

Stadsklimatet

Åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden

SOFIA THORSSON

FOI
GÖTEBORGS UNIVERSITET



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se



GÖTEBORGS UNIVERSITET

Göteborgs universitet
Box 100
405 30 Göteborg

Telefon: 031-786 00 00
Fax: 031-786 10 64

www.gu.se/

FOI-R--3415--SE
ISSN 1650-1942

Mars 2012

Sofia Thorsson

Stadsklimatet

Åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden

Titel	Stadsklimatet - åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden
Title	The urban climate - measures to reduce the temperature in urban areas
Rapportnr/Report no	FOI-R--3415--SE
Månad/Month	Mars
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	43 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Naturvårdsverket
Projektnr/Project no	B10021
Godkänd av/Approved by	Maria Lignell Jakobsson
Ansvarig avdelning	Försvarsanalys

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Bebyggda områden är generellt sett varmare än obebyggda områden. Dessa lokala skillnader i temperatur beror främst på byggnadsmaterialens förmåga att absorbera och lagra värme samt hur höga husen är och hur tätt de står. Andra viktiga faktorer är andelen hårdgjorda ytor (dvs. gator, trottoarer, parkeringsplatser och tak) samt hur mycket värme och luftföroreningar som släpps ut i staden. Under dagen är skillnaderna i lufttemperatur relativt små mellan staden och dess omgivning samt mellan olika typer av bebyggelse eller annan typ av markanvändning, men under klara och vindstilla nätter kan skillnaderna uppgå till flera grader.

De socioekonomiska och hälsomässiga effekterna av att staden är varmare än sin omgivning kan vara både positiva och negativa. Under vintern leder det urbana klimatet till mindre behov av uppvärmning i byggnader och underhåll av vägar och tak (dvs. snöskottning, saltning och sandning). Även köldstressen hos stadsbefolkningen minskar. På sommaren däremot leder det urbana klimatet till ett ökat kylbehov för byggnader och ökad värmestress hos invånarna i staden. Detta kylbehov ökar dessutom just nu, eftersom vi lever i en tid av föränderligt klimat med allt högre temperaturer och allt fler, längre och intensivare värmeböljor. Vi måste därför hitta effektiva sätt att sänka temperaturen och skapa skugga i bebyggda områden under perioder med höga temperaturer. Ett sådant sätt är att öka grönytefaktorn, med andra ord anlägga nya parker, gröna tak och fasader samt plantera träd. Ett annat sätt att sänka temperaturen är att använda högreflekterande ytor och material och på så sätt minska värmelagringen i mark och byggnader.

Rapporten, som bygger på en litteraturstudie, beskriver klimatförhållanden som är typiska för en stad och processerna bakom dessa förhållanden. Den lyfter också fram klimatförhållandenas socioekonomiska och hälsomässiga konsekvenser och ger konkreta förslag på vad man kan göra för att sänka temperaturen i en stad.

Nyckelord: urban värmeö, socioekonomiska och hälsomässiga effekter, åtgärdsförslag

Summary

Urban areas are generally warmer than non-built-up areas. These local differences in temperature are mainly determined by the building materials' ability to absorb and store heat and how high and close together the buildings are. Other important determinants are the amount of impermeable surfaces (i.e. roads, sidewalks, parking lots and roofs) and the quantities of anthropogenic heat and air pollution released. During the day, differences in air temperature are relatively small, but on clear, calm nights temperature differences of up to several degrees may occur between urban and rural areas, as well as between different built-up areas/land uses.

The socio-economic and health impacts of urban climate conditions can be both positive and negative. In winter, the urban climate conditions decrease heating demand in buildings, maintenance of roads and roofs (i.e. ploughing, salting and sanding) and cold stress. However, in summer the urban climate conditions increase cooling demand in buildings and heat stress. In an era of changeable climate, with higher temperatures and more frequent, longer and more intense heat waves, there is a growing need to cool our cities. One effective measure to reduce temperature and create shade during long hot periods is to increase the amount of vegetation, i.e. construct parks, green roofs and facades, and plant trees. Another measure to reduce the temperature is to use highly reflective surfaces and materials and by doing so decrease the heat stored in buildings and surfaces.

This report, which is based on a literature review, describes the climate conditions typical of a city and the processes behind them, their socio-economic and health impacts, and a number of different measures to reduce the temperature in a city.

Keywords: urban heat island, socio-economic and health impacts, action proposals

Förord

Denna rapport har tagits fram inom ramen för forskningsprogrammet Climatools. Programmet har som syfte att utveckla en uppsättning verktyg som underlättar för samhällsplanerare och beslutsfattare att anpassa samhället till konsekvenserna av ett förändrat klimat. Climatools finansieras av Naturvårdsverket och är ett forskningssamarbete mellan Totalförsvarets forskningsinstitut, Kungliga Tekniska högskolan, Uppsala universitet och Umeå universitet. Syftet med rapporten är att beskriva klimatförhållanden som är typiska för en stad och att ge exempel på åtgärder som kan sänka temperaturen i bebyggda områden under perioder med höga temperaturer.

Rapporten består av tre delar. Den första delen beskriver hur bebyggelsen modifierar temperatur-, fuktighets-, vind- och strålningsförhållandena i en stad. Syftet med denna del är att ge kunskap om och förståelse för hur mikro- och lokalklimatet varierar i en stad och hur processerna bakom denna variation ser ut. Den andra delen beskriver hur klimatet och vädret på en plats påverkar hur platsen används och upplevs samt hur människor mår då de befinner sig på platsen. Vidare diskuteras konsekvenser av att staden generellt sett är varmare än sin omgivning och vad det innebär för energiförbrukning samt för människors hälsa och välbefinnande. Denna del är tänkt att visa på kopplingen mellan klimatet, människan och samhället och belysa vikten av att man tar hänsyn till klimatet vid ny- och ombyggnation. I den tredje delen ges konkreta förslag på åtgärder som kan sänka temperaturen i bebyggda områden och därmed minska värmestressen hos människor och kylbehovet i städer under perioder av höga temperaturer.

Tyngdpunkten i rapportens samtliga delar ligger på Sverige. Rapporten baseras på aktuella forskningsresultat, främst vetenskapliga publikationer, och vänder sig till planerare på olika nivåer som arbetar med att vidta åtgärder för att minska de negativa effekterna av värmeböljor.

Rapporten har sammanställts av docent Sofia Thorsson, Stadsklimatgruppen på Institutionen för geovetenskaper vid Göteborgs Universitet, i samråd med docent Björn Holmer, dr Jenny Linden och dr Fredrik Lindberg.

Stockholm, mars 2012

Annika Carlsson-Kanyama
Programchef Climatools
FOI

Innehållsförteckning

Inledning	7
1 Stadsklimat	9
1.1 Det urbana gränsskiktet	9
1.2 Energibalansen i ett urbant område.....	9
1.3 Temperatur i bebyggelse	11
1.4 Fuktighet i bebyggelse	20
1.5 Vind i bebyggelse.....	22
2 Klimat och människor i bebyggda områden	24
2.1 Termisk komfort	24
2.2 Väder och utomhusaktivitet.....	25
2.3 Väder och platsupplevelse	25
2.4 Väder och känslor	26
2.5 Väder och hälsa	26
2.6 Socioekonomiska och hälsomässiga konsekvenser av det urbana klimatet.....	27
3 Åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden	29
3.1 Temperatursänkande åtgärder	29
3.2 Andra positiva effekter	31
3.3 Konflikter och dilemman.....	31
Slutord	32
Bilagor	33
B1 Olika bebyggelsers potential att utveckla en urban värmeö	33
B2 Strategier och åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden.	34
Referenser	35

Inledning

Vi lever i en tid av föränderligt klimat. Därför ökar vårt behov av att skapa hållbara städer som kan absorbera och minska effekterna av klimatrelaterade risker, såsom extrema temperaturer. Det är dessa förutsättningar som ligger till grund för den här rapporten. Rapporten beskriver hur bebyggelsen ger upphov till skillnader i temperatur och hur man med hjälp av vegetation, högre reflekterande ytor och material samt bebyggelsegeometri (dvs. höjd, avstånd och riktning på byggnaderna) kan sänka temperaturen och förbättra komforten i bebyggda områden, såväl utomhus som inomhus, under perioder av höga temperaturer. Att i stället installera luftkonditioneringssystem skulle innebära en ökad efterfrågan på el och därmed ökade utsläpp av växthusgaser och värme i staden.

Eftersom temperaturen på en plats, liksom hur vi upplever vädret, påverkas av strålnings-, vind- och fuktighetsförhållandena är det viktigt att ha kunskap om och förståelse för alla meteorologiska parametrar när man planerar ett område. Genom att ta hänsyn till klimatet tidigt i planeringsprocessen kan vi inte bara mildra de negativa effekterna av en klimatförändring utan också ta tillvara på klimatets möjligheter och på så sätt skapa attraktiva, säkra och hållbara städer.

1 Stadsklimat

Klimatet i en stad beror huvudsakligen på vilken klimatzon staden ligger i, rådande regionala väderförhållanden, topografin, höjden över havet samt avståndet till vatten. Den bebyggda miljön, såsom byggnader och hårdgjorda ytor (det vill säga vägar, parkeringsplatser, trottoarer etc.) modifierar dock strålnings-, temperatur-, fukt- och vindförhållandena nära marken i en stad, de s.k. marknära förhållandena. Följden blir ett nytt mikro- och lokalklimat. Även om varje stad är unik, är staden generellt sett varmare och mindre blåsig jämfört med det omgivande landskapet. På dagen är staden också mindre fuktig än sin omgivning.

1.1 Det urbana gränsskiktet

När en luftmassa rör sig över en yta sker det ett utbyte av värme och fuktighet mellan luften och den underliggande ytan. I en stad får detta till följd att det marknära luftlagret (det s.k. gränsskiktet) blir varmare och mer turbulent. Den här urbana effekten kan observeras flera kilometer utanför staden (i vindriktningen).

Höjden på det urbana gränsskiktet varierar under dygnet. Mitt på dagen kan det urbana gränsskiktet vara ett par kilometer. På natten är den vertikala utsträckningen betydligt mindre, 60–300 meter, till följd av att luften stabiliseras nattetid. Den vertikala utsträckningen beror också på intensiteten i den urbana värmeö, dvs. hur mycket varmare staden är jämfört med dess omgivning, samt på byggnadernas höjd och på avståndet mellan dem (med andra ord markens råhet). Det är viktigt med kunskap om det urbana gränsskiktets egenskaper och vertikala utsträckning, eftersom det bland annat avgör volymen luft genom vilken föroreningar kan spridas i en stad. Den lägre delen av det urbana gränsskiktet, dvs. området från marken upp till hustaken, kännetecknas av stora rumsliga variationer i temperatur, vindhastighet och vindriktning. Det är variationer som påverkas av de enskilda byggnadernas höjd, avstånd och riktning samt yt- och materialegenskaper.

1.2 Energibalansen i ett urbant område

Energiutbytet (energibalansen) mellan luft och mark bestämmer klimatet på en plats. Hur det sker beror på mängden inkommande energi, markens egenskaper och atmosfärens förmåga att transportera värme. Enligt Oke (1987) kan energibalansen för ett urbant område uttryckas som

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

där Q^* är nettostrålning, Q_F det antropogena värmeflödet, Q_H det sensibla värmeflödet, Q_E det latent värmeflödet, ΔQ_S värmelagringen och ΔQ_A nettoadvektionen, dvs. det horisontella värmeflödet in och ut ur en stad.

Nettostrålningen (Q^*) beskriver summan av inkommande och utgående kortvågig och långvågig strålning. *Inkommande kortvågig strålning* beror på solhöjden, solvinkeln och molnmängd och når sitt potentiella maximum mitt på dagen. *Utgående (reflekterad) kortvågig strålning* beror på mängden inkommande strålning och ytans förmåga att reflektera kortvågig strålning, dvs. ytans albedo. *Inkommande långvågig strålning* beror på atmosfärens temperatur och förmåga att ge ifrån sig värmestrålning, dvs. dess emissivitet. Under klara, molnfria väderförhållanden är den inkommande långvågiga strålningen mer eller mindre konstant under dagen. *Utgående långvågig strålning* beror på ytans temperatur och emissivitet. Den utgående långvågiga strålningen är både större i storlek och mer varierande än den inkommande långvågiga strålningen. På natten, då den kortvågiga strålningen är noll, är nettostrålningen summan av den inkommande och den utgående långvågiga strålningen. Som regel är nettostrålningen högre i staden jämfört med det omgivande landskapet på grund av byggnadernas förmåga att lagra värme. Till den högre nettostrålningen bidrar också det generellt sett lägre albedot, den låga andelen vegetation samt det antropogena värmeflödet.

Antropogent värmeflöde (Q_F) är den energi (med andra ord värme och vattenånga) som släpps ut i atmosfären av människor (genom deras metabolism) och genom mänsklig aktivitet (vid förbränning, uppvärmning, kylning, tillverkning, transport etc.). Det antropogena värmeflödet varierar stort mellan och inom städer, liksom med tiden på året och rådande väder. I små och medelstora städer utgör det antropogena värmeflödet vanligtvis 5–30 % av nettostrålningen under sommaren (Oke 1988). Men det kan vara betydligt större i centrala delar av stora städer i kalla eller varma klimat, eftersom dessa städer vanligen kräver betydande uppvärmning vintertid eller kylning sommardag.

Sensibelt värmeflöde (Q_H) är det energiutbyte som resulterar i en temperaturförändring. Det sensibla värmeflödet sker genom konduktion (värmeledning genom ett material) och konvektion (själva det varma ämnet förflyttar sig). I staden utgör det sensibla värmeflödet den största delen av energibalansen under dygnet, dvs. ca 40 % (Grimmond & Oke 1995). I tätbebyggda områden med lite vegetation utgör det sensibla värmeflödet en ännu större del.

Latent värmeflödet (Q_E) är den värme som ett ämne absorberar eller avger då det ändrar fas (t.ex. från fast till flytande eller till gas). Samma energi som krävs för att ett ämne ska gå från ett lägre till ett högre tillstånd (fast $\rightarrow$ flytande $\rightarrow$ gas) frigörs när ett ämne går från ett högre till ett lägre tillstånd (gas $\rightarrow$ flytande $\rightarrow$ fast). Atmosfärens cirkulation transporterar latent värme vertikalt och horisontellt från varmare till kallare platser, där energin frigörs genom

kondensation. Det latent värmeflödet, som mer eller mindre står i proportion till evapotranspirationen, dvs. det sammanlagda flödet av vattenånga från våta ytor (blad, snö, sjöar, vatten drag), mark och via växternas klyvöppningar, är relativt litet i tätbebyggda områden med begränsad vegetation (Spronken-Smith 2002). I staden utgör det latent värmeflödet ca 30 % av det totala värmeflödet (Grimmond & Oke 1995). På landsbygden däremot utgör det latent värmeflödet den största delen av energibalansen. Under perioder med lite nederbörd minskar andelen latent värmeflöde i såväl bebyggda som obebyggda områden.

Värmelagring (ΔQ_s) är all den värme som lagras i staden, dvs. i byggnader, mark, luft och vegetation. I allmänhet ökar värmelagringen ju mer tätbebyggt ett område är (Coutts m.fl. 2007). Under dagen utgör värmelagringen i en stad ca 30 % av energibalansen (Grimmond & Oke 1995). I tätbebyggda områden med lite vegetation kan andelen värmelagring vara ännu större, runt 50 % eller mer (Oke m.fl. 1999). I mindre tätbebyggda områden kan ett lågt albedo leda till en stor värmelagring (Taha 1997, Coutts m.fl. 2007).

Nettoadvektion (ΔQ_A) är det horisontella energiflödet (av värme och vattenånga) in i och ut ur en stad. Under dagen, då skillnaderna i lufttemperaturer mellan stad och landsbygd vanligtvis är små, är det horisontella värmeflödet in i och ut ur en stad litet. Detta gäller även inom och mellan områden med samma markanvändning och samma typ av mänsklig aktivitet. Däremot kan det horisontella värmeflödet nattetid vara av betydande storlek, speciellt i gränsen mellan stad och landsbygd eller i områden där markanvändningen varierar.

Energi-balansen, liksom storleken på värmeflödena varierar från dag till dag beroende på solinstrålning, rådande väderförhållanden och tillgång på vatten (Coutts m.fl. 2007).

1.3 Temperatur i bebyggelse

Den urbana värmeön

Den urbana värmeöeffekten är ett av de mest väldokumenterade exemplen på hur människan påverkar lokal- och mikroklimatet och beskriver fenomenet när staden är varmare än det omgivande landskapet. Det är främst ett nattligt fenomen, som uppstår på grund av att staden kyls av långsammare än det omgivande landskapet under sen eftermiddag och kväll. Tidpunkten för den maximala värmeöeffekten beror på stadens och landskapets egenskaper, årstiden och rådande väderförhållanden, men den nås i allmänhet 3 till 5 timmar efter solnedgången. De temperaturskillnader som uppkommer vid solnedgången bevaras oftast fram till soluppgången (Holmer m.fl. 2007). Under klara och vindstilla nätter kan denna temperaturskillnad uppgå till över 10 °C i stora städer

(Oke 1987), medan intensiteten hos värmeöns är mindre i små och medelstora städer (Oke 1982).

De högsta lufttemperaturerna finner man i de centrala, tätbebyggda delarna av staden. Rent generellt avtar värmeöns långsamt i intensitet ju längre ut från centrum man kommer. Parker, vattendrag och öppna områden bildar öar av kalluft i den annars så homogena värmeöns. Dagtid sträcker sig den urbana värmeöns någon kilometer upp i luften till följd av vertikal omblandning (Atkinsson 2003). Nattetid är den vertikala utbredningen betydligt mindre (60–300 meter).

Faktorer som ger upphov till lokala temperaturskillnader

Lokala skillnader i temperatur, såsom de inom en stad samt de mellan staden och dess omgivning, bestäms huvudsakligen av skillnader i bebyggelsegeometri samt yt- och materialegenskaper (Oke m.fl. 1991). Andra viktiga faktorer som påverkar temperaturen är andelen hårdgjorda ytor och mängden vegetation samt hur mycket värme och luftföroreningar som släpps ut i staden. Också karaktären på det omgivande landskapet är viktig, eftersom den urbana värmeöns definieras som skillnaden i temperatur mellan staden och dess omgivningar.

Bebyggelsegeometri

Bebyggelsegeometrin kan beskrivas som höjden, avståndet och riktningen på byggnaderna. Den är en av de viktigaste faktorerna som påverkar uppkomsten av den urbana värmeöns och dess storlek, samt de temperaturskillnader som uppkommer inom en stad. Det finns flera olika mått för att beskriva bebyggelsegeometrin. Två av de vanligaste måtten för att beskriva bebyggelsegeometrin är himmelsfaktorn, dvs. andelen himmel som kan ses från en punkt i landskapet och dess betydelse för strålningen, samt höjd- till breddförhållandet på husen och gatorna (H/W). Himmelsfaktorn, eller sky-view-faktorn (SVF) som den också ibland kallas, kan härledas från sfäriska (180 graders) foton (Steyn 1980) eller genom digitala 3D-modeller (Ratti 2001, Unger 2006, Lindberg & Grimmond 2012).

Under dagen avgör bebyggelsegeometrin hur mycket solinstrålning som når marken och fasaderna, och den påverkar därmed uppvärmningen av stadens alla ytor. I genomsnitt är yttemperaturen i en stad 10 till 15 °C varmare jämfört med omgivande landskap (Roth m.fl. 1989, Voogt & Oke 2003). Skillnaderna i temperatur varierar dock med säsongen, vädret (och därmed solintensiteten) och bebyggelsens yt- och materialegenskaper. Under varma och klara somardagar kan torra och solexponerade urbana ytor, såsom tak, vägar och trottoarer, vara 30 till 50 °C varmare än fuktiga och skuggade ytor utanför staden (Berdahl & Bretz 1997).

När marken värms upp leder detta till att den marknära lufttemperaturen ökar. Till skillnad från ytttemperaturen är skillnaderna i marknära lufttemperatur inom en stad och mellan staden och dess omgivning små eller obefintliga dagtid (Thorsson m.fl. 2007, Emmanuel & Fernando 2007, Mayer m.fl. 2008). Och trots att stadens ytor kan vara mycket varma dagtid, leder luftens omblandning (vertikalt och horisontellt) till endast en liten ökning av lufttemperaturen. Även om städer i allmänhet är något varmare än sin omgivning under dagen, kan man konstatera att tätbebyggda delar av staden kan vara svalare än mindre tätbebyggda eller obebyggda områden, eftersom byggnaderna skuggar de omgivande ytorna (Rotach m.fl. 2005, Erell & Williamson 2007). Man bör också komma ihåg att skuggmönstret i en stad uppvisar stora variationer under dagen, liksom under året (Lindberg & Grimmond 2011a). Då solen står lågt under tidiga morgnar och sena kvällar på hösten, vintern och våren, skapar byggnaderna långa skuggor. Ju tätare och högre bebyggelse desto mer skuggas omgivande ytor.

Under soliga dagar är orienteringen, riktningen, på byggnader och gator också av stor betydelse. Djupa gatukanjoner i nord-sydlig riktning solbelyses endast en kort tid mitt på dagen när solen står som högst. I avsaknad av advektion (dvs. horisontell förflyttelse av luft) och turbulens kan man därför förvänta sig högre yt- och lufttemperaturer i dessa gatukanjoner mitt på dagen (Erell & Williamson 2007). Under tidig morgon och sen eftermiddag är situationen dock den omvända. Jämfört med dessa gatukanjoner i nord-sydlig riktning uppvisar gatukanjoner i öst-västlig riktning tvärtom större rumsliga skillnader i yt- och lufttemperatur, till följd av det skuggmönster som de omgivande byggnaderna skapar (Holst & Mayer 2011).

Strålningstemperaturen kan beskrivas som summan av den kortvågiga och den långvågiga strålningen från omgivningen som en människa exponeras för. Den är en av de viktigaste meteorologiska parametrarna som påverkar energibalansen och den termiska komforten hos oss människor under varma och soliga dagar (Mayer & Höppe 1987). Till skillnad från lufttemperaturen är strålningstemperaturen direkt kopplad till bebyggelsegeometrin, eftersom bebyggelsens utformning bestämmer mängden solinstrålning som når marken och fasaderna, liksom mängden reflekterad kortvågig och långvågig strålning samt emitterad långvågig strålning (Emmanuel & Fernando, 2007, Thorsson m.fl. 2011). Skillnader i bebyggelsegeometrin ger därför upphov till stora skillnader i strålningstemperaturen inom en stad, speciellt under klara somrardagar. Då kan skillnaden uppgå till 20 °C mellan en solbelyst öppen plats och en närliggande gatukanjon i skugga (Thorsson m.fl. 2011). Genom en tät bebyggelsestruktur kan man således skapa mer skugga och därmed minska värmestressen dagtid, i såväl varma som kalla klimat (Ali-Toudert & Mayer 2007, Johansson 2006, Emmanuel & Fernando 2007, Mayer m.fl. 2008, Thorsson m.fl. 2011). En solbelyst gata kan dock vara upp emot 9 °C varmare än en närliggande solbelyst öppen plats, till följd av att omgivande fasader reflekterar kortvågig och långvågig strålning.

Under natten reglerar bebyggelsegeometrin den utåtgående långvågiga strålningen liksom det sensibla värmeflödet. Ju tätare bebyggelsen är desto långsammare går avkylningen under sen eftermiddag och kväll (Oke 1981, Yamashita m.fl. 1986, Atkinson 2003, Holmer m.fl. 2007). Skillnader i byggnadsgeometri i en stad kan ge upphov till nästan lika stora temperaturskillnader inom staden som mellan staden och dess omgivning (Eliasson 1996, Thorsson & Eliasson 2003, Unger 2004, Holmer m.fl. 2007, Lindberg 2007). Ett par timmar efter solnedgången avtar dock avkylningen, och oberoende av hur byggnadsgeometri ser ut kyls alla platser lika snabbt (Holmer m.fl. 2007). Holmer m.fl. (2007) förklarar detta med att det bildas en inversion¹ över staden i takt med att kvällen fortskrider, förutsatt att väderförhållandena är lugna och klara. Denna inversion styr avkylningen vid marken. Annorlunda uttryckt betyder det att det är luften och inte markens egenskaper som styr avkylningen under senare delen av natten. Det innebär att de temperaturskillnader som uppkommer vid solnedgången bevaras fram till soluppgången. Som ett resultat av den långsammare avkylningen vid solnedgången ger en tätbebyggd stad därför upphov till en större nattlig urban värmeö än en mindre tätbebyggd stad (Oke 1981, Park 1986, Balzs m.fl. 2009).

Yt- och materialegenskaper

Betong, tegel och asfalt är vanliga byggmaterial i städer. Jämfört med naturliga material kan dessa material absorbera, lagra och avge mer värme, vilket leder till högre yt- och lufttemperaturer i staden. Valet av byggnadsmaterial har således en direkt effekt på lokal- och mikroklimatet liksom på inomhusklimatet. Tre av de viktigaste yt- och materialegenskaper som skapar temperaturskillnader är ytans eller materialets albedo, emissivitet och värmekapacitet.

Albedo (α) beskriver ytans eller materialets förmåga att reflektera kortvågig strålning. Albedot är dimensionslöst och anges på en skala mellan 0 och 1, där 1 betyder att all kortvågig strålning reflekteras och 0 att all kortvågig strålning absorberas. Detta innebär att en yta med högt albedo reflekterar större delen av den inkommande strålningen, medan en yta med lågt albedo absorberar större delen av den inkommande strålningen. I allmänhet kan man säga att ju mörkare en yta eller ett material är, desto lägre är albedot. Skillnaden i ytemperatur mellan hög- och lågreflekterande material är betydande, framför allt under klara och vindstilla sommar dagar. Vid dessa tillfällen kan en yta med ett albedo på 0,7 vara upp till 45 °C kallare än en yta med ett albedo på 0,08 (Taha m.fl. 1992). Albedot för städer som helhet varierar vanligtvis mellan 0,09–0,23, med ett medel runt 0,15. Det är något lägre (<0,05) än de flesta naturliga ytor (Oke 1988).

¹ Temperaturen ökar med höjden vilket innebär att luften är extremt stabilt skiktad.

Man kan minska uppvärmningen av mark, byggnader och luft genom att använda material eller ytbeläggning med högt albedo i stället för lågt (Akbari & Taha, 1992, Rosenfelt m.fl. 1997, Akbari m.fl. 1997, Taha m.fl. 1999, Synnefaa m.fl. 2007). Modellberäkningar har visat att man kan minska den maximala lufttemperaturen i tätbebyggda områden med 2 °C under varma och soliga dagar genom att öka albedot med 30 % (Taha 1997). Om man genomgående använder ett högt albedo i en stad, kan man på så vis minska den urbana värmeöns och därmed behovet av att kyla ner byggnader sommartid (Taha 1997, Akbari m.fl. 2001, Atkinson 2003, Silva m.fl. 2010).

I takt med att materialen och ytbeläggningen utsätts för vittring och nedsmutsning förändras albedot. Exempelvis ökar asfaltens förmåga att reflektera inkommande solinstrålning i takt med att bindemedlet i asfalten oxideras och att asfalten utsätts för slitage. Däremot tenderar reflektionsförmågan hos betong att minska i takt med ökad nedsmutsning.

Det finns många fördelar med att använda högreflekterande material och ytbeläggningar i städer, men detta kan också orsaka en del problem. Exempelvis kan högreflekterande ytor skapa visuellt obehag genom bländning (Compagnon & Goyette-Pernot 2004). Ljusa ytor blir också lätt smutsiga, varefter deras förmåga att reflektera strålning snabbt avtar. Det krävs därför ett kontinuerligt underhåll för att bevara ytornas förmåga att reflektera strålningen.

Emissivitet (ϵ) beskriver hur mycket av den långvågiga strålningen som frigörs från eller absorberas i materialet. Liksom albedot är emissiviteten dimensionslös och anges från 0 till 1. Emissiviteten definieras som kvoten mellan den långvågiga strålningsenergi som avges från ett visst material och den som avges från en svart kropp ($\epsilon = 1$) under samma förhållanden, dvs. vid samma temperatur. En yta med hög emissivitet är svalare än en yta med låg emissivitet när den utsätts för direkt solljus, eftersom den avger mer energi. Jämfört med naturliga material har urbana material som asfalt, tegel, betong, trä, glas och gips relativt låg emissivitet (ASHRAE 2009). Genom att använda byggnadsmaterial med hög emissivitet kan man därför minska den urbana värmeöeffekten (Oke m.fl. 1991, Atkinson 2003, Rotach m.fl. 2005, Silva m.fl. 2010).

Värmekapacitet (C) beskriver mängden värme som krävs för att höja temperaturen hos ett material. Värmekapaciteten ger således ett mått på materialets förmåga att lagra värme. I allmänhet har urbana material en högre värmekapacitet än naturliga material och kan därför tillfälligt lagra mer värme. Under natten frigörs den lagrade värmen, vilket leder till att avkylningen minskar.

Hårdgjorda ytor

Andelen hårdgjorda ytor i en stad, såsom gator, trottoarer, parkeringsplatser och tak är en annan viktig faktor som påverkar uppkomsten av den urbana värmeö

samt dess storlek (Balzs m.fl. 2009). En stor mängd hårdgjorda ytor innebär oftast en lägre andel gröna ytor, vilket leder till en förändrad energi- och vattenbalans.

Graden av permeabilitet (dvs. möjligheten för vatten att tränga igenom en yta eller ett material) påverkar ytavrinningen och därmed avdunstningen. Jämfört med en permeabel yta har hårdgjorda ytor en snabbare ytavrinning, vilket leder till en lägre avdunstning. Man kan beskriva avdunstningen som förlusten av vatten (i form av ånga) från en yta. Det är en energikrävande process, som kylvärmer ytan och luften som omger ytan. Samma mängd energi som absorberas vid avdunstning frigörs då vattenånga kondenserar. Men graden av avdunstning beror inte bara på ytan utan också på luftens temperatur, fuktighet och turbulens. Ju större skillnader det finns i temperatur och fuktighet mellan en yta och dess omgivande luftlager, och ju mer turbulent luften är, desto större och snabbare avdunstning. En stor andel hårdgjorda ytor leder alltså till lägre avdunstning, vilket i sin tur leder till ett minskat latent värmeflöde.

Vegetation

Vegetation minskar effektivt värmestressen hos människor i städer under perioder med höga temperaturer och klart väder (Picot 2004, Mayer m.fl. 2009, Bowler m.fl. 2010, Shashua-Bar m.fl. 2009). Detta beror framför allt på att träd och buskar skuggar omgivande ytor (som mark, fasader och tak), men också på att transpirationen från växterna sänker lufttemperaturen. Nedan följer en beskrivning av hur parker, bostadsnära skogar, gatuträd och mark-, fasad- och takvegetation påverkar temperatur-, och strålningsförhållandena i en stad.

Parker och bostadsnära skogar

Parker och bostadsnära skogar är i allmänhet svalare än den omgivande bebyggelsen, såväl dagtid som nattetid (Bowler m.fl. 2010). Temperaturskillnaderna är dock generellt sett något större under natten än på dagen. Under dagen är kyleffekten ett resultat av skuggningen och evapotranspirationen från träden (Spronken-Smith & Oke 1998, Potchter m.fl. 2006). Grönområden med många och stora träd och hög markfuktighet tenderar därför att vara svalare under dagen jämfört med öppna gräsbevuxna parker med låg markfuktighet. På natten kyls däremot parker med många stora träd långsammare, eftersom träden minskar den utgående långvågiga strålningen genom att blockera delar av himlen. Markfuktigheten är också viktig under natten, eftersom den påverkar markens förmåga att lagra värme. Hög markfuktighet innebär ökad värmekapacitet, vilket minskar avkylningen. Under varma dagar är detta speciellt tydligt. I områden där vegetationen är anpassad för torka och höga temperaturer kan effekten av vegetation dock vara omvänd, med liten effekt dagtid och en stark kylande effekt kvällstid (Lindén 2011).

Kyleffekten från parker och bostadsnära skog sträcker sig in i den omgivande bebyggelsen genom advektion av kall luft. Advektionen påverkas i sin tur av vindens hastighet och riktning (Upmanis & Chen 1999). Kyleffekten från grönområdena beror på områdets storlek, där stora grönområden är svalare och har större kyleffekt på den omgivande bebyggelsen än små grönområden (Barradas 1991, Upmanis m.fl. 1998, Chang m.fl. 2007). Studier har exempelvis visat att stora grönområden med många och stora träd kan vara 4–5 °C svalare än den omgivande bebyggelsen (Sham 1990, Saito m.fl. 1991, Ca m.fl. 1998, Upmanis m.fl. 1998). Man har också sett att kyleffekten från dessa grönområden kan sträcka sig upp till 1 km in i den omgivande bebyggelsen (Barradas 1991, Upmanis m.fl. 1998). Detta kan jämföras med kyleffekten från små grönområden (<200 m²), som ofta bara är någon grad kallare än sin omgivning och vars kyleffekt endast sträcker sig någon eller några 10-tals meter in i bebyggelsen (Saito m.fl. 1991, Upmanis m.fl. 1998).

Grönområdets förmåga att skapa skugga under soliga dagar är välkänd. Ändå finns det väldigt få studier som beskriver hur mycket solinstrålning som blockeras av ett trädbestand. Enligt de få studier som finns rapporterade i litteraturen varierar transmissiviteten, dvs. trädets förmåga att släppa igenom ljus, hos ett trädbestand bestående av blandad lövskog, från ca 43 % på vintern (då beståndet är avlövat) till ca 7 % på sommaren (då beståndet är lövat) (Lindberg & Grimmond, 2011b). Det betyder alltså att trädbeståndet ger upphov till betydande skugga såväl sommar som vinter. Skuggeffekten hos ett trädbestand beror på beståndets täthet, höjd, krontäthet, artsammansättning, vinkeln till solen samt tiden på året. Tiden på året påverkar främst lövskogars förmåga att ge skugga, eftersom lövträden tappar sina löv på vintern.

Gatuträd

Man har under de senaste åren uppmärksammat hur enskilda träd påverkar lokal- och mikroklimatet i en stad på grund av sin förmåga att effektivt skapa skugga, sänka lufttemperaturen och på så sätt minska värmestressen för människorna i tätbebyggda områden under perioder med höga temperaturer. Speciellt under klara dagar är skuggeffekten från enskilda träd betydande. När det gäller yttemperaturer kan ytor som skuggas av enskilda träd vara tiotals grader lägre än närliggande solbelysta ytor (Akbari m.fl. 1997, Shashua-Bar m.fl. 2009). Men jämför man gatuträdets inverkan på yttemperaturen med deras inverkan på lufttemperaturen, så är effekten begränsad och uppgår endast till någon grad (Mayer m.fl. 2009, Shashua-Bar m.fl. 2009). Däremot har de stor påverkan på strålningstemperaturen (Ali-Toudert & Mayer 2007, Lindberg & Grimmond 2011b). Studier har visat att strålningstemperaturen kan vara 30 °C lägre under ett träd jämfört med en närliggande solbelyst plats (Mayer m.fl. 2009). Detta motsvarar en minskning med 14 °C om man tar hänsyn till hur temperaturen upplevs.

Hur mycket gatuträd skuggar och kyler beror på hur tätt träden är planterade, trädart, storlek och form på trädet samt tid på året. När det gäller ett trädets förmåga att ge skugga varierar transmissiviteten hos olika typer av stadsträd (t.ex. björk, lind och kastanj) mellan 47 % och 55 % på vintern (då trädet är avlövad) och mellan 1 % och 5 % på sommaren (då trädet är lövad) (Larsson 2011, samt opublicerat resultat). Gatuträdens skugg- och kyleffekt beror även på omgivningens egenskaper, dvs. bebyggelsens geometri samt områdets yt- och materialegenskaper (Shashua-Bar m.fl. 2010).

För att ett träd ska ge maximal skugg- och kyleffekt är trädet beroende av god vattentillgång, god vattenkvalité, goda jordförhållanden och utrymme att växa. Om tillgången på vatten, näring eller utrymme är begränsat, når trädet inte sin maximala storlek, livslängden förkortas och det blir mer känsligt för sjukdomar, skadeinsekter, väder eller andra riskfaktorer (McPherson 1994).

Mark-, fasad- och takvegetation

I många städer använder man fasad- och takvegetation för att minska uppvärmningen av byggnader. Takvegetation har visat sig dämpa svängningar i ytemperaturen, förbättra inomhuskomforten och minska energiförbrukningen såväl sommartid som vintertid (Liu & Bas 2005, Fischetti 2008). Yt- och lufttemperaturen är oftast lägre över vegetationsytor jämfört med hårdgjorda ytor, vilket är en följd av evapotranspirationen (Shashua-Bar m.fl. 2009). Skugg- och kyleffekten av fasad- och takvegetation kan under varma och soliga somardagar uppgå till tiotals grader jämfört med ickebevuxna fasader och konventionella tak. Studier har bl.a. visat att fasadvegetation kan sänka ytemperaturen med upp till 20 °C på en fasad som är solbelyst (Sandifer & Givoni 2002). Däremot skiljer sig lufttemperaturen inte så mycket mellan en bevuxen och en ickebevuxen yta (Shashua-Bar m.fl. 2009). Kyleffekten av fasad- och takvegetation är större i städer som ligger i varma och torra klimat än i städer som ligger i varma och fuktiga klimat.

Den största skugg- och kyleffekten från vegetation får man genom att plantera vegetation i olika lager, dvs. genom att plantera en blandning av träd, buskar och markvegetation (Shashua-Bar m.fl. 2009). På detta sätt kan man minska lufttemperaturen dagtid med upp till 2 °C. Dessutom kan man öka kyleffekten från grönytor ytterligare genom konstbevattning (Spronken-Smith & Oke 1998).

Stadstorlek och invånarantal

Studier har visat att det finns ett samband mellan invånarantalet i en stad och den maximala intensiteten på den urbana värmeöken under natten; dvs. ju fler människor det bor inom ett område, desto större blir den urbana värmeöken. Enligt Oke (1973) kan sambandet mellan invånarantalet och den maximala urbana värmeöken för nord- och mellaneuropeiska städer beskrivas med

$$\Delta T_{u-r} = 2.01 \log P - 4.06$$

där ΔT_{u-r} är intensiteten på den urbana värmeön och P invånarantalet. För en stad med 100 000 invånare innebär det att den maximala värmeön kan uppgå till ca 6 °C, medan en stad med 1 miljon invånare kan utveckla en värmeö på ca 8 °C. Även små tätorter (<1 000 invånare) kan utveckla en värmeö (<2 °C).

Antropogen värme

Värme från människor, bilar, hus och industri bidrar också till den urbana värmeön. Mängden antropogen värme beror på typ och grad av aktivitet. Det betyder att ju fler människor det finns, ju fler energikrävande byggnader som uppförs och ju fler transporter som äger rum, desto mer värme släpps ut i staden. Det antropogena värmebidraget är också en funktion av latitud och säsong. I varma klimat eller under perioder med höga temperaturer ökar användandet av luftkonditionering, vilket i sin tur alstrar värme. Den värmen leder till en ökad utomhustemperatur och bidrar till värmeöeffekten. I kalla klimat leder den urbana värmeön däremot till ett minskat uppvärmningsbehov och därmed till minskad energianvändning.

Luftföroreningar

Förbränning leder till en ökad mängd partiklar och koldioxid etc. i luften, vilket påverkar strålningsförhållandena i en stad genom att

- i) minska den inkommande kortvågiga (sol) strålningen
- ii) öka den inkommande långvågiga (infraröda) strålningen
- iii) minska den utgående långvågiga (infraröda) strålningen.

Under natten leder de förändrade strålningsförhållandena i staden till en minskad avkylning. De förstärker därmed den urbana värmeöeffekten. Under dagen leder dock de högre yt- och lufttemperaturerna i staden till att tjockleken på det urbana gränsskiktet ökar, vilket innebär en större volym genom vilken föroreningar kan spridas. Därmed minskar koncentrationen av luftföroreningarna. Om strålningsförhållandena ändras kan det också leda till en förändring av lokala vindsystem, såsom landbris, sjöbris och omlandsbris nattetid, vilket påverkar hur luftföroreningarna transporteras och späds ut.

Vädrets påverkan på lokala temperaturskillnader

Klara och vindstilla väderförhållanden gynnar utvecklingen av stora nattliga temperaturskillnader inom staden och mellan staden och dess omgivning (Oke 1981, 1982, Eliasson 1990–91, 1996, Thorsson & Eliasson 2003, Erell & Williamson 2007, Kuttler m.fl. 2007). En större vindhastighet ökar däremot omblandningen och det horisontella luftutbytet och jämnar därmed ut temperaturskillnaderna (Erell & Williamson 2007, Kuttler m.fl. 2007). Molnmängden och typen av moln påverkar förlusten av långvågig strålning. Ju molnigare det är och ju lägre och tjockare molnen är, desto effektivare är de på att minska den utgående långvågiga strålningen och därmed avkylningen. Luftfuktighet fungerar på samma sätt som moln, där hög luftfuktighet leder till minskade temperaturskillnader (Holmer & Eliasson 1999).

Den urbana värmeöns påverkan på lokala väderförhållanden

Den urbana värmeön påverkar också de lokala väderförhållandena. Exempelvis påverkar värmeön luftens cirkulation, stabilitet, turbulens och fuktighet, liksom dagutfällningen och förekomsten av dimma, nederbörd, snö och moln.

1.4 Fuktighet i bebyggelse

Det är viktigt med kunskap om hur luftfuktigheten varierar i urbana områden och vilka faktorer som påverkar den för att förstå hur den urbana värmeön bildas och hur detta påverkar förekomsten av dimma. Nedan följer en beskrivning av hur luftfuktigheten varierar inom en stad och mellan staden och dess omgivning, vilka faktorer som påverkar luftfuktigheten i en stad och fuktighetens betydelse för den urbana värmeön och förekomsten av dimma.

Rumsliga skillnader inom en stad och mellan staden och dess omgivning

I allmänhet är skillnaderna i luftfuktigheten små inom en stad liksom mellan staden och dess omgivning (Oke 1987, Kuttler m.fl. 2007, Shashua-Bar m.fl. 2009). Bebyggda områden är generellt något mindre fuktiga än det omgivande landskapet under dagen (Chandler 1967, Landsberg 1981, Oke 1987, Fortuniak m.fl. 2006, Kuttler m.fl. 2007). Under natten kan dock bebyggda områden vara något fuktigare än det omgivande landskapet (Ackerman, 1987, Oke 1987, Holmer & Eliasson 1999, Fortuniak m.fl. 2006, Kuttler m.fl. 2007).

I så väl bebyggda som obebyggda områden finner man de högsta koncentrationerna av fuktighet under morgonen och fram till mitt på dagen och de lägsta under sen eftermiddag (Fortuniak m.fl. 2006, Kuttler m.fl. 2007).

Faktorer som ger upphov till lokala skillnader i luftfuktighet

Under dagen uppkommer lokala skillnader i fuktighet i en stad. Det beror främst på skillnader i evapotranspirationen och i den vertikala omblandningen. Det som är direkt avgörande för evapotranspirationen är andelen hårdgjorda ytor och mängd och typ av vegetation. Ju större andel permeabla ytor och ju mer vegetation det finns, desto högre blir den marknära luftfuktigheten (Shashua-Bar m.fl. 2009). Bebyggelsen i staden, liksom de högre yt- och lufttemperaturerna, leder till en ökad dynamisk och termisk konvektion och därmed till en ökad vertikal omblandning och borttransport av fuktighet.

Som tidigare nämnts kan fuktigheten vara högre i bebyggda områden under natten, vilket är en direkt eller indirekt effekt av följande processer (Kuttler m.fl. 2007):

- i) frånvaro av, minskad eller fördröjd dagutfällning i bebyggelsen
- ii) fortsatt evapotranspiration i bebyggelsen under natten
- iii) tidig snösmältning i staden
- iv) antropogena utsläpp av vattenånga i staden, dvs. utsläpp från trafik, bostäder, fabriker etc.

Processerna i punkt i-iii) beror på den generellt sett högre lufttemperaturen i staden, medan processen i punkt iv) styrs av typen och graden av mänsklig aktivitet (alltså vad människorna i staden gör och i vilken utsträckning), rådande väderförhållanden och tiden på året.

På vintern kan bebyggda områden ha högre luftfuktighet än den omgivande landsbygden, även på dagen. Detta beror på att avdunstningen är lägre utanför staden, eftersom marken där är fryst eller täckt med snö. Under vintern är också de antropogena utsläppen av vattenånga från förbränning (särskilt från uppvärmning) en betydande källa till fuktighet, vilket bidrar till en högre luftfuktighet i staden jämfört med utanför staden.

Vädrets påverkan på lokala skillnader i luftfuktighet

Vädret har en stor betydelse för att det ska uppstå lokala skillnader i luftfuktighet, såväl inom en stad som mellan staden och dess omgivning. I allmänhet är skillnaderna som störst under klara och vindstilla väderförhållanden under perioder med lite nederbörd (Holmer & Eliasson 1999, Kuttler m.fl. 2007, Holmer m.fl. 2012). Luften är också fuktigare under sommarmånaderna än under övriga månader (Kuttler m.fl. 2007). Det beror på att varm luft kan hålla mer fuktighet än kall luft och på att avdunstningen är högre under sommaren. På sommaren är dessutom skillnaderna inom en stad och mellan staden och dess omgivningar som störst, till följd av skillnaderna i vertikal omblandning (Kuttler m.fl. 2007).

Luftfuktighetens påverkan på den urbana värmeön och på förekomsten av dimma

Liksom luftföroreningarna har luftfuktigheten en direkt påverkan på nettostrålningen. Vattenånga minskar den inkommande och den utgående långvågiga strålningen. Under natten, då luftfuktigheten är högre i staden än på landsbygden, innebär detta att staden kylv långsammare, vilket leder till en förstärkning av värmeöeffekten (Holmer & Eliasson 1999).

I allmänhet är sikten lägre i stora städer till följd högre halter av luftföroreningar. Ändå är det inte lika vanligt med tjock dimma i städer som på landsbygden, vilket beror på den urbana värmeöeffekten och den goda tillgången på kondensationskärnor, dvs. små partiklar som vattenångan kan kondensera på. God tillgång på kondensationskärnor leder nämligen till bildandet av många mindre vattendroppar i stället för större dimdroppar.

1.5 Vind i bebyggelse

Skillnader i bebyggelsegeometri, topografi och mängden och typen av vegetation skapar stora rumsliga variationer i vindhastighet och vindriktning, betydligt större variationer än i lufttemperatur. På grund av friktionen från byggnader, topografi och vegetation är vindhastigheten lägst närmast marken men ökar snabbt med höjden.

Staden är generellt sett mindre blåsig än det omgivande landskapet (Holmer 1978, Landberg 1981). I ansiktshöjd är vinden i medeltal 70–80 % lägre i staden jämfört med utanför staden (Holmer 1978). Höjden och formen på byggnaderna, avståndet mellan dem samt läget i relation till vindriktningen försvagar eller förstärker den marknära vindhastigheten. De högsta vindhastigheterna finner man i gatuhörn och på lovartsidan av byggnader (Holmer 1978). I vindutsatta områden, såsom utmed vatten och i höjdlägen, bör man undvika alltför stora skillnader i hushöjd och raka gator, som fångar och förstärker den marknära vinden. I dessa områden bör man i stället ha en relativ jämn bebyggelse (högst 1–2 våningsplan mer eller mindre på husen) samt vindlande gator.

För att skapa lä i vindutsatta områden använder man ofta träd och buskar, som effektivt reducerar marknära vindhastigheter. Studier har bl.a. visat att gatuträd kan minska den marknära vindhastigheten med 80 % (Shashua-Bar m.fl. 2009). Som ett resultat av detta påverkar förekomsten av träd och buskar spridningen och deponeringen av luftföroreningar (Nowak m.fl. 2006). Trädens och buskarnas aerodynamiska effekter beror på hur tätt de står, art, form och täthet samt tiden på året (Buccolieri m.fl. 2009). Ju tätare vegetation, desto större del av luftströmmen passerar över vegetationen och bildar virvlar. För att fungera optimal bör skyddsplaneteringar ha en genomsläpplighet på ca 40 % sommartid (Bernatzky 1978).

Under klara och vindstilla väderförhållanden, kan olika typer av termiska vindsystem utvecklas i och runt städer, till följd av skillnaderna i temperatur mellan olika ytor. Skillnader i temperatur mellan två närliggande ytor skapar i detta fall en tryckskillnad som genererar en svag lufrörelse (Oke 1987). På samma vis leder skillnader i temperatur mellan stad och landsbygd till en tryckskillnad, som ger upphov till ett svagt marknära flöde från omgivningen in mot staden. Detta termiska vindsystem, ofta kallat omlandsbris, har rapporterats från flera städer runt om i världen. Men även temperaturskillnader inom en stad, såsom den mellan en park och dess omgivande bebyggelse, kan ge upphov till termiska vindsystem (Eliasson & Upmanis 2000, Thorsson & Eliasson 2003). Eftersom de flesta städer ligger i kustnära områden med stora variationer i topografin, förekommer även andra typer av termiska vindsystem, t.ex. land- och sjöbris samt berg- och dalvind. Dessa termiska vindsystem kan förstärka eller försvaga omlandsbrisen eller skapa komplexa vertikala vindregimer (Holmer & Haeger-Eugensson 1999).

2 Klimat och människor i bebyggda områden

Vädret påverkar oss människor på många olika sätt, t.ex. hur vi använder och upplever platser och hur vi mår då vi befinner oss på en viss plats. Eftersom vädret och utomhusklimatet har en direkt påverkan på inomhusklimatet styr det även vårt behov av att värma eller kyla våra bostäder, arbetsplatser osv. Kunskapen om hur vädret påverkar oss och hur det inverkar på uppvärmnings- och kylbehovet kan och bör således tillämpas inom stadsplanering och design. Nedan beskrivs begreppet termisk komfort samt hur vädret påverkar våra utomhusaktiviteter, vår platsupplevelse, vår hälsa och vårt välbefinnande. Vidare diskuteras de hälsomässiga och socioekonomiska konsekvenserna av att staden generellt sett är varmare än sin omgivning.

2.1 Termisk komfort

Energiutbytet mellan människokroppen och dess omgivning bestämmer den termiska komforten. Det här energiutbytet styrs av temperatur-, fuktighets-, vind- och strålningsförhållanden, liksom av personliga parametrar såsom aktivitet, klädsel, längd, vikt och kön. För att beskriva det har man under åren tagit fram mer än 100 olika index (Jendritzky m.fl. 2001). Dessa index kombinerar två eller flera av de parametrar som styr energiutbytet till ett enda värde, dvs. ett värde som beskriver dess samlade effekt på de sensoriska och fysiologiska reaktionerna i kroppen (Givoni 1976). Det finns två typer av index – empiriska och rationella.

Empiriska index är baserade på mätningar, vars förenklade samband inte nödvändigtvis följer någon teori. De flesta av dessa index utgår från två parametrar. Index framtagna för varma klimat kombinerar ofta lufttemperaturen med olika mått på luftfuktighet, medan index framtagna för kalla klimat ofta kombinerar lufttemperatur med vindhastighet. Några av de mest kända empiriska indexen är: Discomfort Index, DI (Thom 1959), Apparent Temperature, AT (Steadman 1979) och Wind-Chill Index, WCI (Steadman 1971).

Rationella index är baserade på människans energibalans och tar hänsyn till alla meteorologiska och personliga parametrar. Några av de mest använda rationella indexen är: Predicted Mean Vote, PMV (Fanger 1970), Physiological Equivalent Temperature, PET (Mayer & Hoppe 1987), Outdoor Standard Effective Temperature, OUT-SET (Pickup & de Dear 1999) och Universal Thermal Climate Index, UTCI (www.utci.org).

Under de senaste åren har flera forskare uppmärksammat betydelsen av psykologiska och kulturella processer för hur vi upplever vädret (Höppe & Seidl 1991, Höppe 2002, Nikolopoulou m.fl. 2001, Nikolopoulou & Steemers 2003,

Nikolopoulou & Lykoudis 2006, Thorsson 2003, Thorsson m.fl. 2004, Knez m.fl. 2009). Psykologiska processer är t.ex. kunskap, erfarenhet, attityd, förväntningar, övertygelse, preferenser och upplevd kontroll. Kulturella processer kan vara regler, normer och värderingar. Studier har visat att dessa processer förklarar cirka 50 % av hur vi upplever vädret (Nikolopoulou & Steemers 2003). Inget av dagens index tar dock hänsyn till dessa processer.

2.2 Väder och utomhusaktivitet

I genomsnitt tillbringar vi endast en liten del av vår tid utomhus. Enligt en svensk studie tillbringar vi i genomsnitt 45 minuter utomhus under veckorna och 1 timme under helgerna (Thorsson 2008). Tiden skiljer sig dock mellan olika grupper. Till exempel vistas hundägare betydligt mer utomhus än många andra grupper.

Vädret har stor betydelse för hur vi använder offentliga platser i staden, såsom parker och torg. (Zacharias m.fl. 2001, Nikolopoulou m.fl. 2001, Thorsson m.fl. 2004, Eliasson m.fl. 2007). Studier har visat att vädret kan förklara upp till 47 % av variansen i hur människor utnyttjar platser (Eliasson et al. 2007). I allmänhet används en plats mer när temperaturen ökar och när molnmängden och vindhastigheten minskar. De flesta platser, med några få undantag, används nästan aldrig vid låga temperaturer (under 0 °C). Däremot ökar användningen snabbt när temperaturen stiger över ett visst antal grader som är specifikt för platsen (8–15 °C).

Många människor och hög aktivitet på en plats används ofta som ett mått på hur ”framgångsrik” platsen är (Carmona m.fl. 2003). Eftersom vädret förklarar närmare 50 % av variansen i hur en plats utnyttjas är det därför viktigt att ta hänsyn till klimatet i den fysiska planeringen. Vädret varierar dock från dag till dag, och de individuella preferenserna är stora. Genom att då erbjuda en stor variation av sol, skugga och lä inom en plats, för människor att välja mellan, kan man få människor att utnyttja platsen mer. Det i sin tur får positiva hälsomässiga och socioekonomiska effekter på samhället.

2.3 Väder och platsupplevelse

Vädret påverkar hur vi upplever platser. Till exempel har studier visat att en plats upplevs som vackrare vid höga lufttemperaturer än vid låga lufttemperaturer (Eliasson m.fl. 2007). En möjlig förklaring till detta är att höga temperaturer påverkar människors platsuppfattning positivt. Dessutom har det visat sig att människor upplever en plats olika beroende på graden av naturliga element, såsom vatten och träd. Människor bedömer exempelvis strandnära platser som vackrare vid höga vindhastigheter än vid låga, medan torg omgivna av byggnader bedöms som fulare när det blåser mycket (Eliasson m.fl. 2007). En möjlig

förklaring till detta är att hög vindhastighet vid vatten ger ett positivt estetiskt och symboliskt värde till platsen. Detta är i linje med tidigare studier, som visat att vistelse ute i naturen ofta leder till positiva känslor (Chiesura 2004) och att man är mer tolerant mot stora variationer i vindhastighet, temperatur och solinstrålning i områden med stort inslag av natur (Nikolopoulou & Steemers 2003). Människor upplever dessutom flera valmöjligheter som något positivt, och det leder till ökad komfort och större välbefinnande (Thorsson m.fl. 2004).

2.4 Väder och känslor

Det har visat sig att människor känner sig gladare på en viss plats när lufttemperaturen ökar och himlen är klar (Eliasson m.fl. 2007, Knez m.fl. 2008). Detta tyder på att det finns ett samband mellan väder och känslor, vilket är i linje med Cunningham (1979), som visar att solljus kan leda till en positiv sinnesstämning.

2.5 Väder och hälsa

Flera studier har visat att både höga och låga temperaturer leder till ökad dödlighet i hjärt- och kärlsjukdomar och respiratoriska sjukdomar (Kalkstein & Greene 1997, Keatinge m.fl. 2000, Basu & Samet 2002, Pascal m.fl. 2006, Rocklöv & Forsberg 2008). De flesta av dessa studier beskriver sambandet mellan dygnets temperatur och antalet dödsfall som en V- eller U-formad kurva, dvs. en kurva med ett minimum som representerar en ”optimal temperatur” där risken att dö är som lägst. I Sverige är risken att dö på grund av kyla eller värme som lägst då dygnsmedeltemperaturen är 12 °C (Rocklöv & Forsberg 2008). I Norge är den optimala temperaturen också beräknad till ca 12 °C, medan den i Finland är ca 14 °C, i London ca 20 °C och i Aten ca 25 °C. Anledningen till att den optimala temperaturen skiljer sig mellan olika länder är att samhället och befolkningen har anpassat sig till rådande klimat. Även om antalet köldrelaterade dödsfall väntas minska på grund av framtida mildare vintrar, förväntas effekterna av höga temperaturer vara större i Skandinavien. Det är en följd av att vi inte har anpassat oss lika bra till värme som till kyla (Rocklöv & Forsberg 2008). Å andra sidan har studier visat att en måttlig ökning av lufttemperaturen och relativt varma somrar har en positiv inverkan på människors utomhusaktiviteter, välbefinnande, sinnesstämning och psykiska hälsa i Sverige (Thorsson m.fl. 2004, Eliasson m.fl. 2007, Hartig m.fl. 2007).

2.6 Socioekonomiska och hälsomässiga konsekvenser av det urbana klimatet

De socioekonomiska och hälsomässiga effekterna av det urbana klimatet kan vara både positiva och negativa. I kalla klimat minskar det urbana klimatet energianvändningen under vintern (med andra ord uppvärmningen av byggnader), underhållet av vägar och tak (t.ex. snöskotning, saltning och sandning) och köldstressen hos människor. På sommaren leder det urbana klimatet däremot till att mer energi används (t.ex. ökar kylbehovet i byggnader) och till mer värmestress hos människor. Vissa av effekterna är negativa under hela året, såsom ökad vattenförbrukning. I kalla klimat råder således en konflikt mellan att minska de negativa effekterna av det urbana klimatet under sommaren och att ta till vara på dess fördelar under resten av året.

Med modellberäkningar har man visat att elförbrukningen för att kyla byggnader kan komma att stiga med 2–4 % för varje grad temperaturen ökar över 15–20 °C (Akbari m.fl. 2001). En urban värmeö på 2,5 °C kan därför innebära en ökad efterfrågan på energi för kylning av byggnader med 5–10 %. Man kan dock minska energianvändningen i bebyggda områden (Akbari & Taha 1992, Rosenfelt m.fl. 1997, Akbari m.fl. 1997, Taha m.fl. 1999, Synnefaa m.fl. 2007) genom att öka andelen vegetation och kalla material, dvs. material med hög reflektion och emissivitet (Bretz & Akbari 2007). Man har exempelvis beräknat att det går att minska energianvändningen för luftkonditionering med 10 % respektive 35 % genom att öka andelen gröna tak och det genomsnittliga albedot i en stad med vardera 30 % (Akbari & Taha 1992). Mängden energi som kan sparas när man anlägger gröna tak och använder kalla material beror till stor del av hur väl taket är isolerat. Ju sämre takisolering, desto större besparing. En annan fördel med att anlägga gröna tak och använda kalla material är att livslängden på materialet ökar, till följd av att temperatursvängningarna dämpas och därmed expansionen och kontraktionen av byggnadsmaterialet. Dessutom skyddar vegetationen mot ultraviolett strålning (UV-ljus), som bryter ner många material.

Studier har också lyft fram att det urbana klimatet förvärrar värmestressen hos människor under perioder med höga temperaturer, speciellt under natten, då den urbana värmeön är som störst (Jendritzky & Grätz 1999, Pascal m.fl. 2006). Människor som är bosatta i stora städer har visat sig vara mer sårbara för värmeböljor än personer som bor i glest befolkade områden. Det gäller särskilt de som bor på översta våningen i flerbostadshus och i de tätbebyggda centrala delarna av staden. (Buechley m.fl. 1972, McGeehin & Mirabelli 2001). Invånarna i staden upplever en ihållande värmestress under hela dygnet, eftersom byggnaderna där lagrar och bevarar mer värme under natten, då ventilationen ofta är otillräcklig. De som bor utanför staden får däremot möjlighet att återhämta sig under natten (Jendritzky & Grätz 1999). I takt med att städerna

fortsätter att växa ökar effekten av den urbana värmeön och därmed även värmestressen hos stadsbefolkningen och kylbehovet för byggnader sommartid. Vidare förväntas värmeböljor bli allt vanligare, längre och intensivare till följd av klimatförändringarna vilket också leder till ökad värmestress och ökat kylbehov (SOU 2007).

3 Åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden

Genom att ta hänsyn till klimatet i den fysiska planeringen kan man få människor att använda parker, torg och gator i högre utsträckning, ge människor bättre hälsa och öka deras välbefinnande. Man kan också minska uppvärmnings- och kylbehovet av byggnader samt absorbera och hantera klimatrelaterade risker, såsom extrema temperaturer. Ju tidigare i planeringsprocessen man tar hänsyn till klimatet, desto bättre kan man identifiera konflikter och dilemman mellan olika aspekter och omsätta dem i innovativa lösningar. För att nå ett bra resultat bör man alltid utgå från platsens läge, topografi och klimat samt hur man vill att den ska fungera och användas. Nedan ges förslag på åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden under perioder med höga temperaturer. Effekten av de olika åtgärderna påverkas sedan av hur omgivningen ser ut och hur omfattande åtgärderna är. Åtgärdsförslagen är allmänna, dvs. de kan tillämpas i samtliga svenska städer.

3.1 Temperatursänkande åtgärder

Öka mängden grönska. Man kan minska temperaturen dagtid såväl som nattetid genom att ersätta hårdgjorda ytor med vegetation, dvs. anlägga nya parker, plantera träd och installera gröna tak och fasader. I de flesta områden kan mängden vegetation ökas, exempelvis

- i) utmed trafikleder (gator, cykelvägar, järnvägslinjer etc.)
- ii) på kommunal och statlig mark (parker, torg, skolgårdar etc.)
- iii) på privat mark (bostäder, kommersiell och industriell mark)
- iv) på tak och fasader.

Maximera kyleffekten genom att plantera stora träd, kluster av träd och vegetation i lager. När man planterar en blandning av stora träd, buskar och markvegetation ökar volymen på vegetationen och därmed kyleffekten.

Maximera skuggningen av ytor som tenderar att värmas upp. Gator, torg, parkeringsplatser, väggar och tak är ytor som tenderar att värmas upp. Man bör därför plantera träd och fasadvegetation nära byggnader, framförallt öster, sydost, syd, sydväst och väst om dessa. Helst bör träden vara så stora att de skuggar hela eller större delen av taket. Bäst är lövträd, eftersom de ger skugga på sommaren, men släpper igenom solljus under hösten, vintern och våren. För att minimera skuggeffekten under de perioder då man gärna vill ha mer sol, bör man välja träd med få grenar och fasadvegetation. Men man kan också använda olika typer av fasta och rörliga solskydd för att skapa skugga.

Välj träd, buskar och markvegetation som trivs i staden. Växterna bör trivas i stadens relativt torra, varma och förorenade miljöer. För att vegetation ska ge maximal kylning och skugga är det alltså viktigt att välja lämpliga arter. Detta är speciellt viktigt om man ska plantera växterna på gator och torg, eftersom vattentillgången i sådana områden är begränsad. För att undvika sjukdomar och skadeangrepp rekommenderas en blandning av flera olika arter.

Ersätt hårdgjorda ytor med genomsläppliga ytor. Genomsläppliga ytor är t.ex. grus, kullersten och gräsarmering². De ökar avdunstningen och minskar därmed temperaturen.

Öka användningen av kalla material. Kalla material är det samma som material med ett högt albedo och en hög emissivitet. Man kan minska yttemperaturen och värmelagringen i byggnader och mark genom att ersätta mörka, lågreflekterande ytor och material, som har låg emissivitet, med ljusa, högreflekterande ytor och material, som har hög emissivitet. Men undvik bländning genom att inte använda kraftigt högreflekterande ytor och material.

Tänk på byggnadsmaterialens värmekapacitet. Byggnadsmaterial med låg värmekapacitet minskar värmelagringen, vilket leder till minskade yt- och lufttemperaturer under natten. Men man bör komma ihåg att material med låg värmekapacitet samtidigt bidrar till att yt- och lufttemperaturen ökar under dagen.

Tänk på hur bebyggelsegeometrin påverkar temperaturen. Hög och tät bebyggelse ger mer skugga, vilket minskar yt- och lufttemperaturen dagtid. Ju högre och tätare bebyggelse, desto lägre yt- och lufttemperaturer. Samtidigt leder hög och tät bebyggelse till en minskad avkylning under sen eftermiddag och kväll. Den för därför med sig relativt höga nattliga yt- och lufttemperaturer.

Minska utsläppet av värme från byggnader och bilar. Man kan minska den urbana värmeöen genom att minska värmeutsläppen från bl.a. byggnader och bilar.

Minska utsläppet av luftföroreningar. Man kan öka avkylningen under natten och därmed minska den urbana värmeöeffekten om man minskar mängden luftföroreningar, såsom partiklar och koldioxid.

² Markbeläggning med hög genomsläpplighet samtidigt som den har hög bärlast och är tålig för slitage.

3.2 Andra positiva effekter

Förutom att reglera lokal- och mikroklimatet erbjuder urban grönska en mängd varor och tjänster. Den urbana grönskan upprätthåller t.ex. den biologiska mångfalden och bidrar till luft- och vattenrening, dagvattenhantering, bullerminskning, erosionsskydd, mat, rekreation, återhämtning samt till ett pedagogiskt lek- och läromaterial (Constanza m.fl. 1987). Detta kallar man ofta ekosystemtjänster. I stadsbyggnadssammanhang fungerar vegetationen dessutom som avgränsare, avskiljare, riktmärke och som ett förskönande objekt. Vidare binder vegetation koldioxid och bromsar därmed den globala uppvärmningen (Akbari 2002).

3.3 Konflikter och dilemman

Planering innebär alltid att man gör en mängd olika val. Ibland kan detta leda till konflikter och dilemman. En låg och öppen bebyggelse kan t.ex. ge upphov till höga marknära vindhastigheter och stora svängningar i lufttemperaturen, samtidigt som den ger god soltillgång och spridning av luftföreningar (dvs. lägre koncentrationer). En hög och tät bebyggelse däremot, vilket är gynnsamt under varma och soliga dagar, ger upphov till en stor nattlig värmeö, försämrade spridning av luftföroreningar och minskad solbelysning på gator och fasader.

Som tidigare nämnts erbjuder vegetation i städer en mängd varor och tjänster men kan också medföra en del problem. Exempelvis leder en ökning av andelen träd, buskar, fasad- och takvegetation i städer till en ökad vattenförbrukning, vilket kan skapa problem under perioder med lite nederbörd. Vegetationen kan också ge allergiska reaktioner hos människor vid lövsprickningen och genom pollen, utgöra ett trafikhinder, ge oönskad skugga, ge problem vid anläggningen och driften samt minska tryggheten i ett område. För att öka tryggheten i den bebyggda miljön är det viktigt att man utformar platser så att alla trygghetsfaktorer uppfylls, såsom överblickbarhet, synlighet, orienterbarhet och tillgänglighet. Det innebär att man bör undvika en alltför tät vegetation, framför allt buskar på platser eller utmed stråk där människor passerar under kvällstid. Hur man förvaltar och sköter platsen är också avgörande för tryggheten.

Slutord

Vi kan använda vår kunskap om bebyggelsens, vegetationens och yt- och byggnadsmaterialens påverkan på de marknära temperatur-, vind-, fuktighets- och strålningsförhållandena i en stad för att förbättra stadsklimatet. Vi kan exempelvis se till så att offentliga platser används mer och förbättra människors hälsa och välbefinnande. Vi kan också minska energianvändningen och effekterna av klimatrelaterade risker. Genom att bevara och i vissa områden även öka mängden grönska kan vi inte bara reglera klimatet utan även minska bullret, hantera och rena dagvattnet, öka den biologiska mångfalden samt skapa bättre möjligheter till rekreation i staden.

En tät stad med alla dess fördelar behöver inte innebära att den inte kan vara grön, dvs. grönska bör ses och värderas utifrån volym och kvalitet i stället för enbart yta. Det är också viktigt att vi skapar sociala gröna ytor i staden, som erbjuder människor mötesplatser och möjlighet till integration. Exempel på sociala gröna ytor är parker, koloniträdgårdar, odlingslotter, lekplatser och promenadområden.

Bilagor

Tabell B1. Olika bebyggelsers potential att utveckla en urban värmeö.
Modifierad efter Katzschner (2011).

Klassificering	Urban värmeöeffekt	Beskrivning
1	Obefintlig	Skog, odlingslandskap, parker
2	Liten	Låg och gles bebyggelse, mycket vegetation
3	Medel	Medelhög och tät bebyggelse, lite vegetation
4	Stor	Hög och tät bebyggelse, ingen vegetation

Tabell B2. Strategier och åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden. Modifierad efter Chen (2010).

Strategi	Åtgärd	Planeringshorisont
Albedo	Ljusa, reflekterande ytor på • byggnader (tak och fasader) • gator, torg, parkeringar och trottoarer.	Kort Ytor & material ↓ Byggnader & träd ↓ Stadsplanering Lång
Värmelagring & värmeledning	Material med låg värmelagrings- och värmeledningsförmåga.	
Vegetation	• Gatuträd • Parker • Gröna tak och fasader	
Skuggning	• Geometri (täthet) • Riktning på gator • Solskydd • Träd	
Ventilation	• Riktning på gator • Öppna ytor • Placering av byggnader	

Referenser

- Ackerman, B. 1987: Climatology of Chicago area urban-rural differences in humidity. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 26:427–430.
- Akbari, H. & Taha, H. 1992: The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy* 17:141–149.
- Akbari, H., Kurn, D., Bretz, S. & Hanford, J. 1997: Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings* 25:139–148.
- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. 2001: Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70:95–310.
- Akbari, H. 2002: Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants. *Environmental Pollution* 116:119–126.
- Ali-Toudert, F. & Mayer, H. 2007: Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* 81:742–754.
- ASHRAE, 2001: I: Handbook of fundamentals. *American Society for Heating, Refrigerating and air conditioning*. Atlanta. 8.1–8.29.
- Atkinson, B.W. 2003: Numerical modeling of urban heat-island intensity. *Boundary-Layer Meteorology* 109:285–310.
- Basu, R. & Samet, J.M. 2002: Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiological Review* 24:190–202.
- Balzs, B., Unger, J., Gal, T., Sumeghy, S., Geiger, J. & Szegedi, S. 2009: Simulations of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. *Meteorological Application* 16:275–287.
- Barradas, V.L. 1991: Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology* 35:24–28.
- Berdahl, P. & Bretz, S. 1997: Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings* 25:149–158.
- Bernatzky, A. 1978: Tree ecology and preservation. Elsevier scientific publishing company, Amsterdam. S. 357.
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M. & Pullin, A.S. 2010: Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97:147–155.

- Bretz, S. & Akbari, H. 1997: Long-term performance of high albedo roof coatings. *Energy and Buildings* 25:159–167.
- Buccolieri, R. m.fl. 2009: Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. *Science of the Total Environment* 407:5247–5256.
- Buechley, R.W., Van Bruggen, J. & Truppi, L.E. 1972: Heat island equals death island? *Environmental Research* 5:85–92.
- Ca, V.T., Asaeda, T. & Abu, E.M. 1998: Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and Buildings* 29:83–92.
- Carmona, M., Heat, T., Oc, T. & Tiedsell, S. 2003: Public Places—Urban Spaces: The dimensions of urban design. *Architectural Press, Elsevier*.
- Chandler, T.J. 1967: Absolute and relative humidity in Towns. *Bulletin of the American Meteorological Society* 48:394–399.
- Chang, C.R., Li, M.H. & Chang, S.D. 2007: A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning* 80:386–395.
- Chiesura, A. 2004: The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning* 68:129–138.
- Compagnon, R. & Goyette-Pernot, J. 2004: Visual comfort in urban spaces. I: Nikolopoulou, M. (red.), *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. Athens: Centre for Renewable Energy Sources, EESD, FP5. S. 21–31.
- Constanza, R. m.fl. 1987: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(15):253–260.
- Coutts, A.M., Beringer, J. & Tapper, N. 2007: Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46:477–493.
- Cunningham, M.R. 1979: Weather, mood, and helping behaviour: Quasy experiments with the sunshine Samaritan. *Journal of Personal Social Psychology* 37:1947–1956.
- Eliasson, I. 1990–91: Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy and Buildings* 15–16:141–145.
- Eliasson, I. 1996: Urban nocturnal temperature, street geometry and land use. *Atmospheric Environment* 30(3):379–392.
- Eliasson, I. & Upmanis, H. 2000: Nocturnal airflow from urban parks – implications for city ventilation. *Theoretical and Applied Climatology* 66:95–107.

- Eliasson, I., Knez, I., Thorsson, S., Westerberg, U. & Lindberg, F. 2007: Climate and behavior in a Nordic city. *Landscape and Urban Planning* 82:72–84.
- Emmanuel, R. & Fernando, H.J.S. 2007: Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research* 34:241–251.
- Emmanuel, R., Rosenlund, H. & Johansson, E. 2007: Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology* 27(14):1995–2004.
- Erell, E. & Williamson, T. 2007: Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology* 27:1243–1255.
- Fanger, P.O. 1972: Thermal comfort. *McGraw-Hill*. New York.
- Fischetti, M. 2008: Green roofs, living cover. *Scientific American* 298:104–105.
- Fortuniak, K., Klysik, K. & Wibig, J. 2006: Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Lodz. *Theoretical and Applied Climatology* 84:91–101.
- Givoni, B. 1976: Man, Climate and Architecture. Applied Science Publishers. London. S. 483.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R. 1991: An evapotranspiration–interception model for urban areas. *Water Resources Research* 27:1739–1755.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R. 1995: Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology* 34:873–889.
- Hartig, T., Catalano, R. & Ong, M. 2007: Cold summer weather, constrained restoration, and the use of antidepressants in Sweden. *Journal of Environmental Psychology* 27:107–116.
- Holmer, B. 1978: Vindklimatet i Göteborg. Göteborgs Universitet. *GUNI rapport* 11:224 ff.
- Holmer, B. & Haeger-Eugensson, M. 1999: Winter land breeze in a high latitude complex coastal area. *Physical Geography* 20:152–172.
- Holmer, B. & Eliasson, I. 1999: Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology* 19:989–1009.
- Holmer, B., Thorsson, S. & Eliasson, I. 2007: Development of intra-urban air temperature differences. *Geografiska Annaler* 89A (4):237–248.
- Holmer, B., Thorsson, S. & Linden, J. 2012: Evening evaporative cooling in relation to vegetation and urban geometry in the city of Ouagadougou, Burkina Faso. Submitted to *International Journal of Climatology*.

- Höppe, P. 2002: Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings* 34:661–665.
- Höppe, P. & Seidl, H.A.J. 1991: Problems in assessment of the bioclimate for vacationists at the seaside. *International Journal of Biometeorology* 35:107–110.
- Jendritzky, G. & Grätz, A. 1999: Das Bioklima des Menschen in der Stadt. I: Helbig, A., Baumüller, J. & Kerschgens, M.J. (red.), *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer: Heidelberg. 126–158.
- Jendritzky, G., Maarouf, A. & Staiger, H. 2001: Looking for a universal thermal climate index (UTCI) for outdoor applications. Conference on Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Windsor, United Kingdom, OCSD. S. 353–367.
- Johansson, E. & Emmanuel, R. 2006: The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology* 51:119–133.
- Kalkstein, L.S. & Greene, J.S. 1997: An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. *Environmental Health Perspectives* 105: 84–93.
- Katzschner, L. 2011: Urban climate strategies against future heat stress conditions. I: Otto-Zimmermann, K. (red.), *Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change – Proceedings of the Global Forum 2010, Local Sustainability 1*, Springer Science and Business Media. S. 79– 91.
- Keatinge, W.R., Donaldson, G.C., Cordoli, E., Martinelli, M., Kunst, A.E., Mackenbach, J.P., Nayha, S. & Vuori, I. 2000: Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. *British Medical Journal* 321:670–673.
- Knez, I. & Thorsson, S. 2008: Thermal, emotional and perceptual evaluations of a park: Cross-cultural and environmental attitude comparisons. *Building and Environment* 43:1483–1490.
- Knez, I., Thorsson, S. & Eliasson, I. & Lindberg, F. 2009: Psychological Mechanisms in Outdoor Place and Weather Assessment: Towards a Conceptual Model. *International Journal of Biometeorology* 53:101-111.
- Kuttler, W., Weber, S., Schonnefeld, J. & Hesselschwerdt, A. 2007: Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology* 27:2005–2015.
- Larsson, A. 2011: Stadsträds transmissivitet av direkt solstrålning. En studie i fyra stadsträds optiska vinteregenskaper för en del av en hållbar klimatplanering. Sveriges lantbruksuniversitet, Landskapsplanering, Alnarp. Hämtad från http://stud.epsilon.slu.se/3175/1/larsson_a_110830.pdf.

- Landsberg, H.E. 1981: The Urban Climate, International Geophysical Series 28. Academic Press: New York and London.
- Linden, J. 2011: Nocturnal cool island in the Sahelian city of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Climatology* 31:605–620.
- Lindberg, F. 2007: Modelling the urban climate using a local governmental geodatabase. *Meteorological Applications* 14:263–273.
- Lindberg, F. & Grimmond, C.S.B. 2010: Continuous sky view factor from high resolution urban digital elevation models. *Climate Research* 42:177–183.
- Lindberg, F. & Grimmond, C.S.B. 2011a: Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosystem* 14: 617–634.
- Lindberg, F. & Grimmond, C.S.B. 2011b: The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperature in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105:311–323.
- Liu, K. & Bass, B. 2005: Performance of green roof system. National Research Council Canada, Ottawa. S. 18 f.
- Mayer, H. & Höppe, P. 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* 38:43–49.
- Mayer, H., Matzarakis, A. & Iziomon, M.G. 2003: Spatio-temporal variability of moisture conditions within the urban canopy layer. *Theoretical and Applied Climatology* 76:165–179.
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F. & Schindler, D. 2008: Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 17:241–250.
- Mayer, H., Kuppe, S., Holst, J., Imbery, F. & Matzarakis, A. 2009: Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day. I: Mayer, H. & Matzarakis, A. (red.) 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 18: 211–219.
- McGeethin, M.A. & Mirabelli, M. 2001: The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environmental Health Perspective* 109:185–189.
- McPherson, E.G. 1994: Cooling urban heat island with sustainable landscape. I: Rowntree, R.A., Platt, R.H. & Muick, P.C., The ecological city: preserving and restoring urban biodiversity. The University of Massachusetts Press, Amherst. S. 151–171.

- Nikolopoulou, M. & Lykoudis, S. 2006: Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries. *Building and Environment* 41:1455–1470.
- Nikolopoulou, M., Baker, N. & Steemers, K. 2001: Thermal comfort in outdoor urban spaces; understanding the human parameter. *Solar Energy* 70:227–235.
- Nikolopoulou, M. & Steemers, K. 2003: Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* 35:95–101.
- Nowak, D.J. m.fl. 2006: Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4:115–123.
- Oke, T.R. 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7:769–779.
- Oke, T.R. 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* 1:237–254.
- Oke, T.R. 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108:1–24.
- Oke, T.R. 1987: Boundary Layer Climates. Routledge. New York.
- Oke, T.R. 1988: The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12:471–508.
- Oke, T.R., Spronken-Smith, R.A., Jauregui, E. & Grimmond, C.S.B. 1999: The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment* 33:3919–3930.
- Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G. & Watson, I.D. 1991: Simulation of Surface Urban Heat Islands under “Ideal” Conditions at Night Part 2: Diagnosis of Causation. *Boundary-Layer Meteorology* 56:339–358.
- Pascal, M., Laadi, K., Ledrans, M., Baffert, E., Caseario-Schönemann, C., Le Tertre, A., Manach, J., Medina, S., Rudant, J. & Empereur-Bissonnet, P. 2006: France’s heat health watch warning system. *International Journal of Climatology* 50:144–153.
- Park, H.S. 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment* 20:1859–1866.
- Potchter, O., Cohen P. & Bitan, A. 2006: Climate behavior of various urban parks during hot and humid summers in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology* 26:1695–1711.
- Picot, X. 2004: Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth. Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings* 36:329–334.

- Pickup, J. & de Dear, R. 1999: An outdoor thermal index (OUTSET*) – part 1. The model and its assumptions. Proceedings of the 15th International congress of biometeorology and international conference on urban climatology, Sydney, Australia, 1999. S. 279–283.
- Ratti, C.F. 2001: Urban analysis for environmental prediction. Department of Architecture, Darwin College, University of Cambridge. S. 313.
- Rocklöv, V. & Forsberg, B. 2008: The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998–2003: a study of lag structures and heatwave effects. *Scandinavian Journal of Public Health* 36:516–523.
- Rosenfeld, A.H., Romma, J.J. & Pomerantz, M. 1997: Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog. *Energy and Buildings* 25:117–126.
- Rotach, M.W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T.R., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y.A., Ruffieux, D., Salmond, J.A., Schatzmann, M. & Voogt, J.A. 2005: BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology* 81:231–261.
- Roth, M., Oke, T.R. & Emery, W.J. 1989: Satellite-driven urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing* 10: 1699–1720.
- Saito, I., Ishihara, O. & Katayama, T. 1991: Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings* 15:493–498.
- Sandifer, S.B. & Givoni, B. 2002: Thermal Effects of Vines on Wall Temperatures—Comparing Laboratory and Field Collected Data. SOLAR 2002, Proceedings of the Annual Conference of the American Solar Energy Society. Reno, NV.
- Sham, S. 1990: Urban climatology in Malaysia: an overview. *Energy and Buildings* 15:105–117.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D. & Erell, E. 2009: The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning* 92:179–186.
- Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D. & Yaakov, Y. 2010: Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology* 30:44–57.
- Silva, H.R., Phelan, P.E. & Golden, J.S. 2010: Modelling effects of urban heat island mitigation strategies on heat related morbidity: a case study for Phoenix Arizona, USA. *International Journal of Biometeorology* 54:13–22.

SOU 2007: Sweden facing climate – threats and opportunities. Final Report from the Swedish Commission on Climate and Vulnerability, Stockholm, Sweden. Swedish Government Official Report nr 60.

Spronken-Smith, R.A. & Oke, T.R. 1998: The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing* 19:2085–2104.

Spronken-Smith, R.A. 2002: Comparison of summer- and winter-time suburban energy fluxes in Christchurch, New Zealand. *International Journal of Climatology* 22:979–992.

Steadman, R.G. 1971: Indices of windchill of clothed persons. *Journal of Applied Meteorology* 10:674–683.

Steadman, R.G. 1979: The assessment of sultriness. Part I. A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology* 18:861–873.

Steyn, D.G. 1980: The calculation of view-factors from fisheye-lens photographs. *Atmosphere-Ocean* 18:254–258.

Synnefaa, A., Santamouisa, M. & Akbari, H. 2007: Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings* 39:1167–1174.

Taha, H., Sailor, D. & Akbari, H. 1992: High albedo materials for reducing cooling energy use, Lawrence Berkeley Lab. Rep. 31721 IJC-350. Berkeley, CA.

Taha, H. 1997: Urban climates and heat islands. Albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25:99–103.

Taha, H., Konopacki, S. & Gabersek, G. 1999: Impacts of large scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study. *Theoretical and Applied Climatology* 62:175–185.

Thom, E.C. 1959: The discomfort Index. *Weather Wise* 12:57–60.

Thorsson, S. & Eliasson, I. 2003: An intra-urban thermal breeze in Göteborg, Sweden. *Theoretical and Applied Climatology* 75:93–104.

Thorsson, S., Lindqvist, M. & Lindqvist, S. 2004: Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology* 48:149–156.

Thorsson, S., Honjo, T., Lindberg, F., Eliasson, I. & Lim, E.M. 2007: Thermal comfort and outdoor activity in Japanese urban public spaces. *Environment and Behaviour* 39:660–684.

Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I. & Holmer B. 2007: Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27:1983–1993.

- Thorsson, S. 2008: Urban Climate Spaces – a multi- and interdisciplinary research project. 18th International Congress of Biometeorology (ICB2008), Tokyo, Japan, 22–26 September.
- Thorsson, S. 2008: Urban Climate Spaces – a multi- and interdisciplinary research project. International association for urban climate (IAUC) newsletter 30 December. S. 8–10.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Björklund, J., Holmer, B. & Rayner, D. 2011: Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: the influence of urban geometry. *International Journal of Climatology* 31:324–335.
- Unger, J. 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research* 27:253–264.
- Unger, J. 2006: Modeling of the annual maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Climate Research* 30:215–226.
- Upmanis, H., Eliasson, I. & Lindqvist, S. 1998: The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* 18:681–700.
- Upmanis, H. & Chen, D. 1999: Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban– park temperature differences. A case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden. *Climate Research* 13:125–139.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R. 2003: Thermal remote sensing of urban areas. *Remote Sensing of Environment* 86:370–384.
- Yamashita, S., Sekine, K., Shoda, M., Yamashita, K. & Hara, Y. 1986: On Relationships between Heat-Island and Sky View Factor in the Cities of Tama River Basin, Japan. *Atmospheric Environment* 20:681–686.
- Zacharias, J., Stathopoulos, T. & Wu, H. 2001: Microclimate and downtown open space activity. *Environment and Behavior* 33:296–315.