi temperaturen på grund af varmetilførelsen fra bygningerne og den manglende fordampning, forbliver høj.





Figur 20. Daglig lufttemperatur (maksimumsværdier) data fra 1996 til 2009 fra DMI-målestationen i KU-LIFE's have (Cappelen 2010).

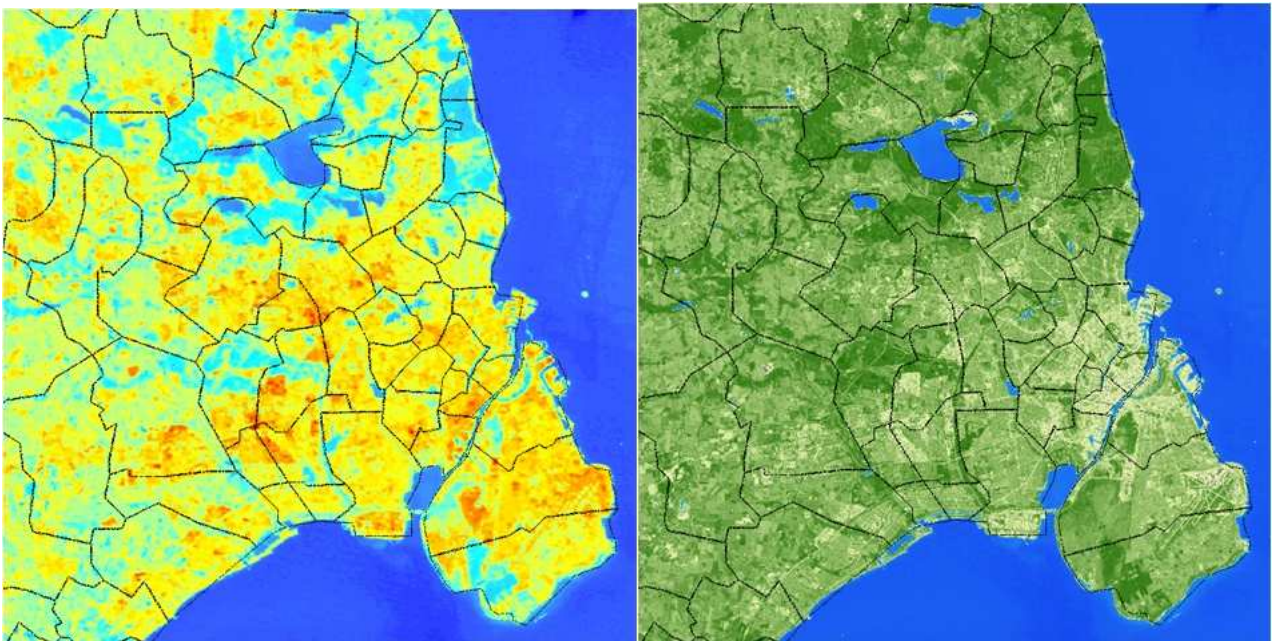
### Hvor meget køligere er byens grønne områder?

De tidligere figurer viser allerede at grønne områder generelt er køligere end områder med bebyggelse eller befæstelser. For at få et mere præcist udtryk for sammenhængen mellem byens grønne strukturer og overfladetemperaturen plottes i Figur 21 de observerede overfladetemperaturer mod områdets NDVI-indeks, der som forklaret under metoder er et udtryk for vegetationstætheden. Som diskuteret i introduktionsafsnittet har vegetation en generel nedkølende effekt på bymiljøet, og for at illustrere denne effekt for Københavns Kommune er overfladetemperaturen sammenlignet med et satellitbaseret vegetationsindeks. Et vegetationsindeks er en simpel numerisk indikator for vegetationens tilstand og udviklings-stadie. De fleste vegetationsindekser benytter sig af det forhold at et sundt, grønt plantedække vil absorbere forholdsvis meget af det synlige lys (VIR) og modsat reflektere meget af det nær-infrarøde lys (NIR) (se Infoboks 1). Det bedst kendte indeks er det såkaldte Grønhedsindeks – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), der udregnes på basis af refleksionen i det røde ( $\rho_{\text{rød}}$ ) og det nær-infrarøde ( $\rho_{\text{nir}}$ ) bånd:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{rød}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{rød}}}$$

NDVI varierer i teorien fra -1 til 1. I praksis vil landoverfladen dog have værdier fra 0 til 1. Jo nærmere 0, desto mindre vegetation, og jo tættere på 1, desto mere vegetation. Hvis planten er stresset pga. sygdom eller mangel på vand falder NDVI, hvorimod planter i sund vækst vil have et

relativt højere NDVI. NDVI har dog nogle indbyggede svagheder, bl.a. at det mætter ved høje vegetationstætheder og at det har vist sig følsomt overfor variationer i jord-baggrund. Til trods herfor har NDVI dog gennem de seneste tre årtier gang på gang vist sig som et yderst robust vegetationsmål, der giver pålidelig information på tværs af vegetationstyper og plantezoner (Carlson & Ripley 1997).



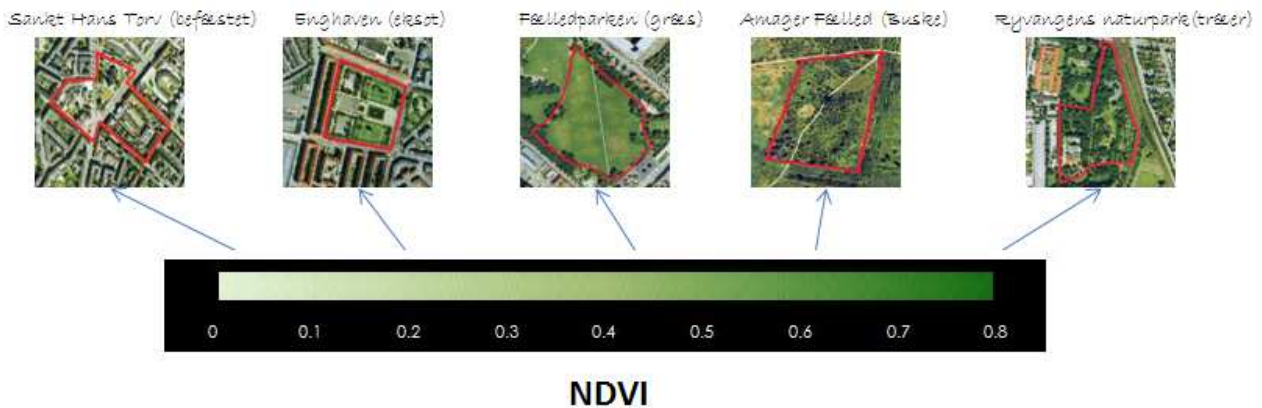
Figur 21: Overfladetemperatur og vegetationsdække. Kortet til venstre viser overfladetemperaturen d. 20. juli 2006. Blå farver er de koldeste områder og røde farver er de varmeste. Kortet til højre viser vegetationsdækket, udtrykt som NDVI-indeks. Jo mørkere grøn, desto mere vegetation i området.

Figur 21 viser, at områder med et højt grønhedsindeks er køligere end områder med et svagt vegetationsdække. Mørkegrønne områder på kortet til højre spejles således af kølige overfladetemperaturer på kortet til venstre. Tilsvarende befinder samtlige røde områder sig i områder med lille grønhed (hvide eller næsten hvide felter).

For at få en ide om hvilken type vegetation, der resulterer i et givent NDVI-indeks er der udvalgt 5 områder fra Københavns Kommune med forskelligt naturindhold og det tilhørende NDVI-indeks beregnet (Figur 22). De 5 udvalgte områder er:

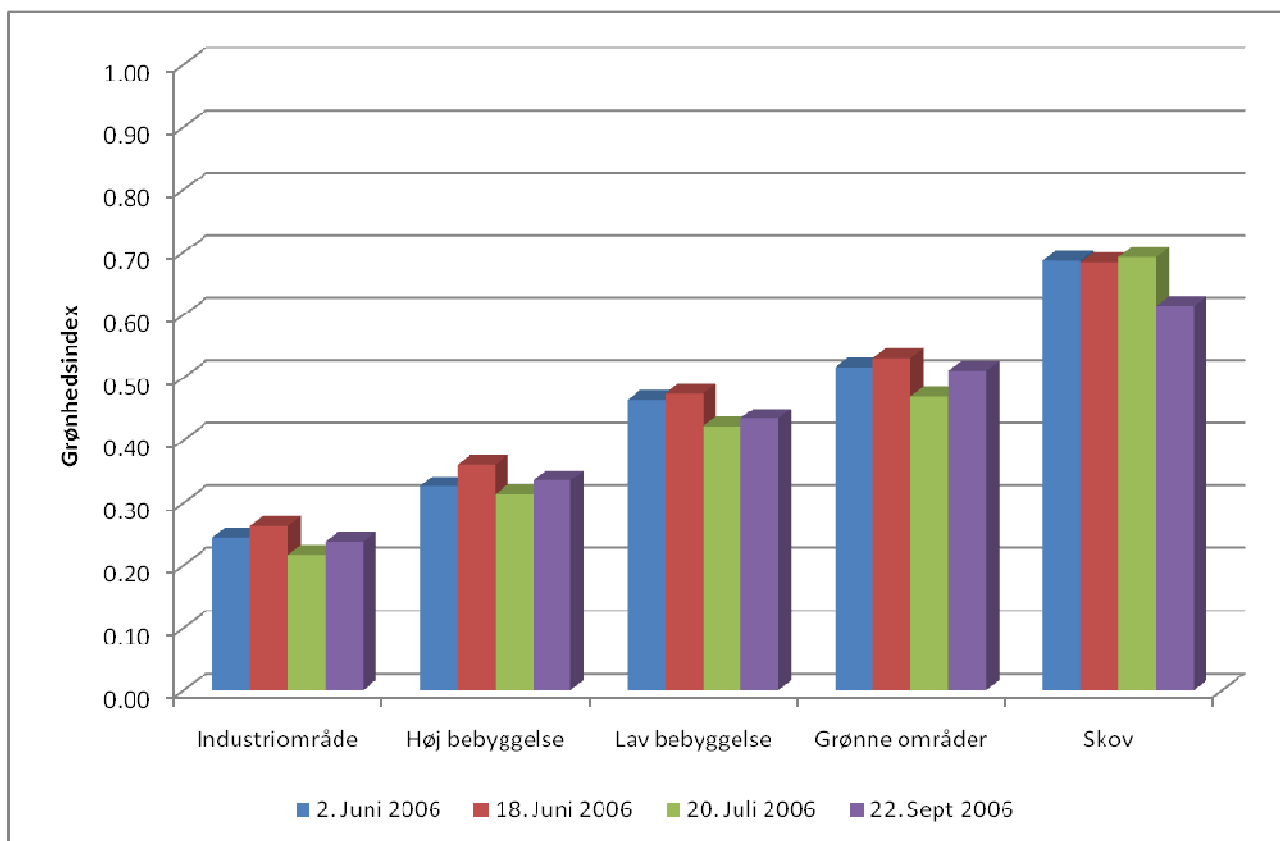
- Sankt Hans Torv, der er et næsten 100 % befæstet areal
- Enghaven, der er domineret af eksoter, dvs. ikke hjemmehørende arter
- Fælledparken, der er græsdomineret
- Amager Fælled, der er busk-domineret
- Ryvangens Naturpark, der er træ-domineret.

Som det fremgår af Figur 23 spænder de 5 områder over NDVI indekser fra under 0,1 (Skt. Hans Torv) til omkring 0,8 (Ryvangens Naturpark).



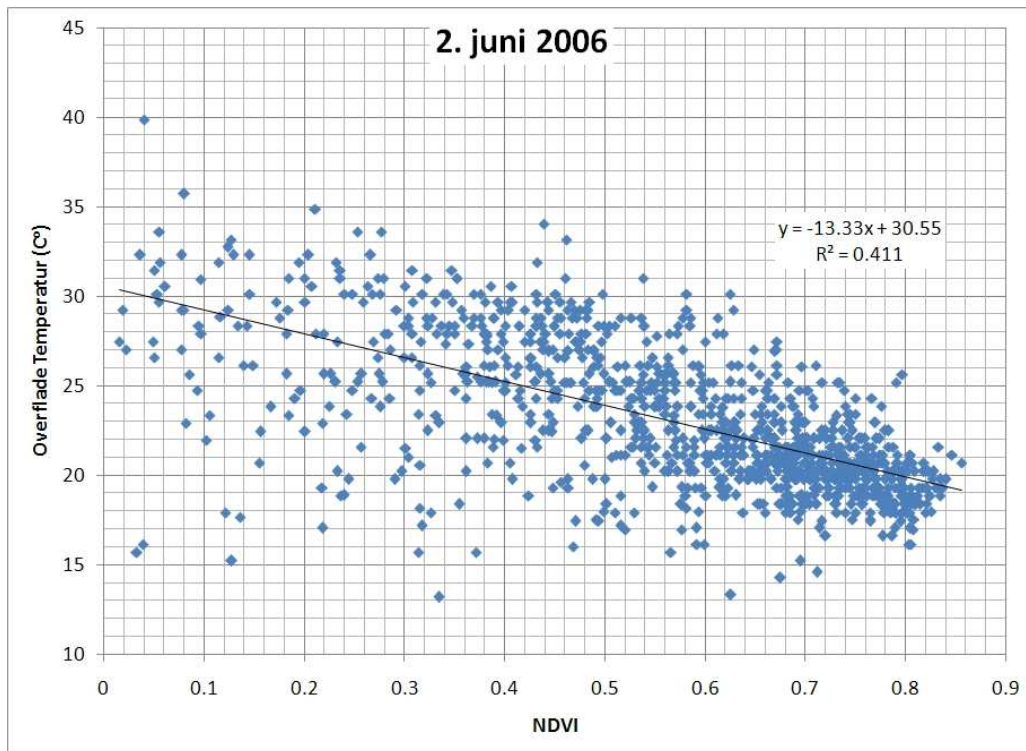
Figur 22: NDVI relateret til bymiljøer med forskelligt naturindhold

På figur 23 fremgår hvorledes det gennemsnitlige grønhedsindex varierer med arealtypen for de fire undersøgte dage, og sammenlignes figur 24 med figur 20 er det tydeligt, at andelen af grønt på et areal er en vigtig faktor for arealets temperaturforhold. Jo højere grønhedsindekset er, jo lavere er overfladetemperaturen.

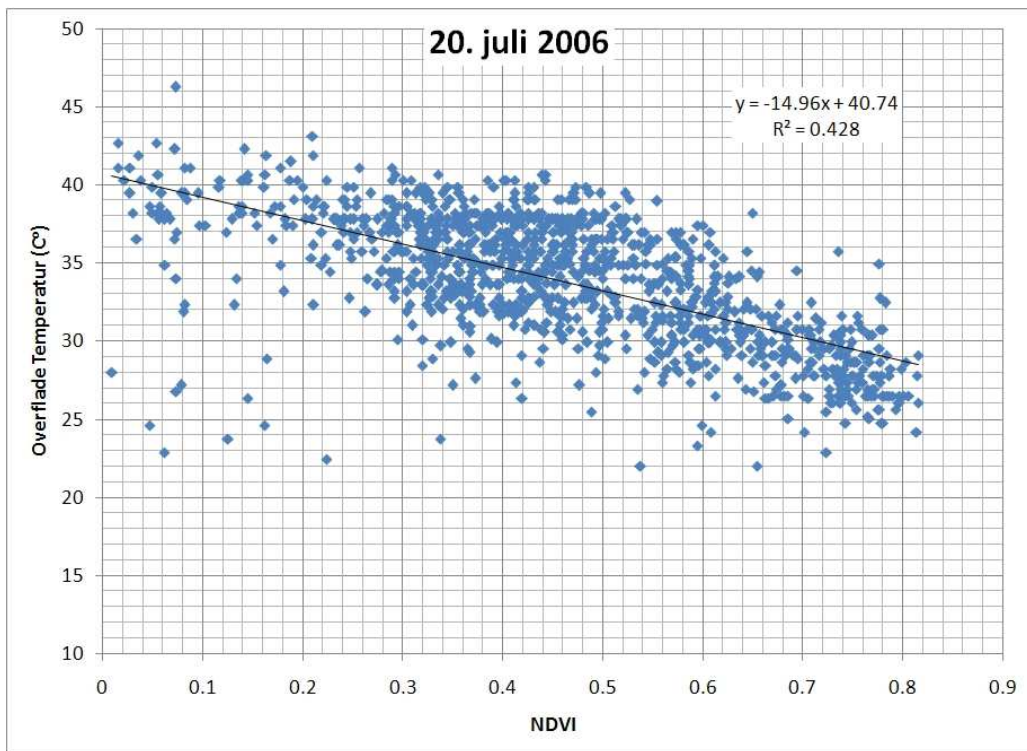
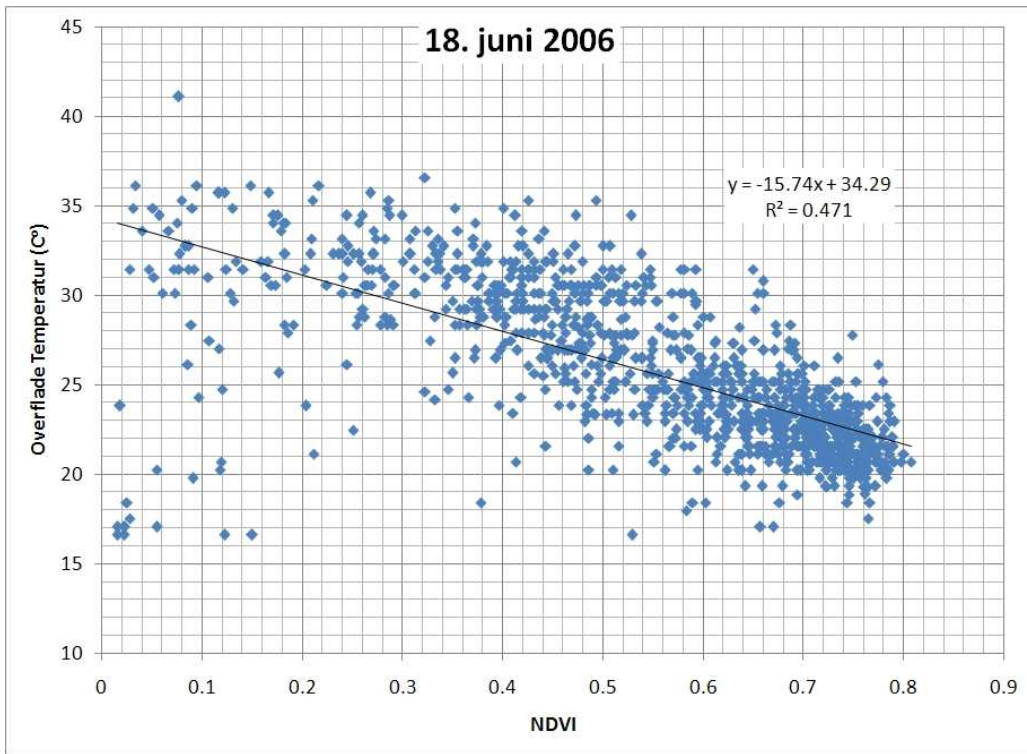


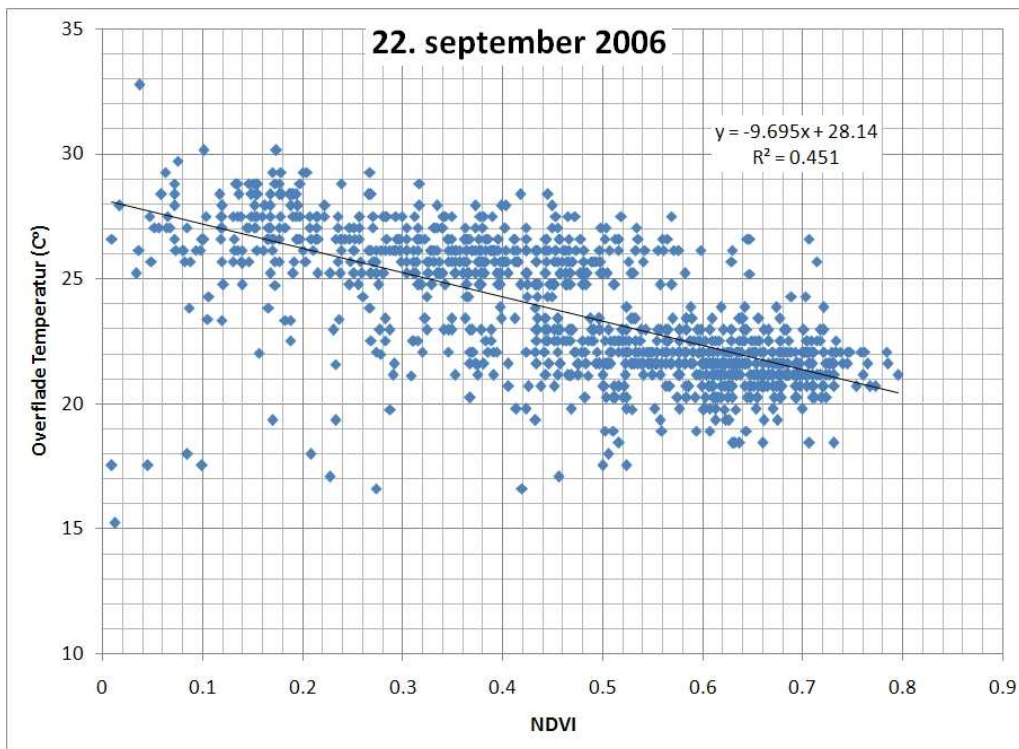
Figur 23: Gennemsnitlig grønhed for forskellige arealtyper på hver af de fire undersøgte dage i 2006.

Dette forhold kan derudover konstateres for alle fire undersøgte dage i 2006. I Figur 24 er der lavet et plot af overfladetemperaturen i hver af satellitbilledernes 60 m x 60 m celler mod cellens grønhedsindeks. Der ses for alle fire dage at være en retlinet trendlinje med pæn korrelationsværdi, som beskriver en faldende overfladetemperatur for et stigende grønhedsindeks. Jo mere grønt, des lavere er overfladetemperaturen – en effekt som efter al sandsynlighed også vil kunne måles via lufttemperaturen.

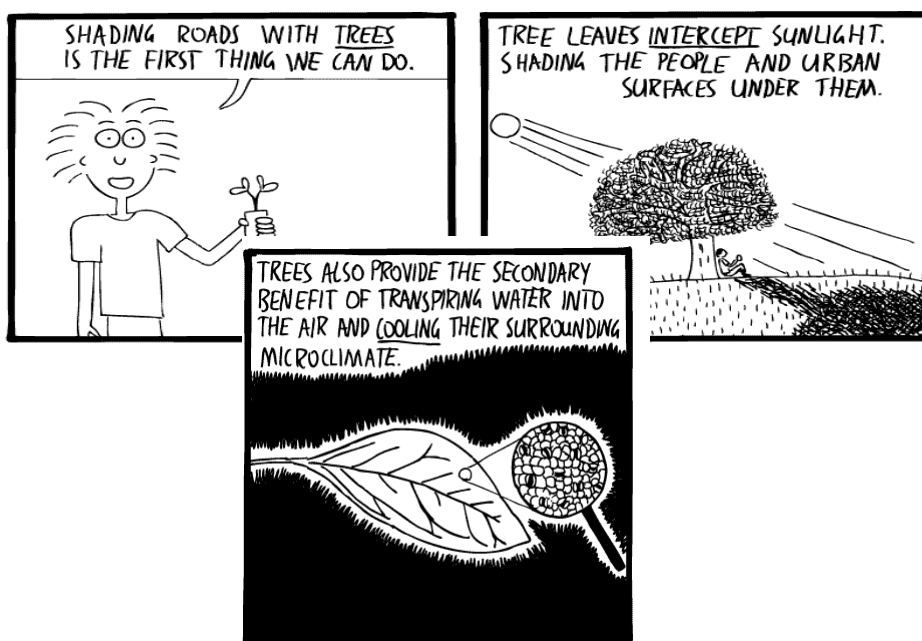








Figur 24: Overfladetemperatur som funktion af grønhedsindeks for hver af de fire undersøgelsesdage i 2006. Samme data som i Figur 19.





### **Resultater forskellige vegetationstyper i forskellige temperaturer?**

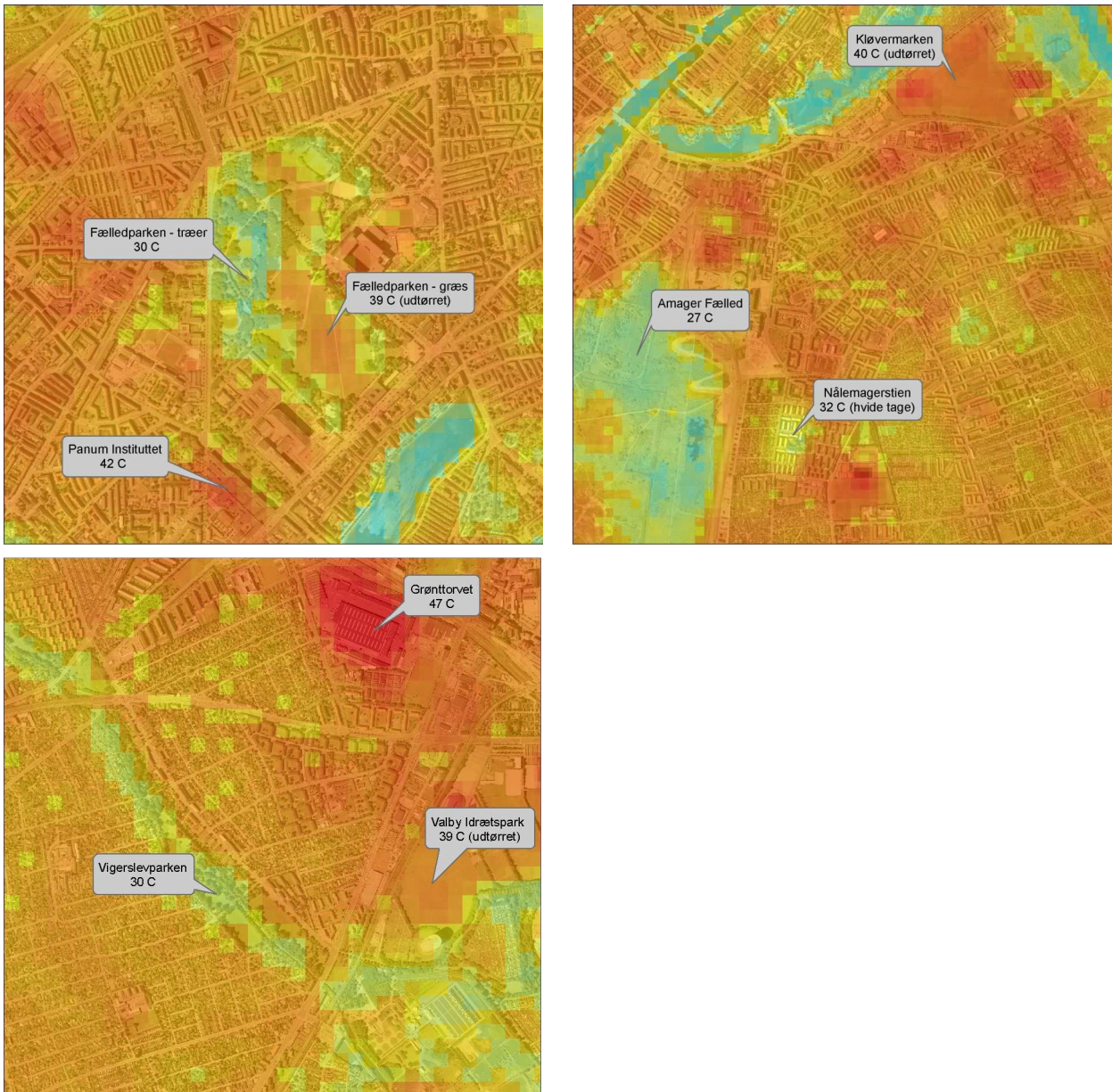
Zoomes der ind på nogle af de større grønne områder i Københavns Kommune kan der skelnes mellem overfladetemperaturer for forskellige vegetationstyper. Analysen kan kun gennemføres for grønne områder, der rummer adskillige celler af 60 m x 60 m, og forskellige vegetationstyper. Sådanne områder er der zoomet ind i på i Figur 25, for d. 20. juli 2006, - dette års varmeste dag.

Selv om al vegetation transpirerer vand og dermed potentielt kan virke nedkølende, viser det sig at arealer med trægrupper generelt i sommeren 2006 har en lavere overfladetemperatur end græsdominerede arealer i parker og boldbaner. Forklaringen er sandsynligvis at græsset på grund af et mere overfladisk rodsystem udtørre hurtigere, og derfor sidst på sommeren ikke længere transpirerer vand, mens træerne, der kan hente vand fra dybere jordlag, fortsat kan virke kølende. Udover vandforholdene spilder træernes bladareal ind. Træer har blade i flere lag, svarende til et højt bladarealindeks, sammenlignet med græs, og kan derfor potentielt afgive mere vand, og reflektere/absorbere mere indstråling. Græsarealer har typisk et bladarealindeks på 1-2, mens for eksempel bøg og eg kan have en bladarealindeks på helt op til 7, det vil altså sige op til 7 m<sup>2</sup> blade per m<sup>2</sup> voksested (kroneprojektion).

Udover fordampningsvirkningen må det anses som en væsentlig fordel, at man ved ophold i træers skygge kan slippe for op til 80 % af solstrålingen – hvilket øger den termale komfort i betragtelig grad (Matzarakis, 2008).

For Fælledparken ses forskellen at være på omkring 9 °C i overfladetemperatur. Græsarealernes overfladetemperatur er på det viste kortudsnit kun en smule lavere (39 °) end overfladetemperaturen i de bebyggede arealer, f.eks. Panum Institutet (42 °C). St

Store områder med tæt befæstelse og P-arealer uden vegetation, som f.eks. Grønttorvet i Valby, viser sig som særligt varme, mens parker og lyse områder, f.eks. områder med hvide tage, er køligere. At de hvide tage virker kølende hænger, som beskrevet i det indledende afsnit, sammen med den hvide farves høje albedo.



Figur 25: Detailudsnit af temperaturkort fra d. 20. juli 2006. Der er zoomet ind på områder i Københavns Kommune med større grønne områder.

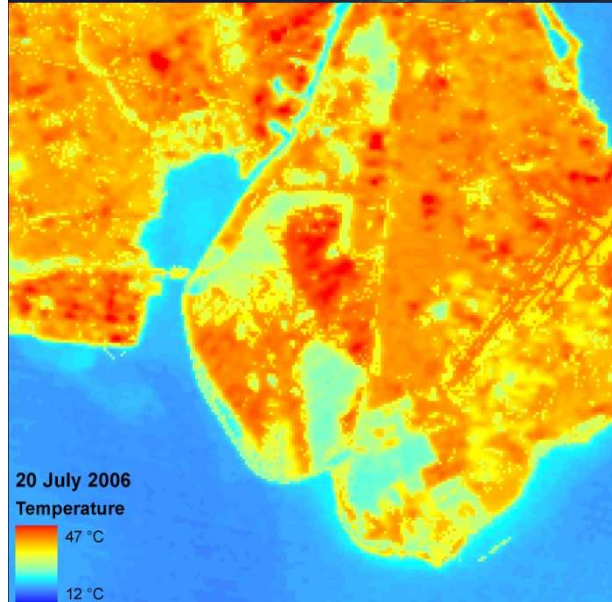
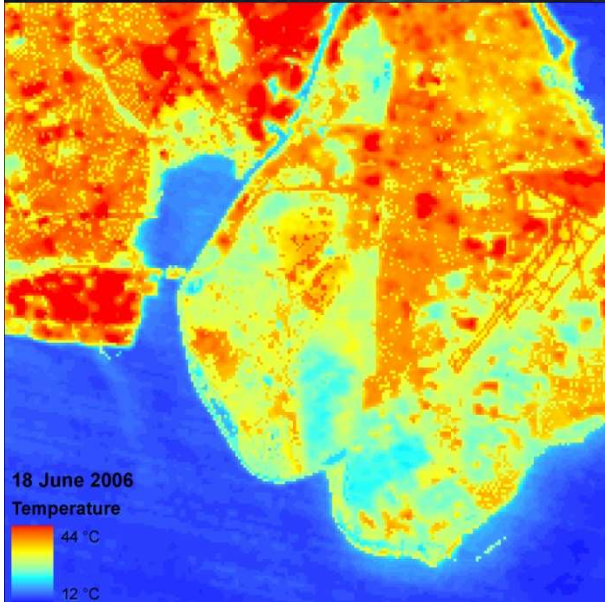
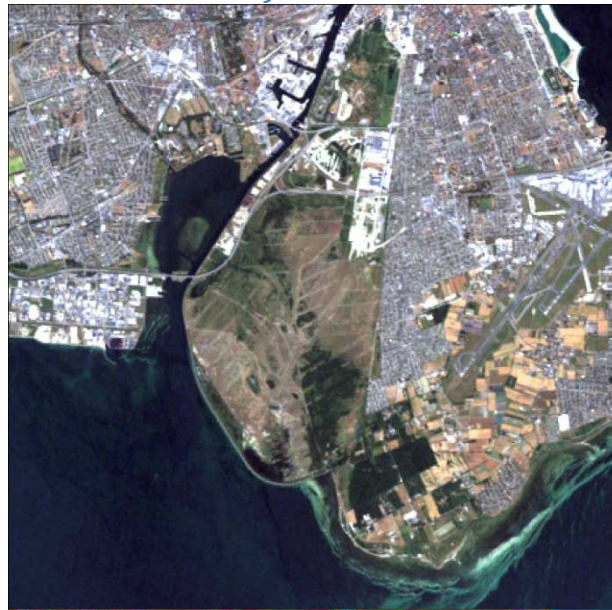
Sammenhængen mellem vegetationens transpiration og områdets overfladetemperatur demonstreres tydeligt af ændringerne på Amager Fælled hen over sommeren 2006 (Figur 26). På satellitfotoet fra d. 18. juni fremstår Fælleden med grønt græs, mens Fælleden en måned senere ser brun og afsveden ud. En interessant undtagelse er igen de trædækkede områder, der fortsat ser grønne ud (øverste billeder).



18. Juni 2006



20. Juli 2006



Figur 267: Sammenligning af overfladetemperatur på Amager Fælled d. 18. juni og ca. 1 måned senere d. 20. juli (de nederste kort), med de tilhørende fotos (øverst).

## **Anbefalinger til København**

### **Tag UHI seriøst**

I fremtidige strategier for Københavns fysiske udvikling anbefales det at tage UHI- fænomenet seriøst. Selv om UHI ikke står højt på agendaen i forhold til at forbedre københavnernes sundhed, er en lav Urban Heat Island Effekt et udtryk for maksimal komfort i byens rum også i varme somre. Dette er et gode, der forventes at blive efterspurgt i stigende grad i takt med de globale temperaturstigninger.

### **Følg med i UHI ved hjælp af satellitdata**

De forventede globale temperaturstigninger og byens fysiske udvikling gør det interessant at følge med i UHI. Det anbefales at opstarte en database, hvor satellitbaserede overfladetemperaturer og NVDI-værdier (grønhedsindeks) lagres. Databasen kan opdateres bagudrettet efter behov, f.eks. for 5 år ad gangen. Dette vil give en grundlinje, som udviklingen kan holdes op imod, og som kan dokumentere effekten af eventuelle indsatser for at modvirke UHI i forskellige områder.

### **Suppler med egne direkte målinger**

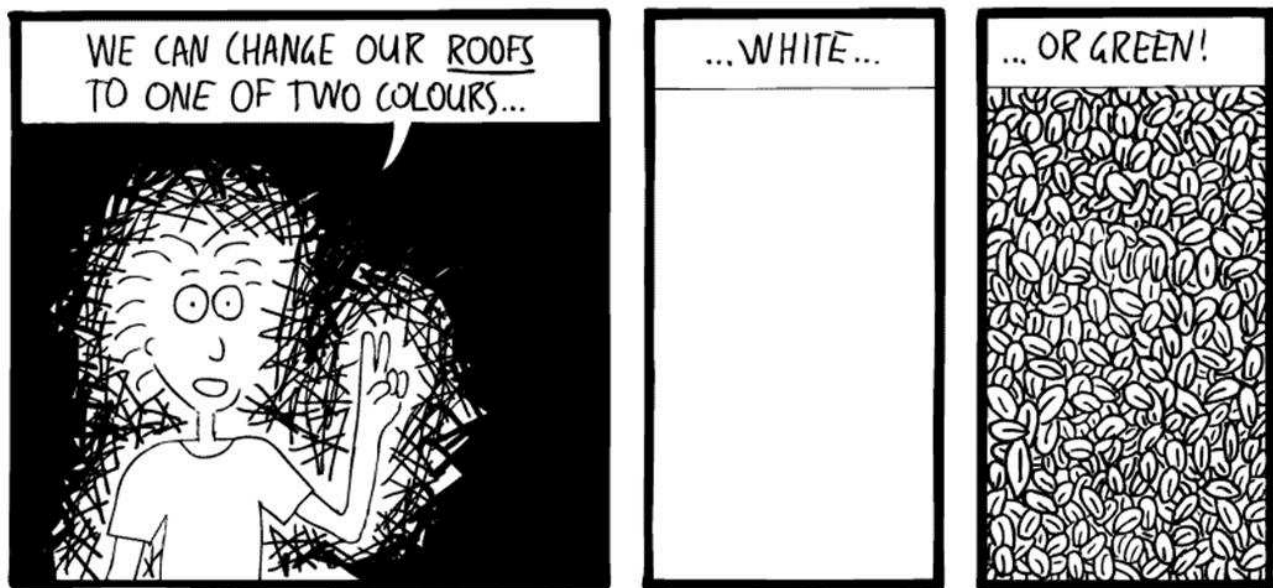
Det anbefales at opsætte et antal termologgere til måling af lufttemperaturen rundt omkring i byen. Lufttemperaturen, der er mest afgørende for den oplevede temperatur, er korreleret til overfladetemperaturen, men afhænger desuden af vindforhold m.v. Ved opsætning af et antal termologgere i de forskellige kvarterer kan UHI kvantificeres mere præcist, også hvad angår de ud fra sundhedsperspektivet vigtige nattemperaturer. Højeste og laveste nat- og dagtemperatur sammen med døgnets gennemsnittemperatur vil være tilstrækkeligt. Der vil dermed kunne skelnes mere nuanceret mellem forskellige områder, ligesom effekten af forskellige tiltag kan bestemmes og sammenlignes.

Det vurderes at opsætning af termologgere vil være en bedre investering end f.eks. termofotografering fra fly. Dette er forholdsvist dyrt, og vurderes ikke at ville give betydelig bedre data end hvad der kan opnås med satellit, der dækker hele byen og gentages regelmæssigt. Termologgere er billige både i indkøb og drift, idet data kan gemmes for lange perioder ad gangen, og derfor kun behøver tilsyn (datatømning) et par gange om året.

Overflyvninger vil dog eventuelt kunne supplere satellitmålinger, hvis der er behov for overfladetemperaturdata med højere opløsning – for eksempel for at undersøge effekten af mindre grønne arealer såsom lommeparker, baggårde og taghaver. Da der stadig mangler detaljeret viden om klimaregulerende effekter af den grønne infrastrukturelle delelementer, foreslås indretning af 'gadelaboratorier', hvor der foretages undersøgelser af de forskellige elementers virkning på klima og borgernes oplevelse af klimaet. Den her opnåede viden vil kunne indgå direkte i kommunens bestræbelser på klimatilpasning.

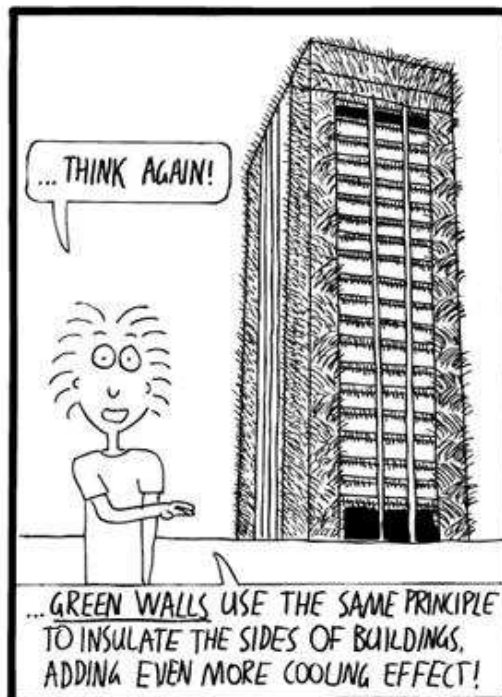
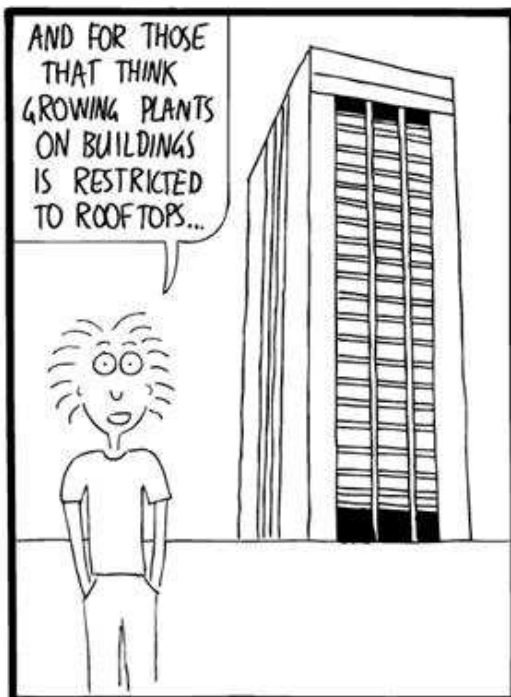
### **Modarbejd UHI ved hjælp af byens grønne struktur**

Det anbefales at bruge byens grønne struktur som primære foranstaltning mod UHI. Der bør udarbejdes en strategi, der sigter på både form og arter. En jævnt fordelt grøn struktur, der løber gennem alle byens gader og gårde og som når højt op af facader og henover tage har mere effekt end få store parker, og anbefales derfor som primære mål. I tæt bebyggede områder vil det altid være en udfordring at finde eller skabe plads til vegetation. Her bør grønne tage og facader medtænkes som en oplagt mulighed for at øge størrelsen af plantedækkede overfladearealer.



De store parker med gamle skyggegivende træer er dog også vigtige, som steder hvor temperaturen er markant lavere. Udover form og udbredelse er valget af arter vigtigt. Træer er takket være skyggevirksomheden absolut bedst. Træer har med et dybtgående rodnet desuden mulighed for at fordampe vand i længere tid end vegetationstyper med mere overfladisk rodnet. Hvor der ikke kan benyttes træer anbefales vegetationstyper med dybtgående rodnet.

Satsningen bør dog ikke alene gå på at øge antallet af træer og arealer med træbevoksning, men i lige så høj grad på at sikre en god etablering og skabe gode vækstbetingelser for at få træer og øvrig vegetation til at trives og opnå en størrelse, som sikrer funktionalitet i forhold til byklimaet. Kvantitet er uden tvivl vigtigt for at skabe en mærk- og målbar effekt, men uden den nødvendige kvalitet vil en eventuel nedkølede effekt udeblive.



### **Tænk byens grønne struktur sammen med byens afvanding**

Udover at udnytte den eksisterende kloakkapacitet bedre, er Københavns strategi for tilpasning til mere nedbør at håndtere regnafstrømningen lokalt, dvs. ved at lade regnen fra en del af byens tage og veje løbe ud i byens grønne områder, hvorfra det kan sive ned i jorden eller fordampe. Det anbefales at tænke denne indsats sammen med vandingen af byens grønne struktur. Kun når planternes rødder har adgang til vand fungerer de temperaturregulerende. I tørke lukkes bladernes spalteåbninger, og der er alene en evt. skyggeeffekt tilbage. Omdrejningspunktet for at koble vanding af byens grønne struktur til afvandingen af byens hårde overflader vil være etableringen af nogle gode fordelings- og magasineringsystemer.

### **Brug UHI-målingerne til at lave lokale strategier for begrønning**

Ved hjælp af overfladetemperaturkortene kan de varmeste bydele udpeges, og inden for bydelen kan de varmeste områder udpeges. Det anbefales at tage udgangspunkt i de udarbejdede bydelskort (Bilag 2) for overfladetemperaturer, når der skal laves en ny lokalplan eller anden indsats, og at bruge kortene til at identificere de områder, der har størst behov for at blive begrønnet.



## Referencer

- Anon. 2008. Klimawandel und Gesundheit. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau.
- Arnfield,A.J. 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23:1-26.
- Baumüller, J., Hoffman, U., and Reuter, U. Climate Booklet for Urban Development - Städtebauliche Klimafibel. 2008. Stuttgart, Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg. 25-5-2010.
- Buyantuyev, A. and Wu, J. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology* . 2009.
- Cappelen, J. (ed. 2010. DMI Daily Climate Data Collection 1873-2009, Denmark, The Faroe Islands and Greenland - including Air Pressure Observations 1874-2009 (WASA Data Sets). Technical Report No. 10-06, 2010.
- Carlson, T.N. & Ripley, D.A. 1997. On the Relation between NDVI, Fractional, Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, vol 62, 1997.
- Champiat,C. 2009. Heat island analysis to reduce the public health impact of heat waves. *Environnement, Risques et Sante* 8:399-411.
- Georgi,N.J., andK.Zafiriadis. 2006. The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Urban Ecosystems* 9:195-209.
- Gill, S.E. (2006). Climate Change and Urban Greenspace. Unpublished PhD- thesis, School of Environment and Development, University of Manchester
- Gill,S.E., J.F.Handley, A.R.Ennos, and S.Pauleit. 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment* 33:115-133.
- Golden,J.S., D.Hartz, A.Brazel, G.Luber, and P.Phelan. 2008. A biometeorology study of climate and heat-related morbidity in Phoenix from 2001 to 2006. *International Journal of Biometeorology* 52:471-480.
- Hamada,S., andT.Ohta. 2010. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening* 9:15-24.
- Hardin,P.J., andR.R.Jensen. 2007. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry & Urban Greening* 6:63-72.

- Höppe,P. 1999. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43:71-75.
- Jendritzky,G., and R.de Dear. 2009. Adaptation and Thermal Environment. p. 9-32. *In* K.L.Ebi, I. Burton, and G.R. McGregor (ed.) *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*. Springer.
- Kuttler,W. 2004. Urban climate. Part 2: Main features and effects. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 16:263-274.
- Leuzinger,S., R.Vogt, and C.Körner. 2010. Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:56-62.
- Luber,G., andM.McGeehin. 2008. Climate Change and Extreme Heat Events. *American Journal of Preventive Medicine* 35:429-435.
- Matzarakis,A. 2008. Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen. *Proc. Osnabrücker Baumpflegetage 2008*. Osnabrück. 24 pp.
- Mayer,H., S.Kuppe, J.Holst, F.Imbery, and A.Matzarakis. 2009. *Proc. 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology*.
- Nichol, J. 2005. Remote Sensing of Urban Heat Islands by Day and Night Remote Sensing of Environment, vol 71, 2005.
- Oke,T.R. 1982. The energetic basis of the urban heat island (Symons Memorial Lecture, 20 May 1980). *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society* 108:1-24.
- Patz,J.A., D.Campbell-Lendrum, T.Holloway, and J.A.Foley. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature* 438:310-317.
- Rune, F., and Hels, T. 2004. Udvikling af bynaturindex (BNI) - Naturvurdering i Københavns Kommune. *Park & Landskabsserien*, nr. 37, 2004.
- Rizwan,A.M., L.Y.C.Dennis, and C.Liu. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20:120-128.
- Sailor,D.J. 2002. Urban Heat Island: Opportunities and challenges for mitigation and adaptation. *Orlando-North American Heat Island Summit*, Portland State University.
- SoU (Swedish Commission on Climate and Vulnerability) (2007). *Sweden facing climate change – threats and opportunities*. Swedish Government Official Reports. SOU 2007:60, Stockholm.
- Stülpnagel,A. 1987. Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin-West. TU Berlin

- Svensson, M.K., and I. Eliasson. 2002. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning* 61:37-54.
- Walz, A., and W.H. Hwang. 2007. Large trees as a barrier between solar radiation and sealed surfaces: their capacity to ameliorate urban heat if planted strategically to shade pavement. *Seventh Symposium on the Urban Environment*. San Diego, California, USA.
- Wan, Z. 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3.
- WHO. 2009. Improving public health responses to extreme weather/heat-waves -- EUROHeat. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Zouli, I., M. Santamouris, and A. Dimoudi. 2009. Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment* 156:275-292.

## Bilag 1: Satellitdata og deres bearbejdning (processering)

### Landsat data

Landsatdata rekvireret til projektet er listet i Tabel 1. Udvælgelsen af data var baseret på et ønske om at kunne analysere inter- såvel som intra-årslige variationer. Derudover har skydække også spillet en central rolle i data udvælgelsen idet det selvsagt har været ønsket at minimere indflydelsen fra skyer. Faktisk betyder skydækket at man ikke kan regne med mere end 3 til 4 brugbare Landsat-optagelser henover en sommer.

Tabel 1. Årstal og dato for Landsat data rekvireret til dette projekt.

Årstal	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4
1986	26. maj	11. juni	27. juni	-
2006	2. juni	18. juni	20. juli	22. sep.

Præ-processering af Landsat-data er nødvendig inden der kan foretages egentlige fortolkninger og analyser, da det bl.a. skal sikres, at data er både geometrisk og radiometrisk standardiseret. For at kunne anvende satellitbilledet i en geografisk sammenhæng skal det oprettes til et kendt koordinatsystem. Landsat-billeder leveres i UTM koordinater som såkaldte LIT produkter, dvs. produkter der er geometrisk oprettet via en række control punkter og en højdemodel. Yderligere geometrisk korrektion er derfor ikke nødvendig, men det er derimod radiometrisk kalibrering. Data, som hentes ned fra satellitten, ligger som heltalsværdier, der ikke umiddelbart har nogen fysisk værdi og som ikke kan sammenlignes på tværs af optagelsestidspunkter. Ved kalibrering kan disse "Digital Number" (DN)-værdier dog omregnes til radians ( $W/m^2$ ), som så igen kan anvendes til beregninger af sammenlignelige parametre såsom refleksion og temperatur, som igen er udgangspunkt for udregningen af en række afledte produkter.

### Overfladetemperatur

Det første skridt i bestemmelse af overfladetemperatur er at konvertere DN værdier til radians:

$$\text{Radians} = \alpha * \text{DN} + \beta$$

Og hvor  $\alpha$  og  $\beta$  er gain/bias koefficienter der distribueres sammen satellitbillederne. Efter radians-udregning bestemmes den såkaldte "brightness"-temperatur,  $T$ , dvs. et temperatur-mål hvor overfladens emissivitet ( $\epsilon$ ) formodes at være konstant ( $\epsilon = 1$ ):

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

hvor,

T = Brightnesstemperatur (Kelvin)

K2 = Kalibreringskonstant (= 607.76 W/m<sup>2</sup>)

K1 = Kalibreringskonstant (= 1260.56 Kelvin)

L = Spectral radiance (W/m<sup>2</sup>)

Herefter foretages en emissivitetskorrektion, der tager højde for at forskellige overflader har forskellig varmeudstrålingsevne, jf. emissivitet. Denne korrektion er vigtig, da overflader med umiddelbart samme "brightness"-temperatur godt kan have forskellig overfladetemperatur, fordi overfladerne har forskellig emissivitet. Først kan foretages en emissivitetskorrektion skal overfladen derfor først kategoriseres i emissivitets-klasser. Her er de vigtigste vegetation, vand og vegetationsløse overflader. I en efterfølgende udregning bestemmes overfladetemperaturen,  $T_{\text{overflade}}$ , så ud fra følgende formel:

$$T_{\text{overflade}} = T / \epsilon_i^{0.25}$$

hvor,  $\epsilon$  er emissiviteten og  $i$  er emissivitets-klasserne dvs. vegetation ( $\epsilon = 0,96$ ), vegetationsløse overflader ( $\epsilon = 0,92$ ) og vand ( $\epsilon = 0,99$ ) (Nichol, 2005). Endelig kan der omregnes til grader celsius ved at fratække 273,15. Det er vist, at ændring i overfladetemperaturen på ned til 0,5 °C er påviselige med Landsat satelliten.

### Reflektans

Konvertering fra radians, jf. ovenfor, til refleksion sker via følgende formel:

$$\rho = \frac{\pi * d^2 * L_\lambda}{E_{\text{sun}\lambda} * \cos(z)}$$

hvor,

$d$  = Afstanden mellem Jorden og Solen

$E_{\text{sun}\lambda}$  = Ydre atmosfærisk solar spektral irradians (W/m<sup>2</sup>)

$z$  = solar zenith vinkel (i grader)

Reflektansen beregnes for hvert af Landsatsatellitens 5 bånd placeret i det kortbølgede område (< 3  $\mu\text{m}$ ). Resultatet er en værdi mellem 0 og 1, der angiver overfladens refleksion i et bestemt strålingsinterval med 0 svarende til ingen refleksion og 1 svarende til 100 % refleksion.

## **MODIS data**

Daglige MODIS-data for månederne maj til oktober og i perioden 2003 til 2009 blev hentet ned fra NASA's Warehouse Inventory Search Tool (WIST). Data leveres som emissivitetskorrigeret overfladetemperatur og behøver således ikke at gennemgå en radiometrisk kalibrering. Derimod er der behov for en geometrisk transformation fra det globale MODIS Sinusoidal Grid til lokale UTM koordinater (zone 33N, WGS84).



---

**Bilag 2: Bydelskort i A3-format (leveres elektronisk som pdf)**