



GÖTEBORGS UNIVERSITET

RUMSLIG VARIATION AV STRÅLNINGSTEMPERATUR I HJORTHAGEN OCH PÅ ÖSTERMALM

Fredrik Lindberg

Lars Johansson

Sofia Thorsson

**Stadsklimatgruppen
Institutionen för geovetenskaper
Göteborgs universitet**

RAPPORT

GÖTEBORGS UNIVERSITET
Institutionen för geovetenskaper
Box 460, 405 30 Göteborg

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	3
INLEDNING	4
DATA OCH METOD	7
Höjddata	7
Vegetation	7
Beräkning av bebyggelse- och vegetationsstruktur	8
Meteorologiska data	8
Temperaturstudie: analys av strålningstemperatur	8
Solstudie: analys av solinstrålning och skuggor	9
Begränsningar	9
RESULTAT	11
Bebyggelse- och vegetationsstruktur	11
Solstudie: analys av solinstrålning och skuggor (Kartblad 1–6)	11
Strålningstemperaturens dygnsvariation på en öppen innergård	12
Strålningstemperaturens rumsliga variation	14
Strålningstemperaturens variation på natten	16
Iakttagelser från framtidsscenarioet (Kartblad 10–11, 14–15)	17
SLUTKOMMENTARER	18
REFERENSER	19

SAMMANFATTNING

Strålningstemperaturen, vilken beskriver summan av den kortvågiga och den långvågiga strålningen från omgivningen som en människa exponeras för, är en av de viktigaste meteorologiska parametrarna som påverkar hur vi upplever vädret under varma och soliga dagar. Till skillnad mot lufttemperaturen uppvisar strålningstemperaturen stora lokala variationer och är direkt kopplad till bebyggelsegeometrin och vegetationsstrukturen, eftersom dessa bestämmer mängden solinstrålning som når marken och fasaderna. Bebyggelsens och vegetationens påverkan på strålningstemperaturen kan modelleras med SOLWIEG utifrån geografisk (höjddata som representeras av mark, byggnader och vegetation) samt meteorologiska data (lufttemperatur, relativ luftfuktighet och global strålning). I denna rapport redovisas resultatet av modellberäkningar gjorda för två områden i Stockholm - Östermalm och Hjorthagen, under en solig och varm sommardag (28 juli 1994) samt en solig och kall vinterdag (9 februari 1990). Vidare har effekten av en ökning av sommartemperaturen med 2 °C simulerats i syfte att grovt uppskatta konsekvenserna av ett framtida varmare klimat. Både dagsmedelvärde och situationen klockan 14.00 rapporteras.

Modellberäkningarna visar på skillnader mellan olika bebyggelse i de två studieområdena. Gles och låg bebyggelse är varmare än tät och hög bebyggelse. Detta beror på att hög och tät bebyggelsen i större utsträckning blockerar den inkommande strålningen som har stor betydelse för strålningstemperaturen. Värmelagringen i mark och byggnader minskar och om den inkommande kortvågiga strålningen blockerar. Områden nära solexponerade fasader och träd är varma, till följd av reflekterad och emitterad långvågig strålning. Liksom byggnader ger träd upphov till skugga vilket sänker strålningstemperaturen med någon grad, framförallt i gles och låg bebyggelse. Störst temperatursänkande effekt har vegetation på solbelysta platser mitt på dagen, då också skillnaderna mellan olika typer av bebyggelse är också störst. Sett över dagen (dagsmedelvärde) jämnas skillnaderna ut något.

INLEDNING

Den här rapporten redovisar resultatet av en analys av lokala variationer i solinstrålning och strålningstemperatur inom två områden i Stockholm: Hjorthagen och Östermalm. Bakgrunden till arbetet är den uppmärksamhet som temperaturrelaterade hälsoproblem fått i ljuset av förväntade klimatförändringar; en höjning av temperaturen i allmänhet och extrema temperaturer i samband med värmeböljor i synnerhet. Det föränderliga klimatet medför ett behov av att skapa hållbara städer som kan absorbera och minska effekterna av klimatrelaterade risker, såsom extrema temperaturer (Thorsson 2012).

Nedan ges en kort bakgrund till hur stadsklimatet påverkas av strålningsbalansen och strålningstemperaturens variation i stadslandskapet i närvaro av byggnader och vegetation. För vidare läsning om stadsklimatet och åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden rekommenderas FOI-rapporten Stadsklimatet – Åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden (Thorsson 2012).

Stadsklimatet är generellt sett varmare än klimatet i obebyggda och glest bebyggda områden vilket främst beror byggnadsmaterialens förmåga att absorbera och lagra värme, hur tätt husen står och hur höga de är, samt andelen hårdgjorda ytor (Oke m.fl. 1991). Denna skillnad i lufttemperatur mellan stad och landsbygd brukar benämnas stadens värmeö och är främst ett nattligt fenomen, som uppkommer till följd av skillnader i avkyllningen under sen eftermiddag och kväll (Holmer m.fl. 2007).

Klimatet på en given plats bestäms av energiutbytet (energibalansen) mellan luft och mark, vilket i sin tur styrs av mängden inkommande energi, markens egenskaper och atmosfärens förmåga att transportera värme. Variationer i bebyggelsens geometri, det vill säga byggnadernas höjd, avstånd och orientering, samt deras och yt- och materialegenskaper är avgörande för hur mycket solinstrålning som dagtid når marken samt hur strålningen reflekteras och absorberas, och är därför huvudsakliga orsaker till lokala temperaturskillnader (Oke m. fl. 1991). Även mängden vegetation är av stor betydelse. Under klara och varma somrardagar kan torra och solexponerade ytor i staden vara 30 till 50 °C varmare än fuktiga skuggade ytor utanför staden (Berdahl & Bretz 1997) och i genomsnitt är yttemperaturen 10 till 15 °C varmare (Roth m.fl. 1989, Voogt & Oke 2003). Trots stora skillnader i yttemperatur gör dock luftens omblandning att motsvarande skillnader i lufttemperatur är små eller obefintliga dagtid (Thorsson m.fl. 2007, Emmanuel & Fernando 2007, Mayer m.fl. 2008). Tättbebyggda områden kan till och med vara svalare dagtid eftersom byggnaderna skuggar omgivande ytor (Rotach m.fl. 2005, Erell & Williamson 2007). Skuggmönstret i en stad uppvisar stora variationer under dagen, liksom under året (Lindberg & Grimmond 2011).

En av de viktigaste meteorologiska parametrarna som påverkar oss människor under varma och klara somrardagar är strålningstemperaturen som är summan av den kortvågiga och den långvågiga strålningen från omgivningen som en människa exponeras för (Mayer & Höppe 1987). Eftersom solinstrålningen, liksom reflekterad och emitterad kort- och långvågig strålning styrs av bebyggelsegeometrin, är strålningstemperaturen direkt kopplad till denna (Emmanuel & Fernando, 2007, Thorsson m.fl. 2011). Skillnader i bebyggelse-

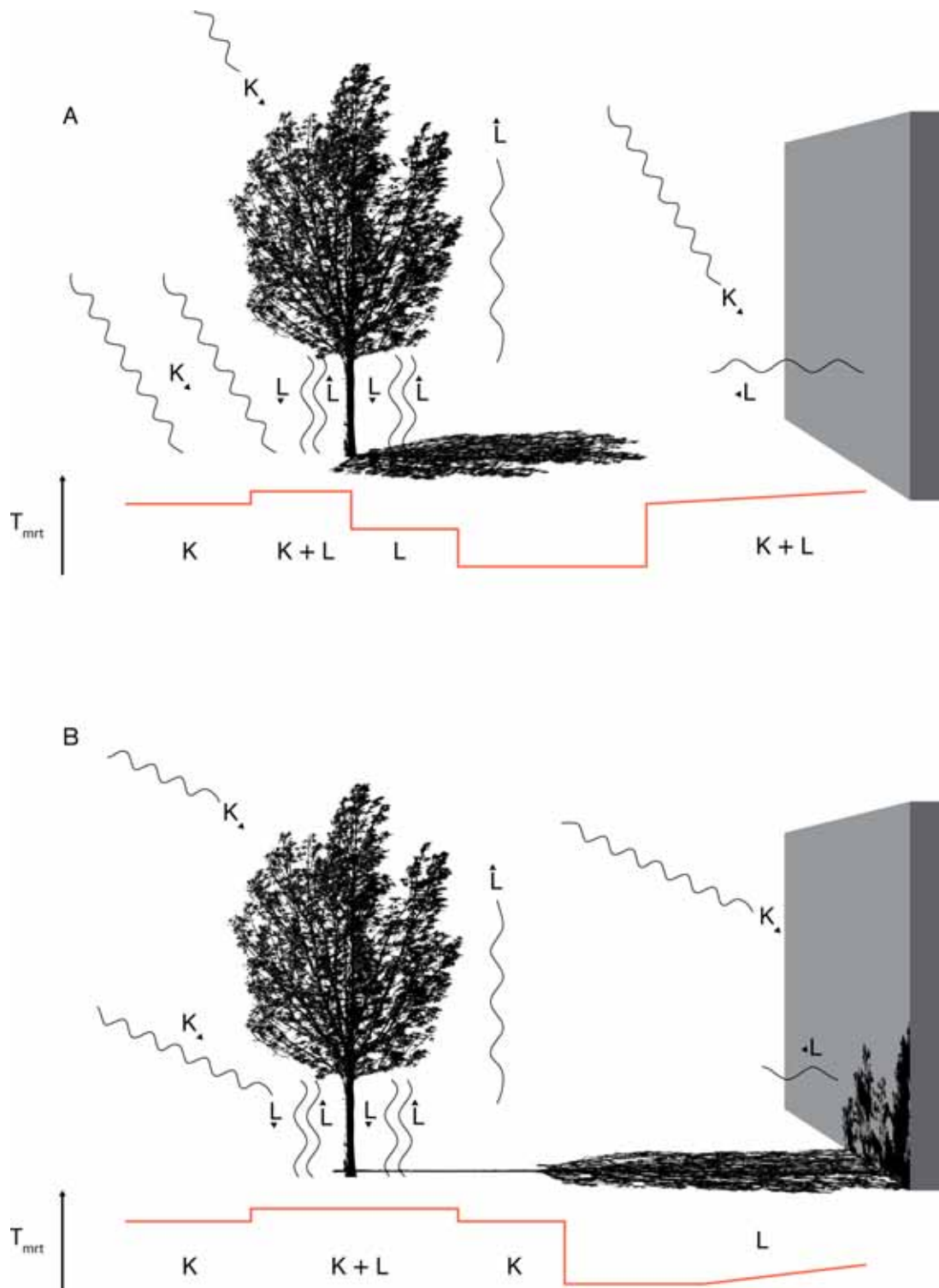
geometrin ger därför upphov till stora skillnader i strålningstemperatur under klara somrardagar (Thorsson m.fl. 2011). Då kan skillnaden uppgå till 20 °C mellan en solbelyst öppen plats och en intilliggande skuggad gata. Samtidigt kan strålningstemperaturen vara 9 °C högre i en solbelyst gata jämfört med en solbelyst öppen plats till följd av att omgivande fasader reflekterar kortvågig och långvågig strålning

På samma sätt som bebyggelsegeometrin, har vegetation (träd och buskar) en reglerande effekt på temperaturen, främst på grund av sin förmåga att ge skugga men också på att transpirationen från träden sänker lufttemperaturen. Parker och bostadsnära skogar är i allmänhet svalare än omgivande bebyggelsen, såväl dagtid som nattetid (Bowler m.fl. 2010, Sham 1990, Saito m.fl. 1991, Ca m.fl. 1998, Upmanis m.fl. 1998). Precis som byggnader har träd större inverkan på strålningstemperaturen än på lufttemperaturen (Ali-Toudert & Mayer 2007, Lindberg & Grimmond 2011b). Medan lufttemperaturen endast är någon grad lägre under ett träd jämfört med en solbelyst plats en varm och solig somrardag, kan strålningstemperaturen vara 30 °C lägre under trädet, vilket motsvarar en upplevd temperaturskillnad på 14 °C (Mayer m.fl. 2009).

FIGUR 1a visar schematiskt hur strålningstemperaturen påverkas av ett träd och en byggnad. Till vänster om trädet i figuren når den direkta kortvågiga strålningen (K) marken och ger hög strålningstemperatur. På grund av solvinkeln når den kortvågiga strålningen även in under trädet, men här höjs temperaturen något på grund av att långvågig strålning (L) emitterad från marken fångas upp av trädet och strålar tillbaka. Till höger om trädstammen skuggar trädet marken och strålningstemperaturen sjunker eftersom den kortvågiga strålningen är blockerad. När trädet inte längre skymmer himlen försvinner den långvågiga strålningen ut i atmosfären, och strålningstemperaturen är här som lägst om marken samtidigt är i skugga. Närmare byggnaden längst till höger i figuren ökar strålningstemperaturen på grund av att långvågig strålning emitteras från byggnaden. I *FIGUR 1b* står solen lägre vilket motsvarar morgon eller kväll sommartid eller mitt på dagen vintertid. Här når den kortvågiga strålningen in under hela trädet och skuggan kastas så pass långt att den kortvågiga strålningen kan nå marken innan strålningstemperaturen sjunker till den lägsta nivån i skuggan. När solen står lågt faller en större del av väggarna i skugga vilka generellt sett får en lägre yttemperatur och inflytandet från emitterad långvågig strålning är mindre jämfört med situationen i *FIGUR 1a*.

Medan skillnader i lufttemperatur främst är ett nattligt fenomen, är skillnaderna i strålningstemperatur störst under dagen. Det innebär att människor i städer i större grad riskerar att utsättas för värmestress och värmerelaterade hälsoeffekter än människor bosatta utanför staden. I Sverige beräknas årsmedeltemperaturen öka med 3–5 °C fram till 2100 (IPC, 2007). En ökning av lufttemperaturen med 2–3 °C sommartid beräknas tredubbla frekvensen av perioder hög värmestress (Thorsson m.fl. 2011).

RUMSLIG VARIATION AV STRÅLNINGSTEMPERATUR I HJORTHAGEN
OCH PÅ ÖSTERMARM



FIGUR 1. Schematisk variation av strålningstemperaturens variation och dominerande energiflöden i närheten av ett träd och en vägg vid a) hög solvinkel 58° och b) låg solvinkel 25°. Se texten för förklaring.

DATA OCH METOD

SOLWEIG är en modell för uppskattning av rumsliga variationer av tredimensionella strålningsflöden, strålningstemperatur och skuggmönster i komplexa urbana miljöer (Lindberg 2007, Lindberg et al. 2008). Två olika typer av data används i SOLWEIG för att beräkna strålningstemperatur: höjddata, och meteorologisk data. Höjddata är i form av en digital höjddata (DEM) som beskriver både markhöjd och höjd på bebyggelse (takhöjd). Meteorologiska data är i form av timvisa mätningar av ett mindre antal meteorologiska parametrar vilka beskrivs kortfattat nedan. Dessutom kan geometrisk data som beskriver vegetation (träd och buskar) komplettera höjddata och därmed göra analysen med hänsyn till vegetation (Lindberg & Grimmond 2011).

Höjddata

I studien utgjordes ursprungligt höjddata för markhöjd av vektorpunkter som konverterades till rasterdata genom interpolation. Takhöjd erhöles från vektordata (polygoner) som också konverterades till raster och sedan kombinerades med markhöjd till en komplett DEM. Upplösningen på rastren var en meter per pixel och kartprojektionerna SWEREF 99TM 18,00.

Data för byggnader på Östermalm innehöll endast information om höjd till takfoten, varför byggnaderna här har platta tak. I Hjorthagen däremot beskriver data takens form; taknock, vindskupor etc., vilket möjliggör en mer korrekt uppskattning av strålnings-temperatur eftersom takens form påverkar solinstrålningen och därmed strålningsbalansen i marknivå.

Vegetation

Utifrån geometriska data skapar SOLWEIG en höjddata för vegetation som används i kombination med den ovan beskrivna höjddata för att beräkna strålnings-temperatur. Genom att hantera vegetation som ett separat dataset är det enkelt att göra analyser både med och utan vegetation. Observera att med vegetation avses här träd och buskar. Vegetation i form av marktäckning, såsom gräsmattor, är ej möjliga att inkludera i analysen.

För vegetation på Östermalm och befintlig vegetation i Hjorthagen erhöles data i form av tredimensionella vektorobjekt. För dessa kunde position, diameter och höjd beräknas i ArcGIS. Stamhöjd uppskattades för medelhöga träd (10–15 meter) till 18 % av trädets höjd, vilket ger stamhöjder runt två meter. För högre och lägre träd 15 % respektive 20 %. Som trädslag valdes lövträd.

För den planerade bebyggelsen i Hjorthagen saknades fullständig data för vegetation. Ett dataset skapades genom att radera, kopiera och omplacera objekt från den befintliga vegetationen med planillustrationen för området som guide.

Beräkning av bebyggelse- och vegetationsstruktur

Som mått på bebyggelsens täthet i studieområdena används byggnadsytetefaktorn som är den sammanlagda ytan i horisontalplanet av alla byggnader dividerat med områdets totala yta. På samma sätt beräknas trädtytefaktorn som är trädens sammanlagda yta¹ dividerat med områdets totala yta. Eftersom byggnadernas höjd är av stor betydelse beräknades och deras medelhöjd inom respektive område. Resultaten redovisas i Tabell 1. Noteras bör att endast byggnader har tagits med i beräkningen av byggnadsytetefaktor, inte övriga hårdgjorda ytor. Ej heller tas hänsyn till byggnadernas orientering.

Meteorologiska data

I SOLWEIG anges meteorologiska data bestående av timvis uppmätt lufttemperatur (T_a), relativ fuktighet (RH) samt global, diffus och direkt kortvägig strålning. Här används en trettonårig dataserie, från 1990-01-01 till och med 2002-12-31. Strålningsdata är från SMHI, medan temperatur och luftfuktighet är från SLB-analys mätningar i takhöjd på Södermalm i Stockholm (Norman 2011). Inom denna tidsperiod identifierades den varmaste 48-timmarsperioden varur det varmaste hela dygnet (00.00–23.00) valdes som data representativt för en värmebölja, den 28 juli 1994. Juli 1994 var en mycket varm månad då till exempel 35,2 °C uppmättes i Kalmar. Lufttemperaturens dygnsmedelvärde i Stockholm var 26,1 °C med maximum, 32,5 °C, klockan 18.00 och minimum, 21,6 °C, klockan 02.00.

Ett förenklat "framtidsscenario" med förhöjd lufttemperatur skapades genom att höja lufttemperaturen med två grader över hela dygnet och beräkna ny relativ luftfuktighet. Som jämförelse valdes en klar vinterdag, 1990-02-09, med goda strålningsförhållanden och variation i lufttemperatur mellan 0,4 °C och 5,3 °C.

Ovan beskrivna temperaturdata innebär vissa begränsningar. För det första används en mätserie från en mätstation som representativ för hela Stockholm, vilket också innebär, för det andra, att lokala variationer inom de två valda studieområdena Östermalm och Hjorthagen förbises. Dessa lokala variationer kan dock negligeras då lufttemperaturens rumsliga variation dagtid är mycket liten.

Temperaturstudie: analys av strålningstemperatur

Strålningstemperatur beräknades för en värmebölja, den 28 juli 1994 samt för en klar vinterdag, den 9 februari 1990. Dessutom analyserades ett förenklat framtidsscenario med en förhöjd lufttemperatur på två grader och en därtill anpassad relativ luftfuktighet. Det är viktigt att notera att ett sådant scenario inte tar hänsyn till ett flertal tänkbara effekter av ett förändrat klimat, som till exempel ökad molnighet vilket har stor inverkan på solinstrålningen och därmed på lufttemperatur, fuktighet och strålningsbalans. För alla tre

¹ Trädtytan approximeras med en cirkel, beräknad utifrån trädets radie.

datum gjordes analysen för både Östermalm och Hjorthagen, både med och utan vegetation.

SOLWEIG beräknar strålningstemperatur för varje timma. Dessutom beräknas dygnsmedelvärde och dagsmedelvärde. Dagsmedelvärde är medelvärdet beräknat för de timmar solen står över horisonten den aktuella dagen. I rapporten redovisas dagsmedelvärde samt värde klockan två på eftermiddagen, då strålningstemperaturen vanligtvis når sitt maximum.

Strålningstemperaturens procentuella fördelning över markytan samt min, max och medelvärde beräknades för ett avgränsat delområde på Östermalm och för tre avgränsade områden i Hjorthagen. På Östermalm utgörs området av kompakt bebyggelse utan andra öppna ytor än innergårdar och gator, se kartblad 1. I Hjorthagen utgör område **A** den planerade bebyggelse som motsvarar den nordöstra halvan av Norra 2. Område **B** utgör södra delen av det planerade området Västra, och område **C** slutligen befintlig bebyggelse på höjden söder om Tjärkajen och Ropsten, se kartblad 1.

Solstudie: analys av solinstrålning och skuggor

Den tid av dagen som en yta (pixel) är solbelyst beräknas i proportion till den tid solen står över horisonten. En pixel med värde ett (100%) är således solbelyst från det att solen går upp till dess den går ner. Värde noll (0%) innebär skugga under samma tid. Analysen kan göras både med och utan hänsyn till vegetation.

Analysen gjordes för tre datum: 21 mars (vårdagjämning), 21 juni (sommarsolstånd) och 21 december (vintersolstånd), med och utan vegetation och med 15 minuters tidsupplösning.

Begränsningar

Modeller försöker återskapa verkligheten och möjliggöra för experiment i en omfattning som i praktiken är omöjligt att genomföra genom till exempel mätningar i fält. I modellens natur ligger att vara en förenkling av verkligheten och därför är modeller ofullständiga; verkligheten är alltför komplex, inte minst så klimatet. Det innebär att en modell har sina begränsningar och det är viktigt att vara medveten om dessa när resultaten tolkas och diskuteras.

Med avseende på beräkning av strålningstemperatur och studier av klimatkomfort har SOLWEIG följande begränsningar:

1. Viss underskattning av reflekterad strålning från bebyggelse. Det innebär att den version av modellen som använts i undersökning (version 2.2) underskattar strålningstemperaturen nära husväggar. I tät bebyggelse, till exempel på innergårdar, kan därför det rumsliga mönstret bli inte riktigt rätt. En ny beräkningsmetod för reflekterad strålning kommer att introduceras i nästkommande version.
2. Angiven meteorologisk data är statisk för hela modellområdet, vilket inte ger en korrekt bild av verkligheten där lufttemperatur och luftfuktighet varierar på lokal skala.

3. Vind ingår inte i beräkningarna.
4. Marktäcke är en faktor som påverkar lokala variationer av meteorologiska parametrar som lufttemperatur och -fuktighet. Ingen hänsyn tas till marktäckte i nuvarande version av SOLWEIG.

Övriga begränsningar är främst relaterade till kvaliteten på det höjddata som används. Här är till exempel byggnaderna på Östermalm förenklade eftersom uppgift endast fanns om höjd till takfot. Upplösningen på rasterdata är också viktig för tolkningen av resultaten. En meters upplösning som används här är att anse som tillräckligt hög för att modellera lokala variationer runt byggnader och enskilda träd.

RESULTAT

Bebyggelse- och vegetationsstruktur

Studieområdenas karaktär med avseende på bebyggelsegeometri och vegetationsstruktur skiljer sig åt, vilket framgår av Tabell 1. Det valda delområdet av Östermalm har den tätaste bebyggelsestrukturen och är nästan till hälften bebyggt, 46 %. Av de tre områdena i Hjorthagen har område **A** den tätaste bebyggelsen, 39 %, och **C** den minst täta, 20 %. **B** ligger ungefär mitt emellan med 31 %. I genomsnitt har område **B** högst byggnader, område **A** något lägre och område **C** klart lägst. Östermalm har omkring samma medelhöjd som område A.

Vegetationen i område **A** och **B** täcker ungefär lika stor yta, runt 2,5 %, men träden är något högre i område **B**. Än högre vegetationen i område **C**, men här står träden glesare, 1,2 % täckning. På Östermalm är vegetationen mycket gles, mindre än en halv procent av ytan täcks här av vegetation.

TABELL 1. BEBYGGELSE- OCH VEGETATIONSSTRUKTUR.

	HJORTHAGEN			ÖSTERMARM
	A	B	C	
Byggnadsyt faktor	0,39	0,31	0,20	0,46
Medelhöjd byggnader	19,9	24,5	12,5	19,6
Träd ytefaktor	0,03	0,02	0,01	0,004
Medelhöjd träd	7,0	9,9	14,0	12,5
Antal träd per hektar	66,0	42,1	18,8	7,3

Solstudie: analys av solinstrålning och skuggor (Kartblad 1–6)

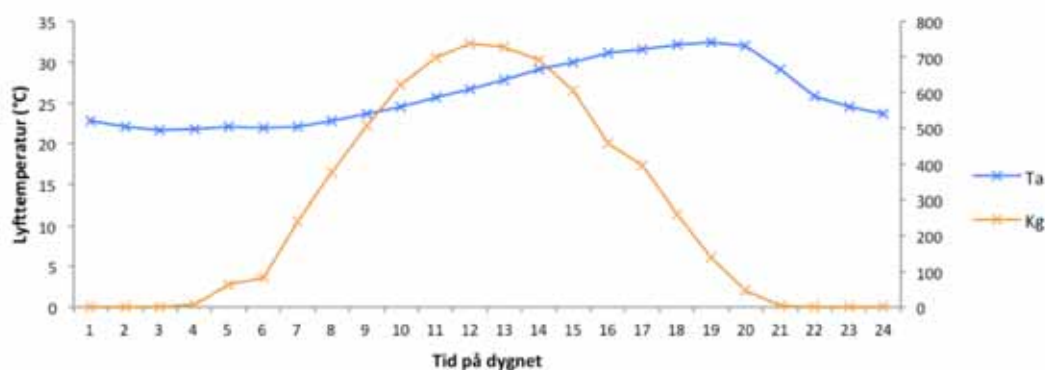
Lokala variationer i solinstrålning och strålningstemperatur beror till stor del på bebyggelsegeometrin, delvis beroende på att byggnader blockerar solinstrålning att nå vissa ytor vid en viss tidpunkt. Det innebär att klimatet varierar både i rummet och i tiden; under ett dygn eller ett år. Kartblad 1–6 visar solinstrålning i procent av en dag, det vill säga från soluppgång till -nedgång.

Resultatet av solstudien visar betydelsen av solhöjden och bebyggelsen. I tätbebyggda områden med höga hus är solinstrålningen vid marken nära noll under en dag, även sommardag då solen står högt. På Östermalm är medelsolinstrålningen under dagen runt midsommar endast 24 %, och 20 % om hänsyn tas till vegetation. Direkt kortvägig strålning får då en relativt sett mindre betydelse för strålningstemperaturen. Motsvarande siffror för område **C** är 58 % och 44 %.

Värt att notera är att topografin inte har stor betydelse sommartid, men vintertid står solen så pass lågt även mitt på dagen, att den relativt låga relief som topografin utgör ger ganska omfattande skuggor.

Strålningstemperaturens dygnsvariation på en öppen innergård

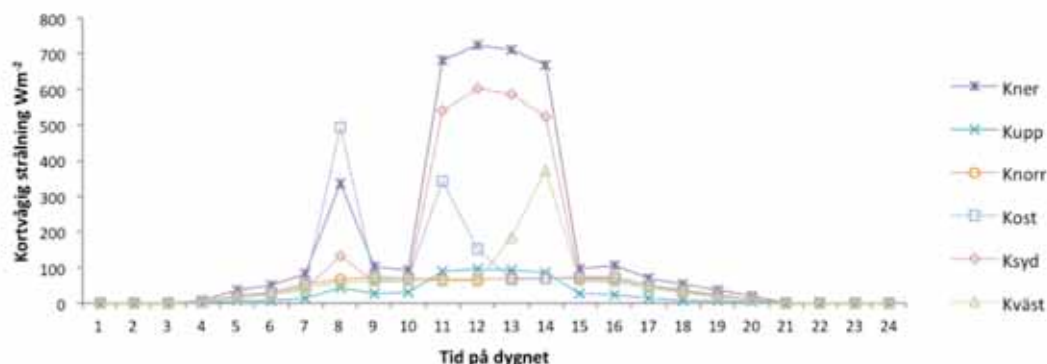
FIGUR 2 visar dygnsvariationen av global strålning och lufttemperatur under en klar sommardag för en specifik punkt i relativt stor och öppen innergård i den planerade bebyggelsen i Hjorthagen, planeringsområde Norra 1 (kartblad 1). Området har en liknande bebyggelsestruktur som studieområde B. Här är inte vegetation inkluderat. Den globala strålningen följer solkurvan och når sitt maximum mitt på dagen (800 W/m^2). Lufttemperaturen ökar under dagen och når vanligtvis sitt maximum under tidig eftermiddag. Här infaller lufttemperaturens maxima timmarna innan solnedgången, runt sjutiden på kvällen, vilket är något senare än normalt.



FIGUR 2. Lufttemperaturens (T_a) och den globala strålningens (K_g) variation 1994-07-28 i en specifik punkt, Hjorthagen, planeringsområde Norra 1. Data: SLB-analys samt SMHI.

En klar dag beror den kortvägiga strålningen, FIGUR 3, på om platsen i fråga ligger i skugga eller är solbelyst, samt vilken riktning som avses. I diagrammet syns tydligt skillnaden mellan sol och skugga, vid fem tidpunkter ligger den specifika platsen i sol: klockan 8.00, samt klockan 11.00–14.00. Klockan 8.00, är den östliga ($K_{öst}$) och den inkommande (K_{ner}) strålningen högst. Mitt på dagen när strålningen når maximum är den sydliga (K_{syd}) och inkommande strålningen högst. Klockan 11.00 finns fortfarande ett visst inslag från öst och klockan 14.00 börjar den västliga komponenten ($K_{väst}$) göra sig gällande. När platsen är i skugga (övriga tidpunkter) har den inkommande strålningen de högsta värdena, även om skillnaderna är små. Nattetid är den inkommande strålningen noll.

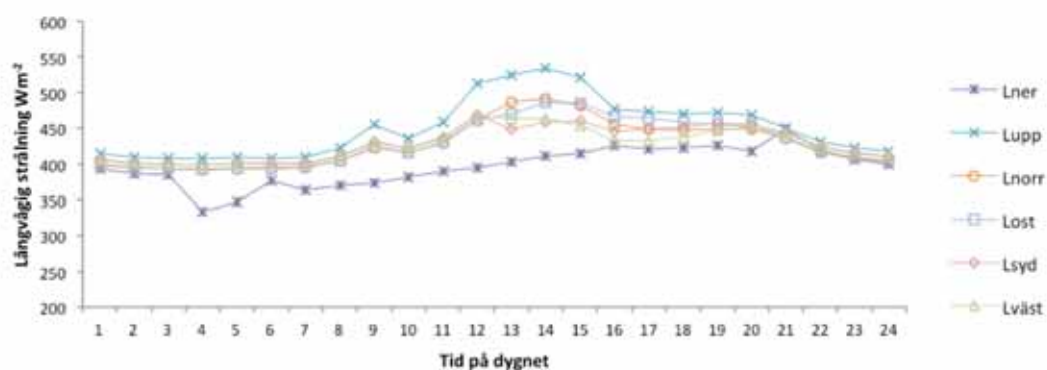
RUMSLIG VARIATION AV STRÅLNINGSTEMPERATUR I HJORTHAGEN OCH PÅ ÖSTERMARM



FIGUR 3. Modellerad kortvågig strålning 1994-07-28 i en specifik punkt, Hjorthagen, planeringsområde Norra 1.

Den långvågiga strålningen, FIGUR 4, främst emitterad från byggnader och från marken, är relativt konstant under dygnet vilket beror på värmelagringen. Liksom för den kortvågiga strålningen urskiljs lokala maxima i samband med att platsen är solbelyst (klockan 8.00 och 11.00–14.00). Strålningen från marken (L_{upp}) är genomgående högst. Till skillnad från den kortvågiga strålningen är L_{ner} genomgående lägst vilket beror på att himlen är kall jämfört med övriga strålningskällor. En plats nära en byggnad skulle ha ett större inslag av någon av de horisontella riktningarna, om ytemperaturen på byggnaden är tillräckligt hög.

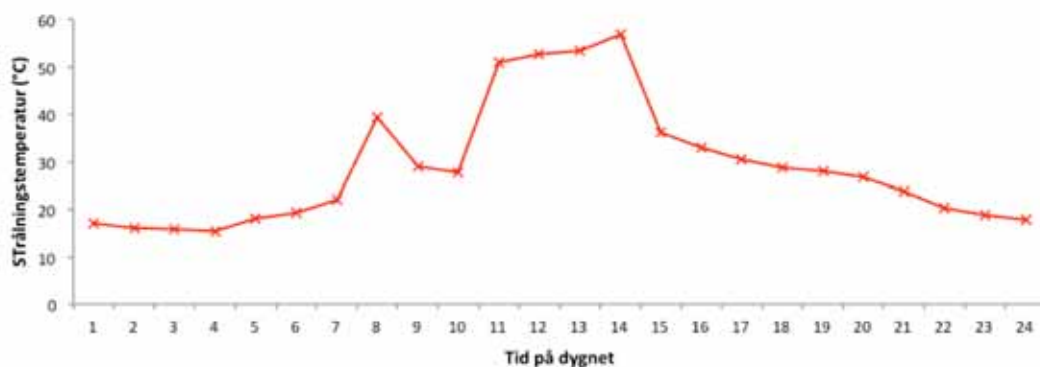
Den långvågiga strålningen hög även nattetid. Värt att notera är också att skillnaderna mellan de olika riktningsskomponenterna är små jämfört med kortvågig strålning. Skillnaderna är störst under dagen när omkringliggande ytor solbelyses i olika omfattning och vid olika tidpunkter.



FIGUR 4. Modellerad långvågig strålning 1994-07-28 i en specifik punkt, Hjorthagen, planeringsområde Norra 1. Notera att x-axeln börjar på 200 Wm^{-2} .

Strålningstemperaturen, FIGUR 5, som är en summering av både lång- och kortvågig strålning följer en kurva som kan ses som en kombination av diagrammen för dessa. Skillnaderna mellan sol och skugga är tydliga, men inte som i fallet med kortvågig strålning; den utjämnande effekten av den långvågiga strålningen är tydlig. Dock ökar

strålningstemperaturen mellan klockan 13.00 och 14.00, vilket inte är fallet med vare sig kort eller långvägig strålning. Det beror på fördröjningseffekter kopplat till den stigande lufttemperaturen. Fördröjningseffekten är dock alldeles för svag för att bibehålla en hög temperatur när platsen hamnar i skugga, som klockan 15.00.



FIGUR 5. Modellerad strålningstemperatur 1994-07-28 i en specifik punkt, Hjorthagen, planeringsområde Norra 1. Punkten är solbeyst kl. 8.00 samt kl. 11–14, vilket också tydligt framgår av diagrammet i FIGUR 3.

Strålningstemperaturens rumsliga variation

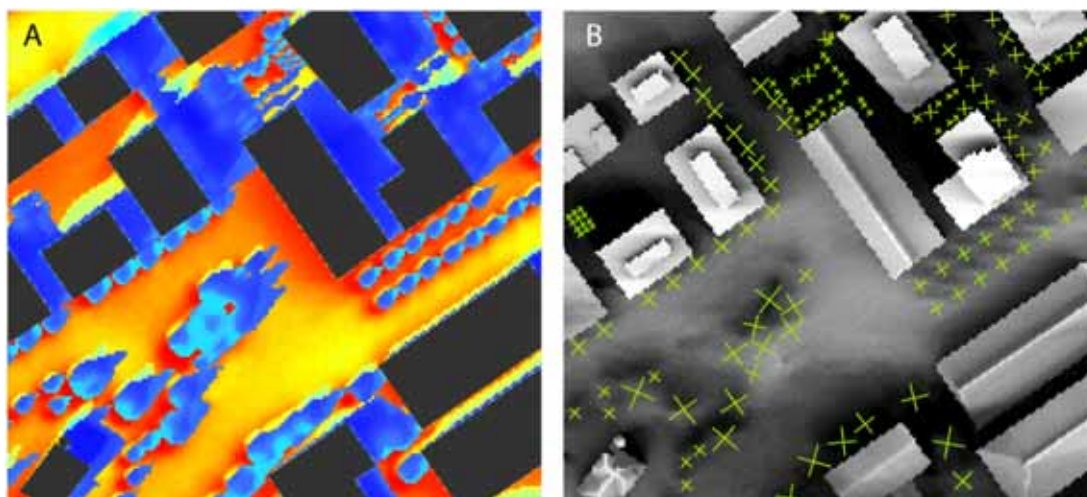
Dagsmedeltemperaturens (kartblad 8–11) rumsliga medelvärde är högst i område **C**, omkring 4–5 °C varmare än område **A** och **B**, som i sin tur är omkring 1,5 °C varmare än Östermalm. Skillnaderna är något mindre om hänsyn tas till vegetationen. Mellan område **A** och **B** är skillnaden mindre än 1 °C i båda fallen. Maximum- och minimumtemperaturerna skiljer sig inte nämnvärt åt mellan de olika områdena. Den högre medeltemperaturen i område **C** kan förklaras av den glesare och lägre bebyggelsen som i mindre utsträckning blockerar kortvägig strålning än den högre och tätare bebyggelsen i område **A** och **B** samt på Östermalm.

Trots att område **C** har en lägre trädtytefaktor, får vegetationen större genomslag här än i de två andra områdena. Det beror på att vegetationen generellt sett står mindre "skymd" av byggnader och att träden också i genomsnitt är högre. Vegetation i gles bebyggda områden påverkar således strålningstemperaturen mer än den gör i områden med tät och hög bebyggelse.

Skillnaden mellan område **C** och de två andra områdena blir tydligare om man tittar på den areella fördelningen av temperaturen, se diagram kartblad 8–9. Område **C** har en jämnare fördelning med en viss förskjutning mot högre temperaturer (runt 40–42 °C) medan det är en tydlig förskjutning mot lägre temperaturer i område **A** och **B** (runt 30–32 °C). I diagrammen syns också vegetationens mindre inverkan på strålningstemperaturen i område **A** och **B** jämfört med område **C**. I alla områdena skiftar dock fördelningen mot lägre temperatur när vegetationen inkluderas. Denna effekt är minst för Östermalm.

Kartorna i kartblad 12–13 visar strålningstemperaturen klockan 14.00 den 28 juli 1994. Som framgår av diagrammen ovan (FIGUR 5), är strålningstemperaturen då nära sitt dygnsmaximum. Skillnaderna mellan sol och skugga är stora över korta avstånd vilket framgår tydligt av både kartor och diagram. Ytor med "mellantemperaturer" är nästan obefintliga. FIGUR 6a visar en del av den planerade bebyggelsen i Hjorthagen, Norra 2, och här har färgskalan satts så att små variationer framhävs. Öppna ytor (gult och rött) är varma, drygt 60 °C och skuggor (blått) är mindre varma, ca 40 °C. Här syns också de små variationerna som uppkommer på grund av långvågig strålning från byggnader och vegetation (FIGUR 6). De öppna ytorna (gula) är något svalare än de ytor som ligger nära en solbelyst byggnad (rött). Den här effekten börjar göra sig gällande ca 10 meter från den stora byggnaden i mitten av bilden.

Temperaturhöjningen till följd av den reflekterade långvågiga strålningen under träd syns också. Trädets skugga är något förskjutet åt nordost (solinstrålningen är från sydväst) och under träden syns ett tydligt rött område. Trädets placering och storlek syns i FIGUR 6b. Även i skuggan av byggnader syns effekten av vegetation som ytterst vaga temperaturhöjningar (ljusblå).



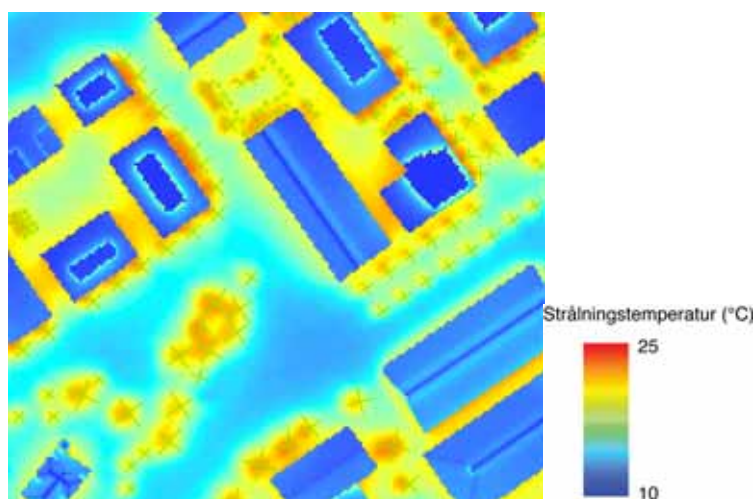
FIGUR 6. a) Strålningstemperatur klockan 14.00 den 28 juli 1994 Hjorthagen, Norra 2. Notera att skalan inte är linjär: gult till rött höga indikerar temperaturer, mörk- till ljusblått låga (jämför kartblad 12–13). b) vegetationens placering i samma område. Notera förhöjd temperatur under träden samt i närheten av solbelysta väggar.

Skillnaderna mellan de olika områdena klockan 14.00 följer ett annat mönster än dagsmedelvärdet. Område **C** är fortfarande klart varmast, 54.0 °C, följt av område **A**, 48,2 °C och område **B**, 42,9 °C. Klockan 14.00 är det alltså en betydande skillnad mellan område **A** och **B**. Orsaken kan vara skillnaden i bebyggelsehöjd samt orientering av byggnaderna. I område **B** är byggnaderna högre med stora innergårdar i skugga. Bebyggelsestrukturen är mer uppbruten i område **A** vilket gör att antalet solbelysta byggnadsytor är fler. Över dagen jämnar effekten ut sig vilket ger jämförelsevis liten skillnad i dagsmedelvärde mellan område **A** och **B**.

De högsta dagsmedeltemperaturerna återfinns på öppna ytor och på sydsidan av byggnader. På norrsidan är strålningstemperaturen relativt låg även mitt på dagen. Vegetation i söderläge ger därför en potentiellt större temperatursänkande effekt. Byggnadernas riktning spelar också roll: emitterad långvågig strålning från solbelysta fasader höjer strålningstemperaturen omkring en grad eller någon grad. Topografi har litet inflytande på dagsmedelvärde eftersom solen står högt stora delar av dagen och topografi har relativt sett låg relief.

Strålningstemperaturens variation på natten

Nattetid skiljer sig strålningsbalansen från dagtid på grund av den totala avsaknaden av kortvågig strålning. Långvågig strålning som emitteras från byggnader, vegetation och mark är den dominerande strålningskällan eftersom himlen är mycket kallare. Den värme som lagrats under dagen plus bebyggelsestätheten (himmelsavskärmningen) spelar därför stor roll för strålningstemperaturen under natten. I FIGUR 7 syns detta genom låg temperatur på öppna ytor som fort avsvalar och högre temperatur nära byggnader och vegetation, speciellt mellan byggnader och där vegetationen står nära dessa. Värt att notera är också oberoendet av väderstreck, vilket skiljer sig från dagtid då strålningstemperaturen generellt sett är högst i det väderstreck som vid en tidpunkt får mest solinstrålning, jämför FIGUR 6A. Tät och hög bebyggelse samt material som har hög värmelagringskapacitet ger upphov till värmeöar. Dessa kan vara lokala och effekten är störst under molnfria förhållanden då skillnaden i avkylning mellan olika områden är mindre. I FIGUR 7 är skillnaden mellan den kalla öppna ytan och de varmaste områden längs med husväggarna ungefär 10 °C (13 respektive 23 °C). En komplicerande faktor att ta hänsyn till nattetid är att lufttemperaturen, som till skillnad mot på dagen, uppvisar mycket större rumslig variation. Dessutom har vegetation en avkylande effekt på lufttemperaturen.



FIGUR 7. Strålningstemperatur kockan 02.00 28 juli 1994 Hjorthagen, Norra 2.

läktagelser från framtidsscenario (Kartblad 10–11, 14–15)

En höjning av lufttemperaturen på 2 °C innebär teoretiskt sett en höjning av strålningstemperaturens dagsmedelvärde med lite drygt 2 °C, beroende på att sambandet mellan de båda storheterna inte är linjärt (Lindberg 2008). Dagsmedeltemperaturens minimum ökar i alla områden ökar med 2,4 °C. Förändringen av maximum är mellan 3,1 och 3,3 °C. Ökningen i rumsligt medelvärde är 3,0 °C utan vegetation i område **B** och 3,0 °C med vegetation. I de andra områdena är förändringen några tiondels grad lägre.

Klockan 14.00 är skillnaderna mellan 1994 och framtidsscenario mindre än 2 °C. Det beror på att vid denna tidpunkt är den kortvågiga solinstrålningen mer dominerande och den högre lufttemperaturen påverkar strålningstemperaturen relativt sett mindre än under morgon och kväll. Skillnaderna mellan områdena är mycket små, men störst, 1,7 °C i område **B** och på Östermalm, vilket rimmar väl med resonemanget ovan; i dessa områden är den inkommande kortvågiga strålningen i större utsträckning blockerad av byggnader.

SLUTKOMMENTARER

Modellberäkningar visar på stora rumsliga och temporala skillnader i strålningstemperatur mellan och inom studieområdena Hjorthagen och Östermalm, beroende på mängden inkommande strålning och bebyggelsens utformning samt mängd och typ vegetation. Solexponerade områden i tät och hög bebyggelse är generellt sett varmare än gles och låg bebyggelse. Riktningen på gator och fasader har också stor betydelse, där strålningstemperaturen är högre i solbelysta gator och nära solbelysta fasader. Mitt på dagen är skillnaderna som störst. Medelvärdet över en dag tenderar att vara högre i gles bebyggda områden, eftersom solinstrålningen över tid är större där.

I skuggan av träd sjunker strålningstemperaturen. Effekten av vegetation är störst i gles och låg bebyggelse där vegetationen blockerar en relativt sett större del av inkommande strålning. Nattetid har vegetation en motsatt effekt eftersom den motverkar avsvälning framför allt i närhet till byggnader.

Både de rumsliga och temporala variationerna av de termiska förhållandena är viktiga från ett hälsoperspektiv; människor i bebyggda områden riskerar att utsättas för värmestress såväl dagtid som nattetid. Höga temperaturer nattetid gör att kroppen inte kyls av och återhämtar sig. Studier har visat på samband mellan lufttemperatur och dödlighet i hjärt- och kärlsjukdomar samt respiratoriska sjukdomar, men detta samband varierar mellan olika klimat beroende på människans och samhällets anpassning. Det optimala dygnsmedelvärdet för lufttemperatur i Sverige har beräknats till 12 °C medan den till exempel i Aten beräknats till 25 °C. Under och över dessa temperaturer ökar risken som följer en U- eller V-formad kurva. Motsvarande siffror för strålningstemperatur saknas. Det kan dock konstateras att strålningstemperaturen är en avgörande faktor vid uppskattning av olika index på termisk komfort, till exempel *physiological equivalent temperature* (PET) som är ett bättre mått än lufttemperatur. Strålningstemperaturen är därför av stor betydelse för uppskattning av hälsorisker. Värden på PET över 35 klassas som "hot" och förknippas med "strong heat stress". Sådana värden på PET har i studier sammanfallit med strålningstemperaturer över 50 °C (Matzarakis m.fl. 1999).

REFERENSER

- 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.
- Berdahl, P. & Bretz, S. 1997: Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings* 25:149–158.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- IPCC. 2007. AR4 Synthesis report, Full Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html (Besökt: 2012-04-02).
- Lindberg, F., 2007. Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorological Applications*, 14(3), pp.263–273.
- Lindberg, F., Holmer, B. & Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), pp.697–713.
- Lindberg, F. & Grimmond, C.S.B., 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3-4), pp.311–323.
- Matzarakis, A., Mayer, H. & Iziomon, M.G. 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), pp.76–84.
- Mayer, H. & Höppe, P. 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* 38:43–49.
- 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.
- Norman, M. 2011. *Sommartemperaturen i Stockholm*. Stockholm: SLB-analys (SLB 3:2011)
- 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.
- 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.
- Sham, S. 1990: Urban climatology in Malaysia: an overview. *Energy and Buildings* 15:105–117.
- 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.
- 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 2012. Stadsklimatet - åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI rapport; FOI-R-3415, 43 s
- 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.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R. 2003: Thermal remote sensing of urban areas. *Remote Sensing of Environment* 86:370–384.