

RAPPORT
STRÅLNINGSKARTAN STOCKHOLM



2014-12-12

Uppdrag: 259433, Strålningskartan Stockholm

Titel på rapport: Strålningskartan Stockholm

Status: Koncept

Datum: 2014-12-12

Medverkande

Beställare: Miljöförvaltningen, Stockholms stad

Kontaktperson: Anette Jansson

Konsult: Tyréns AB

Uppdragsansvarig: Fil. dr Per Jonsson

Kvalitetsgranskare: Fil. dr Fredrik Lindberg, Göteborgs Universitet

Tyréns AB

Lilla Badhusgatan 2
411 21 Göteborg

Tel: 010 452 20 00
www.tyrens.se

Säte: Stockholm
Org.Nr: 556194-7986

Sammanfattning

Strålningstemperaturen (T_{mrt}), 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 bebyggelsegeometri och vegetationsstruktur, eftersom dessa bla. bestämmer mängden solinstrålning som når marken och fasaderna. Bebyggelsens och vegetationens påverkan på strålningstemperaturen kan modelleras med modellen SOLWIEG utifrån geografisk information (höjddata som representeras av mark, byggnader och vegetation) samt meteorologisk data (lufttemperatur, relativ luftfuktighet och global strålning).

I denna rapport redovisas resultatet av modellberäkningar gjorda för Stockholms stad avseende en solig och varm sommardag (28 juli 1994). Vidare har effekten av en ökning av sommartemperaturen med 2 °C respektive 4 °C simulerats i syfte att grovt uppskatta konsekvenserna av ett framtida varmare klimat på strålningstemperatur och hälsorisk. Dagsmedelvärde av T_{mrt} situationen klockan 14.00 avseende T_{mrt} samt identifiering av riskområden rapporteras.

Modellberäkningarna visar på skillnader mellan olika bebyggelsestrukturer och förekomst av vegetation i form av träd och buskar. Generellt sett är gles och låg bebyggelse varmare än tät och hög bebyggelse. Detta beror på att hög och tät bebyggelse i större utsträckning blockerar den inkommande strålningen som har stor betydelse för strålningstemperaturen. Strålningstemperaturen är dock högre i tät bebyggelse, i fallet med områden i direkt anslutning till solexponerade väggar. Detta beror på att fasader och träd är varma, till följd av reflekterad och emitterad långvågig strålning. Liksom byggnader ger träd upphov till skugga vilket sänker strålningstemperaturen, särskilt i gles och låg bebyggelse.

På stadsdelsnivå bidrar vegetation till en allmän reduktion av strålningstemperaturen. Då stadsdelsområdena är stora, och där det finns stora variationer inom varje område, blir skillnaden mellan stadsdelar relativt små. Stadsdelar med större andel vegetation har lägre strålningstemperaturer jämfört med mer urbana stadsdelar. Detta resultat blir tydligare då Stockholms stad indelas i rutnät om 500x500 m och analyseras separat.

Klimatförändringsscenarier om +2 °C respektive +4 °C visade att en ökad lufttemperatur medför att främst solbelysta väggytor kommer att bidra till en ökad nivå av strålningstemperatur. Även i detta fall har vegetation en sänkande effekt på strålningstemperaturen och därmed upplevd komfort.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	7
1.1	Allmänt om strålningsbalansens roll för stadsklimatet.....	7
1.2	Strålningstemperatur och koppling till hälsorisk	9
1.3	Tidigare studier av strålningstemperatur i Stockholm.....	9
2	Syfte.....	9
3	Metod.....	10
3.1	Beräkningsmetod	10
3.2	Geografisk avgränsning och val av nuläge.....	10
3.3	Indata	10
3.3.1	Höjd- och vegetationsdata	10
3.3.2	Meteorologisk data.....	11
3.4	Scenarioanalyser	11
4	Resultat	13
4.1	Rumsliga variationer av strålningstemperatur på gatunivå	13
4.2	Rumsliga variationer av strålningstemperatur på stadsnivå	13
4.3	Rumsliga variationer av strålningstemperatur på stadsdelsnivå	15
4.4	Iakttagelser från framtidsscenerierna (+2 °C respektive +4 °C)	15
5	Diskussion och slutsatser	17
6	Referenser.....	18
7	Appendix	20
7.1	Sammanställning av leveransens delar	20
7.1.1	PDF	20
7.1.2	Shp.....	20
7.1.3	Geotif.....	20

1 Inledning

Föreliggande rapport redovisar resultatet av en analys av lokala variationer i strålningstemperatur inom Stockholms stad. Bakgrunden till arbetet är den uppmärksamhet som temperaturrelaterade hälsoproblem fått i ljuset av förväntade klimattförändringar; 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.

1.1 Allmänt om strålningsbalansens roll för stadsklimatet

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).

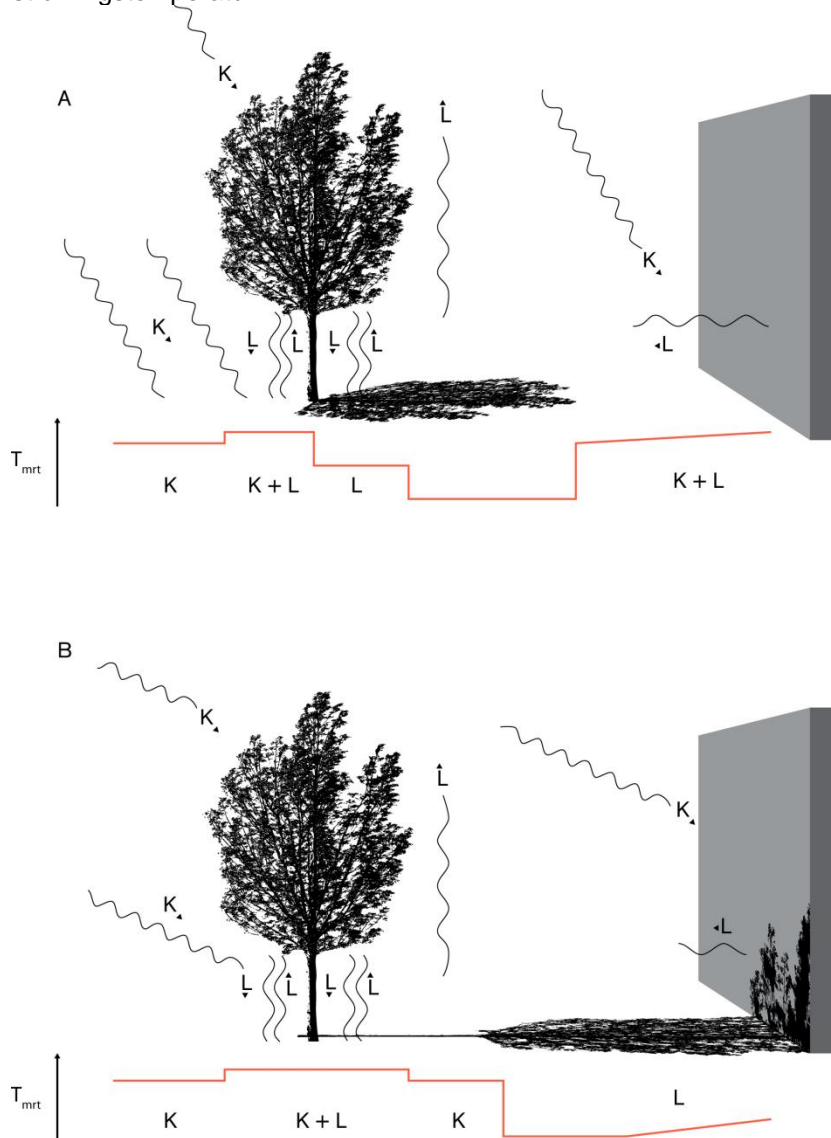
Stadsklimatet är generellt sett varmare än klimatet i obebyggda och glest bebyggda områden vilket främst beror byggnadsmaterialens förmåga att absorbera och lagra värme, hur tätt husen står och hur höga de är, samt andelen hårdgjorda ytor (Oke m.fl. 1991). Denna skillnad i lufttemperatur mellan stad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

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 temperatur-skillnader (Oke m. fl. 1991). Även mängden vegetation är av stor betydelse. Under klara och varma sommandagar 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 (Voogt & Oke 2003). Trots stora skillnader i yttemperatur gör dock luftens omblandning att motsvarande skillnader i lufttemperatur är små eller obefintliga dagtid (Mayer m.fl. 2008). Tätbebyggda områden kan till och med vara svalare dagtid eftersom byggnaderna skuggar omgivande ytor (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 sommandagar 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 (Thorsson m.fl. 2011). Skillnader i bebyggelse-geometrin ger därför upphov till stora skillnader i strålningstemperatur under klara sommandagar (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 (se tex. Upmanis m.fl. 1998). Precis som byggnader har träd större inverkan på strålningstemperaturen än på

lufttemperaturen (Lindberg & Grimmond 2011b). Medan lufttemperaturen endast är någon grad lägre under ett träd jämfört med en solbelyst plats en varm och solig sommardag, kan strålningstemperaturen vara 30°C lägre under trädet, vilket motsvarar en upplevd temperaturskillnad på 14°C (Mayer m.fl. 2009).

Figur 1 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.



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.

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 väggar i skugga vilka generellt sett får en lägre ytemperatur 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).

1.2 Strålningstemperatur och koppling till hälsorisk

I en nypublicerad studie genomförd i Stockholmsregionen visar att strålningstemperatur har en större förklaringsgrad relaterat till hälsa jämfört med lufttemperatur (Thorsson et al. 2014). Studien visar att risken för värmerelaterad dödlighet är störst för åldersgruppen över 80 år och då framförallt relaterat till höga strålningstemperaturvärden dagtid. Vid strålningstemperaturer över 59.4 °C identifierades en 10 % högre mortalitetsrisk för äldre över 80 år. Andra åldersgrupper är också utsatt för risk men inte i samma utsträckning som den övre åldersgruppen.

1.3 Tidigare studier av strålningstemperatur i Stockholm

Undersökning av strålningstemperaturen inom ett tidigare projekt som avsåg Östermalm och Hjorthagen visade att områden med gles och låg bebyggelse är varmare än områden med tät och hög bebyggelse. Vegetation har också en kylande effekt pga. skuggeffekter och pga. att trädens lövverk generellt sett är kallare än andra hårdgjorda ytor (Lindberg m.fl. 2012).

2 Syfte

Det övergripande målet med föreliggande projekt är att uppskatta risken för ohälsa kopplad till värmeböljor genom att modellera den rumsliga variationen av strålningstemperatur och solinstrålning i likhet med tidigare projektet som beskrivs ovan. Skillnaden är att beräkningarna i det projekt som här beskrivs omfattar hela Stockholms stad. Modelleringen utförs i SOLWEIG (*The Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry model*), en mjukvara designad för analys av strålningsflöden i urbana utomhusmiljöer. Metoden, som utvecklats av stadsklimatgruppen vid Göteborgs Universitet, möjliggör analys av olika scenarier och effekten av olika planeringsstrategier kan utvärderas.

Vidare är syftet att analysera strålningstemperaturlag för en varm sommardag, för de olika stadsdelarna inom Stockholms stad, utifrån olika scenarier:

- Scenario nuläge, med och utan vegetation
- Scenario +2 °C, med och utan vegetation, samt
- Scenario +4 °C, med och utan vegetation.

3 Metod

3.1 Beräkningsmetod

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 höjddatamodell (DSM) 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 höjddatamodellen och därmed göra analysen med hänsyn till vegetation (Lindberg & Grimmond 2011).

3.2 Geografisk avgränsning och val av nuläge

Området för beräkningen och analysen omfattar hela Stockholms stad. SOLWEIG har en begränsning på hur stora raster som kan analyseras på grund av beräkningskapacitet. Beräkningarnas upplösning är därför 2 meter per pixel.

Avseende analyserade tidsperioder kommer samma metod att användas som i projektet som avsåg Hjorthagen och Östermalm. Strålningstemperatur beräknades för en värmebölja, den 28 juli 1994. Dessutom analyserades ett förenklat framtidsscenario med en förhöjd lufttemperatur på två respektive fyra grader och en därtill anpassad relativ luftfuktighet.

Det är viktigt att notera att klimatförändringsscenarioet 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.

Analyserna, som avser marknivå, är gjorda på

- Stockholms stad indelad i stadsdelar (14 till antalet),
- Stockholms stad indelad i rutnät (500x500 m, 1014 till antalet).

3.3 Indata

3.3.1 Höjd- och vegetationsdata

Höjddata för Stockholms stad insamlades, dels laserdata (>2 punkter/m²; LAS-format) och dels byggnadskuber (3D; shape-format). En rastermodell skapades som i kombination med markhöjd till gav en komplett *digital elevation model* (DEM). Upplösningen på rastren var som tidigare nämnts två meter per pixel och kartprojektion var SWEREF 99TM 18,00.

Utifrån geometriska data skapar SOLWEIG också en höjddatamodell för vegetation som används i kombination med den ovan beskrivna höjddatamodellen för att beräkna strålningstemperatur. Genom att hantera vegetation som ett separat dataset är det enkelt att göra analyser både med och utan vegetation. I den laserdata som levererats av Stadsbyggnadskontoret, Stockholms stad, finns klassificering av markanvändning. Dessa är vatten, vegetation, mark och byggnad. Två höjddatamodeller skapades: en modell med vegetation och en utan.

Laserscanningen gjordes 2012 vilket innebär att analyserna inom projektet avser denna tidpunkt. Eventuella förändringar i bebyggelse och vegetation under 2013 och 2014 ingår inte i karteringen, och inte heller planerade framtida förändringar.

Observera att med vegetation avses här träd och buskar. Vegetation i form av marktäcke, såsom gräsmattor, är ej möjliga att inkludera i analysen då detta inte är inkluderat i befintlig SOLWEIG-modell. Detta arbete pågår och planeras vara färdigt under 2015. Preliminära resultat visar att olika marktäcke har relativt liten påverkan på strålningstemperaturen i

jämförelse med påverkan från direkt solinstrålning. Studier visar också att ljusa och mörka byggnadsmaterial inte har någon större effekt på strålningstemperaturen. Detta beror på att; mörka ytor emitterar stora mängder värmestrålning men samtidigt reflekterar de också mycket lite av den kortvågiga solinstrålningen. Det omvända förhållandet gäller för ljusa väggytor (Erell et al. 2014).

Volymer för både byggnader och vegetation har beräknats eftersom dessa parametrar till viss del styr T_{mrt} . Dessa volymer har dividerats med markens areal (tex. stadsdelars yta) för att ge en mått på täthet (byggnads- och vegetationsintensitet). Dessa har använts i förekommande fall för att förklara modellerade värden av T_{mrt} .

3.3.2 Meteorologisk data

I SOLWEIG anges meteorologiska data bestående av timvis uppmätt lufttemperatur (T_a), relativ fuktighet (RH) samt global, diffus och direkt kortvågig 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 respektive fyra grader över hela dygnet.

För att få en tydligare bild av områden där värmerelaterad risk kan identifieras är riskkartor framräknade. Riskkartorna visar antalet timmar som ett område överstiger ett visst strålningstemperaturvärde. Baserat på tidigare forskning används ett tröskelvärde på 59.4 °C (se avsnitt 1.2 för vidare beskrivning).

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 förbises. Dessa lokala variationer kan dock negligeras då lufttemperaturens rumsliga variation dagtid är mycket liten.

Då rumslig beskrivning av vind inte finns inkluderat i SOLWEIG-modellen kan man inte beräkna den kylande effekt som påverkar en människas termiska komfort fast då analysen i denna studie behandlar en hörtrycksbetonad mycket varm dag förutsätter man mycket låga vindhastigheter och därmed mycket liten inverkan av vinden kylande effekt. Planerad utveckling av SOLWEIG-modellen inkluderar även vind (Johansson et al. 2014).

Då större och mindre vattenytor är rikt förekommande inom Stockholms stad kan dessa påverka det lokala klimatet. Vatten har allmänt en kylande effekt på grund av sin höga värmekapacitet. Denna effekt är dock liten om man ser till luftens temperatur vid vindstilla förhållanden. Det är då endast i mycket nära anslutning som man kan se någon effekt av vatten. En större effekt uppnås då vindsystem kan transportera in kallare luft från intilliggande vatten, sk. advektion. Stora vattenytor skapar också en öppenhet där vinden kan "ta fart". Detta kan påverka den termiska komforten hos människor då värme kan ledas bort från kroppen, sk. "wind chill". För att denna kylande effekt ska gynna större landområden måste det finnas öppna passager där vinden kan komma fram. Dessa passager kommer då vara solbelysta och vara allmänt varma under dagar med hög risk för värmestress, dvs. varma och soliga dagar med mycket små vindhastigheter.

3.4 Scenarioanalyser

Det är möjligt att analysera och jämföra olika scenarion i SOLWEIG. Det som avses med scenarier i detta fall är framräknad strålningstemperatur, och i förlängningen hälsorisk, då olika förutsättningar kombineras. Dessa förutsättningar är

- Olika tidpunkter (nutid vs. framtid). Om en analys av strålningstemperatur utgår ifrån att en sommardag idag inte är direkt påverkad av klimatförändringar kan den sägas utgöra ett utgångsläge, eller nuläge. Detta nulägesscenario kan jämföras mot framtidsscenarioer där utgångspunkten är att lufttemperaturen förmodas öka. Två sådana framtidsscenarioer ingår i analysen (+2 °C samt +4 °C) förutom nulägesscenarioet (± 0 °C).
- Olika fysiska attribut på stadsbilden (med vegetation vs. utan vegetation). Här avses effekten av vegetation (träd och buskar) på strålningstemperaturen. På så sätt kan en indikation fås på vilken effekt olika typer av åtgärder vid planering kan tänkas få på temperaturen i bebyggelsemiljön.
- Olika tider på dygnet (kl 14.00 vs. hel sommardag). En analys kan beskriva strålningstemperatur/hälsorisk kl 14.00, eller ett medelvärde för hela dagen.

Utifrån olika tidpunkter, olika fysiska attribut på stadsbilden, samt olika tider på dygnet kan scenarier byggas. Följande scenarier analyseras inom ramen för projektet avseende T_{mrt} och resulterande riskkarta:

- **Strålningstemperatur/hälsorisk nuläge:** modellering av strålningstemperatur för Stockholms stad. Baserat på forskningsresultat om relaterade ohälsotal upprättas riskkartor. Analysen omfattar
 - T_{mrt} hel sommardag (medelvärde) med och utan vegetation
 - T_{mrt} kl 14.00 med och utan vegetation
 - ➔ riskkarta för hel sommardag (med och utan vegetation)
- **Strålningstemperatur/hälsorisk framtidsscenario +2 °C:** En modellkörning av strålningstemperaturen enligt ovan, men med förändrad temperatur utförs för att efterlikna en förmodad framtida klimatförändring om +2 °C. Denna beräkning är mycket förenklad då detta inte inkluderar tänkbara feedbackeffekter som till exempel förändring av molnmängd etc. Analysen omfattar
 - T_{mrt} hel sommardag (medelvärde) med och utan vegetation
 - T_{mrt} kl 14.00 med och utan vegetation
 - ➔ riskkarta för hel sommardag (med och utan vegetation)
- **Strålningstemperatur/hälsorisk framtidsscenario +4 °C:** En modellkörning av strålningstemperaturen enligt ovan, men med förändrad temperatur om +4 °C. Analysen omfattar
 - T_{mrt} hel sommardag (medelvärde) med och utan vegetation
 - T_{mrt} kl 14.00 med och utan vegetation
 - ➔ riskkarta för hel sommardag (med och utan vegetation).

4 Resultat

Analysresultaten av strålningstemperatur och tillhörande hälsoriskanalys på olika rumsliga nivåer visas nedan.

4.1 Rumsliga variationer av strålningstemperatur på gatunivå

Ett exempel på hur T_{mrt} varierar över små områden visas i Figur 2. Figur 2a visar T_{mrt} kl 14.00 för Medborgarplatsen i centrala Stockholm. De största variationerna skapas av skuggor från byggnader och vegetation. De högsta värdena av T_{mrt} hittas i anslutning till solbelysta väggar eller på solbelysta öppna platser. Anledningen till att öppna platser också får höga värden T_{mrt} beror på en ökad molnighet kl 14.00 vilket ökar andelen diffus kortvågig strålning. De höga värdena av T_{mrt} i anslutning till väggar beror på emitterad långvågig strålning (dvs. värmestrålning) och reflekterad kortvågig strålning från de solbelysta väggarna.

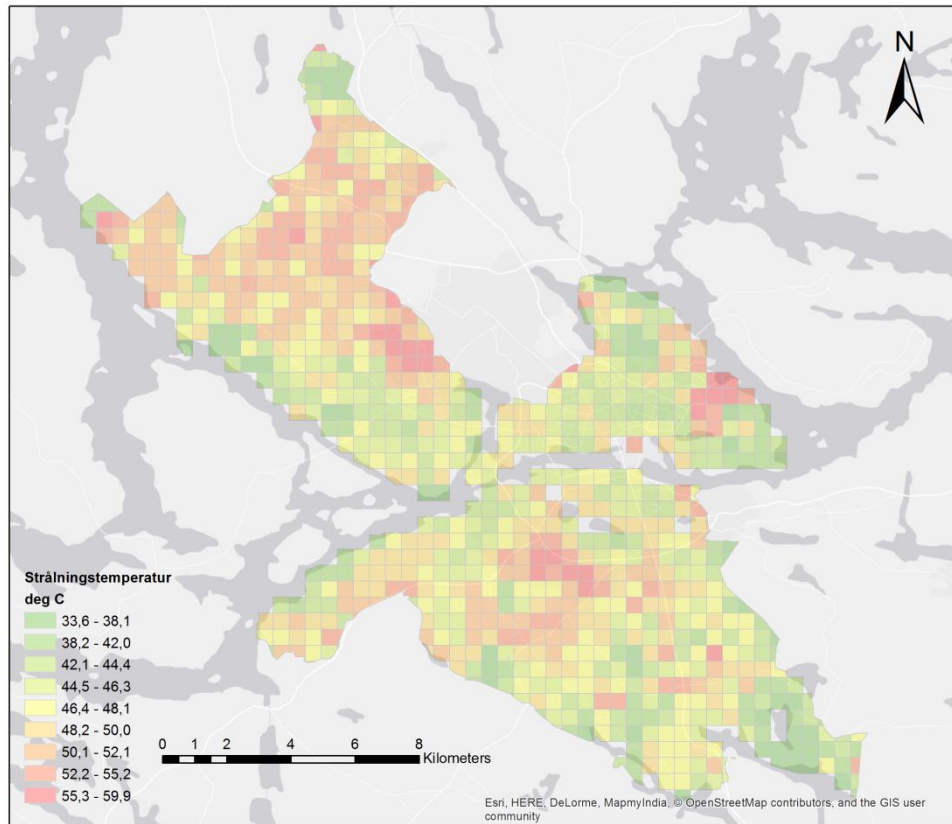
Figur 2b visar antal timmar som en beräkningspunkt (pixel) överstiger 59.4 °C, vilket representerar en ökning av risken för värmerelaterad dödlighet med 10 % för personer > 80 års ålder (Thorsson et al. 2014). Högst risk identifieras i anslutning till solbelyst bebyggelse. En mindre risk identifieras även ute på Medborgarplatsen torgyta.



Figur 2. Strålningstemperatur (T_{mrt}) kl 14.00 (a) samt riskkarta baserad på antal timmar som en beräkningspunkt överstiger $T_{mrt} > 59.4$ °C (b).

4.2 Rumsliga variationer av strålningstemperatur på stadsnivå

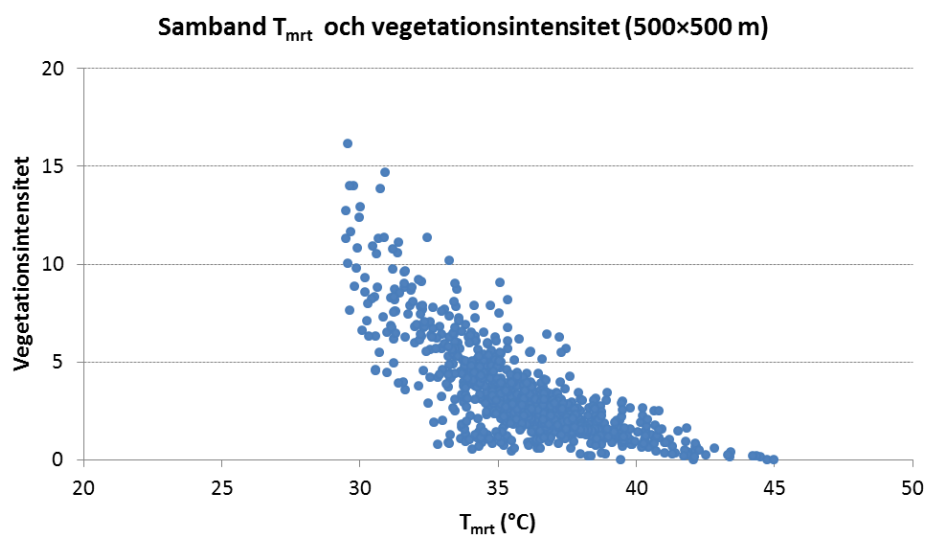
I Figur 3 visas strålningstemperaturen (T_{mrt}) kl 14.00 uträknat som medel för vardera ruta i 500x500-rastret. Vid första anblick är inget mönster på fördelningen av olika medelstrålningstemperaturer på marknivå tydligt.



Figur 3. Geografisk fördelning av T_{mrt} inom Stockholms stad (500x500 m).

För att undersöka eventuella geografiska skillnader vidare relateras T_{mrt} kl 14.00 med hur stora byggnads- respektive vegetationsintensitet som finns inom respektive ruta.

Bebyggelseintensitet och T_{mrt} visar inget starkt samband, däremot finns ett tydligt samband mellan T_{mrt} kl 14.00 och vegetationsintensitet (Figur 4).



Figur 4. Samband mellan T_{mrt} en sommardag och vegetationsintensitet i 500x500-rutorna.

4.3 Rumsliga variationer av strålningstemperatur på stadsdelsnivå

I Tabell 1 beskrivs medel T_{mrt} för respektive stadsdel i Stockholms stad (situationen för hel sommardag och för kl 14.00) tillsammans med byggnads- och vegetationsintensitet (volym av byggnader och vegetation per enhet markyta).

Tabell 1. Medel T_{mrt} för respektive stadsdel tillsammans med byggnads- och vegetationsintensitet.

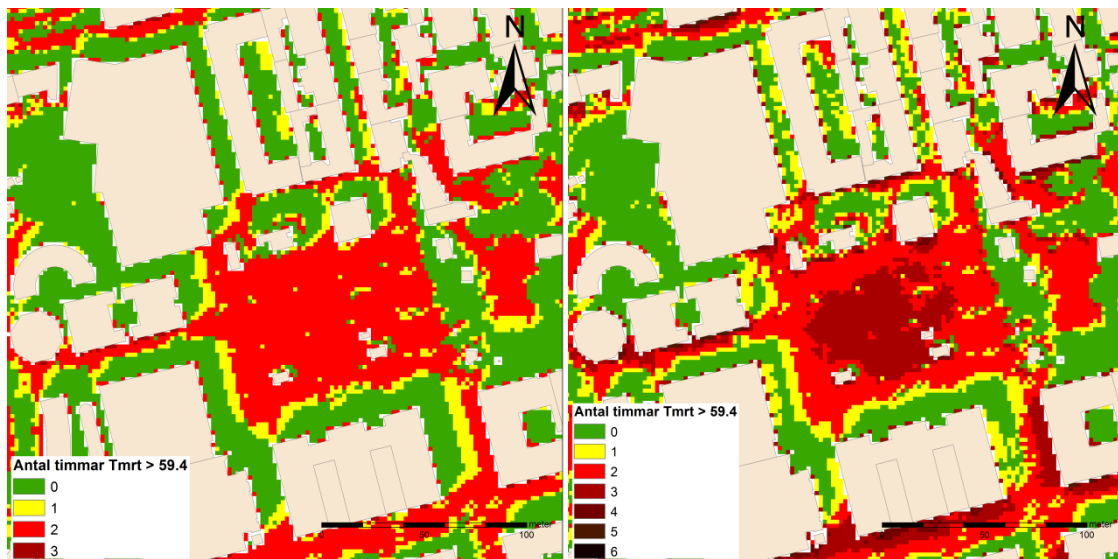
Stadsdel	Medel T_{mrt} (sommardag)	Medel T_{mrt} (kl 14.00)	Byggnadsvolym per enhet markyta (byggnads- intensitet)	Vegetations- volym per enhet markyta (vegetations- intensitet)
Bromma	36,1	46,9	0,7	3,6
Enskede-Årsta-Vantör	36,3	47,8	0,9	3,1
Farsta	35,4	45,8	0,5	4,1
Hägersten-Liljeholmen	36,1	47,7	1,2	2,5
Hässelby-Vällingby	36,5	47,9	0,6	3,4
Kungsholmen	35,4	46,4	3,4	2,2
Norrmalm	35,4	46,8	5,4	1,2
Rinkeby-Kista	36,7	47,7	1,2	4,0
Skarpnäck	34,1	43,1	0,4	5,3
Skärholmen	35,9	47,0	0,7	3,4
Spånga-Tensta	38,2	50,8	0,6	2,1
Södermalm	36,0	47,5	3,3	1,8
Älvsjö	36,3	47,9	0,7	2,9
Östermalm	35,3	45,2	1,5	4,5

Ur tabellen går det att utläsa att Farsta och Skarpnäck har högst vegetationsintensitet, vilket också ger lägst medel T_{mrt} .

4.4 Iakttagelser från framtidsscenarierna (+2 °C respektive +4 °C)

Resultaten ovan speglar förekommande förhållanden under varma sommardagar. Vid en framtida klimatförändring kan dessa förhållanden väntas bli varmare. I Figur 6 visas riskförhållandena, återigen vid Medborgarplatsen, som åstadkoms vid +2 °C respektive +4 °C temperaturökning.

I jämförelse med nuläggsscenarioet (se Figur 2b) ökar värmerelaterad risk på öppna platser och intill solbelysta väggar. En observation är att väggarnas roll blir viktigare ju högre lufttemperaturen blir eftersom väggarna ökar i temperatur medan kortvägig solinstrålning på öppna platser i princip förblir konstant.



Figur 6. Riskkarta baserad på antal timmar som en beräkningspunkt överstiger $T_{mrt} > 59.4$ °C: a) vid 2 °C högre lufttemperatur samt b) vid 4 °C högre lufttemperatur.

5 Diskussion och slutsatser

Modellberäkningar visar på stora rumsliga och temporala skillnader i strålningstemperatur mellan och inom Stockholms stad, beroende på mängden inkommande strålning och bebyggelsens utformning samt mängd och typ vegetation. Solexponerade områden i tät och hög bebyggelse är generellt sett något varmare än gles och låg bebyggelse. Dock är skillnaden mycket liten. 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 störst. Medelvärdet över en dag tenderar att vara högre i glest bebyggda områden, eftersom solinstrålningen över tid är större där.

I skuggan av träd sjunker strålningstemperaturen T_{mrt} . Effekten av vegetation är störst i gles och låg bebyggelse där vegetationen blockerar en relativt sett större del av inkommande strålning.

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.

På stadsdelsnivå bidrar vegetation till en allmän reduktion av strålningstemperaturen. Då stadsdelsområdena är stora, och då det finns stora variationer inom varje område, blir skillnaden mellan satsdelar relativt små. Dock kan man se att stadsdelar med större andel vegetationsintensitet har lägre strålningstemperaturer jämfört med mer urbana stadsdelar.

Då scenarierna som använts i denna studie endast innebär en höjning av lufttemperaturerna påverkar detta de rumsliga variationerna av T_{mrt} på ett visst sätt. Man kan dock fastställa att solinstrålningen under klara förhållanden inte kommer att förändras. En ökning i lufttemperaturen påverkar däremot indirekt väggarnas temperatur till en högre grad i jämförelse med den inkommande värmestrålningen från luften. Detta medför att områden nära solbelysta väggar under klara och varma dagar i framtiden kan identifieras som problemområden.

För att minska områden med hög risk rekommenderas användning av skuggor, främst från vegetation men även från byggnader vid nyetablering.

6 Referenser

- Berdahl, P. & Bretz, S. 1997: Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings* 25:149–158.
- 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.
- Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D. and Kutiel, P.B., 2014. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10:2, 367–386.
- 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).
- Johansson, L., Onomura, S., Lindberg, F. & Seaquist, J. (2014) Towards the modelling of pedestrian wind speed using high resolution digital surface models and statistical methods. Submitted to *Theoretical and Applied Climatology*.
- Lindberg, F., Johansson, L., Thorsson, S., 2012. Rumslig variation av strålningstemperatur i Hjorthagen och på Östermalm. Rapport Stadsklimatgruppen, Institutionen för Geovetenskaper, Göteborgs Universitet. 20 s.
- 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.
- 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. *Sommartemperaturer 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.
- Thorsson, S., Rocklöv, J., Konarska, J., Lindberg, F., Holmer, B., Dousset, B. & Rayner, D. 2014. Mean radiant temperature - A predictor of heat related mortality. *Urban Climate*. Epub ahead of print. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.01.004
- Thorsson S 2012. Stadsklimatet - åtgärder för att sänka temperaturen i bebyggda områden. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI rapport; FOI-R-3415, 43 s
- 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.



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.

7 Appendix

7.1 Sammanställning av leveransens delar

Alla filer med geografisk information är i SWEREF99 18 00.

7.1.1 PDF

Samtliga analyser är med vegetation och med uppmätt temperatur.

- En karta i .pdf format för varje stadsdel. Kartan visar antal timmar under den analyserade dagen där beräknat T_{mrt} överstiger 59.4 °C.

7.1.2 Shp

Samtliga analyser är med vegetation och med uppmätt temperatur

- analys_rutnät.shp: medel och maxstrålningstemperatur i 500×500 metersrutor.
Attribut
 - medTmrtDag: Medelvärdet av beräknad medelstrålningstemperatur över hela dagen
 - maxTmrtDag: Högsta T_{mrt} (medel för området) beräknad över hela dagen
 - medTmrtKl2: Medelvärdet av beräknad T_{mrt} (medel för området) kl 14.00
 - maxTmrtKl2: Högsta beräknade T_{mrt} kl 14.00
- medel_tmrt_stadskarta.shp: medelstrålningstemperatur per stadsdel
Attribut
 - medTmrtDag: Medelvärdet av beräknad medelstrålningstemperatur över hela dagen
 - medTmrtKl2: Medelvärdet av beräknad medelstrålningstemperatur kl 14.00

7.1.3 Geotif

- Riskkarta: antal timmar på en dag där strålningstemperaturen i en punkt överstiger 59.4 °C
- Tmrt kl 14: beräknad strålningstemperatur kl 14.00
- Tmrt medelvärde: medelvärdet av strålningstemperaturen sätt över hela dagen.

Varje mapp har två undermappar, "med veg" och "utan veg", som anger om analysen gjordes med eller utan hänsyn till vegetation. I vardera av dessa mappar finns mapparna "dagsläge", "plus 2 grader" och "plus 4 grader", som anger om analysen gjordes med uppmätt temperatur, 2 grader över uppmätt temperatur eller 4 grader över uppmätt temperatur. I varje av de mapparna finns 15 geotif filer, en för varje stadsdel och en för hela Stockholm.