



Folkhälsomyndigheten

Värmestress i urbana utomhusmiljöer

Förekomst och åtgärder i befintlig bebyggelse



Värmestress i urbana utomhusmiljöer

Förekomst och åtgärder i befintlig bebyggelse

Bindningar och jäv

För Folkhälsomyndighetens egna experter och sakkunniga som medverkat i rapporter bedöms eventuella intressekonflikter och jäv inom ramen för anställningsförhållandet.

När det gäller externa experter och sakkunniga som deltar i Folkhälsomyndighetens arbete med rapporter kräver myndigheten att de lämnar skriftliga jävsdeklarationer för potentiella intressekonflikter eller jäv. Sådana omständigheter kan föreligga om en expert t.ex. fått eller får ekonomisk ersättning från en aktör med intressen i utgången av den fråga som myndigheten behandlar eller om det finns ett tidigare eller pågående ställningstagande eller engagemang i den aktuella frågan på ett sådant sätt att det uppkommer misstanke om att opartiskheten inte kan upprätthållas.

Folkhälsomyndigheten tar därefter ställning till om det finns några omständigheter som skulle försvåra en objektiv värdering av det framtagna materialet och därmed inverka på myndighetens möjligheter att agera sakligt och opartiskt. Bedömningen kan mynna ut i att experten kan anlitas för uppdraget alternativt att myndigheten föreslår vissa åtgärder beträffande expertens engagemang eller att experten inte bedöms kunna delta i det aktuella arbetet.

De externa experter som medverkat i framtagandet av denna rapport har inför arbetet i enlighet med Folkhälsomyndighetens krav lämnat en deklARATION av eventuella intressekonflikter och jäv. Folkhälsomyndigheten har därefter bedömt att det inte föreligger några omständigheter som skulle kunna äventyra myndighetens trovärdighet. Jävsdeklarationerna och eventuella kompletterande dokument utgör allmänna handlingar som normalt är offentliga. Handlingarna finns tillgängliga på Folkhälsomyndigheten.

Denna titel laddas ner från: www.folkhalsomyndigheten.se/publicerat-material

Citera gärna Folkhälsomyndighetens texter, men glöm inte att uppge källan. Bilder, fotografier och illustrationer är skyddade av upphovsrätten. Det innebär att du måste ha upphovsmannens tillstånd att använda dem.

© Folkhälsomyndigheten, 2018.

Bild omslag: Scandinav/Lars Owesson

Artikelnummer: 18061

Förord

Folkhälsomyndigheten driver ett projekt som syftar till att öka samhällets förmåga att identifiera, förebygga och hantera hälsoskadlig värme i befintlig bebyggelse. Projektet pågår under åren 2017-2019 och är finansierat via krisberedskapsmedel från Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

Förestående rapport är framtagen inom projektet och sammanfattar aktuell kunskap, åtgärdsalternativ och metoder för identifiering av hälsoskadlig värme i utomhusmiljö. Rapporten utgör underlag för kommande vägledning till verksamhetsutövare såsom offentlig och privat fastighetsförvaltning och kommunal gatu- och parkförvaltning.

Rapporten har tagits fram av Nils Wallenberg, Sofia Thorsson, Fredrik Lindberg och Björn Holmer vid Stadsklimatgruppen, Institutionen för geovetenskaper vid Göteborgs universitet, på uppdrag av Folkhälsomyndigheten. Från Folkhälsomyndigheten har enhetschefen Agneta Falk Filipsson och utredarna Elin Andersson, Ylva Eriksson och My Almqvist deltagit.

Folkhälsomyndigheten

Britta Björkholm

Avdelningschef

Avdelningen för smittskydd och hälsoskydd

Innehåll

Ordlista och förkortningar.....	7
Sammanfattning.....	9
Summary.....	10
Heat stress in urban outdoor environments.....	10
Bakgrund.....	11
Syfte.....	13
Metod.....	14
Hur och var uppstår höga temperaturer i en tätort?.....	15
Den urbana värmeön.....	15
Bebyggelsegeometri.....	15
Material- och ytegenskaper.....	16
Antropogen värme.....	17
Luftföroreningar.....	17
Storlek på tätort.....	17
Var finner vi de högsta temperaturerna?.....	18
Metoder för att beräkna värmestress.....	19
Termisk komfort och värmestress.....	19
Termiska index.....	19
Kartläggning av värmestress i befintlig bebyggelse.....	21
Åtgärder för att minska värmestress i befintlig bebyggelse.....	24
Vegetation.....	24
Bebyggelsegeometri.....	26
Material- och ytegenskaper.....	26
Öppna vattenytor.....	27
Diskussion om effekter av olika åtgärder.....	28
Referenser.....	30

Ordlista och förkortningar

Albedo	Reflektionsförmåga, beskriver förhållandet mellan reflekterad och inkommande solinstrålning. Dimensionslös, värde 0–1.
Antropogen värme	Energi i form av värme och vattenånga som släpps ut i atmosfären genom mänsklig metabolism, och mänsklig aktivitet såsom förbränning, tillverkning, uppvärmning, kylning och trafik.
Bebyggelsegeometrin	Beskriver bebyggelse utifrån höjd, avstånd och riktning.
Wind Chill Equivalent Temperature	Lufttemperatur justerat för vindhastighet. Empiriskt index, beskriver människans upplevelse av vädret.
Gatukanjon	Den karakteristiskt geometriska form som skapas av en gata med byggnader på båda sidor.
Globtemperatur	Temperaturen i ett klot som är oskyddat från kort- och långvågig strålning.
Höjd- och breddförhållande	Eng. Height/Width ratio, beskriver bygghetsäthet genom förhållandet mellan höjden på husen och bredden på gatan mellan dem.
Permeabilitet	Ett materials förmåga att släppa igenom vatten.
Physiological Equivalent Temperature (PET)	Rationellt index, beskriver människans upplevelse av vädret i en motsvarande fiktiv inomhusmiljö (lufttemperatur 20 °C, relativ luftfuktighet 50 procent och vindhastighet 0,1 ms ⁻¹).
Strålningstemperatur	Ett mått på strålningsutbytet (kort- och långvågig strålning) mellan en människa och dess omgivning.
Himmelsfaktorn	Eng. Sky View Factor, beskriver bebyggelseäthet. Kan förenklat uttryckas som hur stor del av himlen som är synlig från en viss plats ur ett 180-graders perspektiv.
Termisk admittans	Ett materials förmåga att ta upp och avge värme.
Termisk komfort	Uppstår när värmeflödet mellan människokroppen och dess omgivning är i balans. Beror på lufttemperatur,

	luftfuktighet, vindhastighet, strålningstemperatur, klädsel, aktivitet etc.
Universal Thermal Climate Index (UTCI)	Ett rationellt klimatindex baserat på en fysiologisk modell av värmebalansen för en viss kombination av vind, strålning, luftfuktighet och lufttemperatur som ger samma värmebelastning som referensbetingelser.
Urban värmeö	Fenomenet att urbana områden generellt är varmare än sin omgivning, främst ett nattligt fenomen. Anges vanligtvis som skillnad i lufttemperatur, men kan också anges som skillnader i yttemperatur, strålningstemperatur etc.
Värmebölja	En längre sammanhängande period med hög lufttemperatur. Enligt SMHI definieras en värmebölja som ”en sammanhängande period då dygnets högsta temperatur överstiger 25 °C minst fem dagar i sträck”.
Värmeledningsförmåga	Ett materials förmåga att leda värme.
Värmekapacitet	Ett materials förmåga att lagra värme.
Värmestress	Uppkommer när kroppen inte längre kan reglera sin temperatur genom utsöndring av svett och ökat blodflöde. Kroppstemperaturen stiger och det påverkar bland annat andning, hjärta och blodcirkulation.
Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)	Empiriskt värmeindex för bedömning av värmestress baserat på direkta mätningar av klimatvariablerna lufttemperatur, luftfuktighet och globtemperatur.

Sammanfattning

Det lokala klimatet i en tätort styrs till stor del av bebyggelsegeometri, ytegenskaper och materialegenskaper, vilka påverkar hur mycket värme som tas upp, lagras och avges. Urbana områden är generellt sett varmare än sin omgivning och mindre blåsig. Dagtid finns de varmaste platserna i vindskyddade och solbelysta områden nära bebyggelse med ingen eller lite vegetation. Nattetid finns de varmaste platserna i tätbebyggda centralt belägna områdena med lite eller ingen vegetation.

Värmestress uppkommer när kroppen inte längre kan reglera sin temperatur, och det leder till ökad ohälsa och dödlighet. Den urbana befolkningen är extra utsatt vid värmeböljor på grund det lokala klimat som tätorten och dess bebyggelse ger upphov till. Att öka mängden vegetation är en av de mest effektiva åtgärderna för att minska värmestress såväl dagtid som nattetid, och därmed förbättra hälsan och välbefinnandet hos den urbana befolkningen. För att minska värmestressen är det därför lämpligt med stora grönområden och parker och träd nära bebyggelse, i kombination med en tät och ljus bebyggelse bestående av material med låg värmekapacitet. Detta blir allt viktigare i takt med den globala uppvärmningen.

Det finns ett antal termiska index som beskriver upplevelsen av vädret och graden av värmestress samt ett antal modeller för att kartera var och när värmestress uppstår. I rapporten finns exempel på några termiska index och modeller som är lämpliga för att kartera värmestress i befintlig bebyggelse och som är relevanta för svenska förhållanden.

Summary

Heat stress in urban outdoor environments

The local climate within an urban area is largely governed by building geometry, surface and material properties, which affect how much heat is absorbed, stored and emitted. Urban areas are generally warmer and less windy than their surroundings. During daytime the warmest areas are found near wind-protected and sunlit buildings with no or little vegetation in the immediate surroundings. At night the warmest areas are found in densely populated, centrally located areas with little or no vegetation.

Heat stress occurs when the body can no longer regulate its temperature, which leads to increased illness and mortality. The urban population is more exposed to heat waves due to the local climate present within the urban environment. Increasing the amount of vegetation is one of the most effective measures to reduce heat stress both daytime and at night. Consequently, the health and well-being of the urban population will improve. In order to reduce heat stress it is therefore suitable to combine large green areas, parks and trees close to buildings with a dense and light building stock of low-heat materials. This is becoming increasingly important from a global warming perspective.

There are a number of thermal indices that describe the perception of weather and the degree of heat stress, as well as a number of models for mapping where and when heat stress occurs. The report contains examples of some thermal indices and models that are suitable for mapping heat stress in urban settings relevant to Swedish conditions.

N.B. The title of the publication is translated from Swedish, however no full version of the publication has been produced in English.

Bakgrund

På grund av det urbana klimatet kan befolkningen i en tätort vara extra utsatt för värmestress vid värmeböljor (1). Det urbana klimatet kännetecknas av en generellt högre lufttemperatur (2, 3) och lägre vindhastighet (3-5), jämfört med omkringliggande områden. Värmeböljor förekommer i hela landet, även i de allra nordligaste delarna (6). I och med den globala uppvärmningen förväntas värmeböljor i Sverige att öka i antal, längd och intensitet (7).

Värmestress kan medföra olika stora risker för olika individer beroende på deras hälsotillstånd. Riskgrupper vid värmestress är

- äldre
- kroniskt sjuka
- personer med funktionsnedsättning (både fysisk och psykisk)
- små barn
- gravida
- personer som tar vissa mediciner.

Dessa grupper är särskilt sårbara eftersom de har nedsatt förmåga att reglera kroppstemperaturen eller reagera på risker (8, 9).

Den temperatur då värmerelaterad dödlighet är som lägst brukar benämnas optimal temperatur och varierar mellan länder beroende på hur väl befolkningen är anpassad till värme (10). I Sverige (Stockholm) är risken för värmerelaterad dödlighet som lägst när dygnsmedelvärdet för lufttemperaturen ligger runt 11–12 °C (10) eller när den maximala lufttemperaturen dagtid är ca 20 °C (11). I Norge (Oslo) är den optimala dygnsmedeltemperaturen ungefär densamma (12), medan den i London är ca 21 °C och i Aten ca 24 °C (13, 14). Den optimala temperaturen kan också skilja sig inom ett land (13, 14).

Såväl hög dagstemperatur som hög nattemperatur kan leda till ökad ohälsa och dödlighet hos befolkningen. Under perioder med varma dagar och svala nätter, såsom under en solig sommar eller i början av en värmebölja, är värmerelaterade dödsfall bland äldre (80+) främst relaterade till värmestress dagtid (11, 15). Äldre personer, som är känsliga för värmestress, kan nämligen dö av värmeslag eller utmattning redan efter en enda varm dag (15). När lufttemperaturen är hög både dagtid och nattetid, t.ex. under en värmebölja (en längre period av varma och soliga dagar efter varandra) är värmerelaterad dödlighet primärt relaterad till den höga nattemperaturen, såväl bland äldre som bland andra åldersgrupper (16). De relativt varma nätterna hindrar då människor från att återhämta sig från den värmestress som de har blivit utsatta för under dagen (15).

Förekomsten av värmestress kan minska, och både utomhusklimat och inomhusklimat kan förbättras, om tätorter och fastigheter planeras och förvaltas med hänsyn till det lokala klimatet och till värmerelaterade hälsorisker.

Syfte

Syftet med denna rapport är att redogöra för hur och var höga temperaturer kan uppstå utomhus i en tätort samt olika metoder för att kartlägga värmestress i befintlig bebyggelse. Vidare är syftet att beskriva nationella och internationella åtgärder för att minska värmestress som har vetenskapligt stöd och är relevanta för Sverige och svenska förhållanden.

Metod

För att finna vetenskapligt grundad litteratur, både nationell och internationell, har två sökningar gjorts i databasen Scopus. Den första gick ut på att hitta väsentlig och relevant forskning som beskriver hur och var höga temperaturer uppstår i befintlig bebyggelse. Följande sökord användes: *urban*, *heat stress* och *health*. Vid en första filtrering av sökresultatet valde vi ut publicerade artiklar, översiktsartiklar och artiklar i press, och vid en andra filtrering valdes publikationer med fokus på var och hur höga temperaturer uppstår i urbana miljöer. Dessutom ingår ett antal relevanta artiklar för att täcka upp potentiella luckor. Boken *Urban Climate* har också använts (17), eftersom den ger en fullständig syntes av modern vetenskaplig och tillämpad forskning inom urbanklimat.

Den andra sökningen gällde vilka åtgärder som finns för att minska värmestress i bebyggda områden. Då användes följande sökord: *urban*, *heat stress*, *health* och *strategies*. Även här fokuserade en första filtrering på publicerade artiklar, översiktsartiklar och artiklar i press, och i en andra sortering valdes endast publikationer med redogörelse för olika åtgärder i befintlig bebyggelse. Vidare används artikeln *An integrated method for assessing climate-related risks and adaptation alternatives in urban areas* (18), vilken innehåller en sammanställning av olika åtgärder som ska minska värmestress i bebyggda områden och som är relevanta för svenska förhållanden. Även för detta ämne ingår ett antal artiklar för att vidare underbygga det som beskrivits i kapitlet Åtgärder för att minska värmestress i befintlig bebyggelse.

Sambandet mellan lufttemperatur och värmerelaterad dödlighet är väl beskrivet i litteraturen, liksom att dödligheten är större hos den urbana befolkningen än hos den rurala vid intensiva värmeböljor. Däremot finns i stort sett ingen forskning om sambandet mellan intraurbana variationer av värmestress och värmerelaterad dödlighet, dvs. ifall risken att dö av värmestress är högre i en viss typ av bebyggelse. I brist på sådana studier har vi i denna rapport fokuserat på att beskriva

- hur och var höga temperaturer och värmestress uppstår
- vilka metoder som finns för att kartlägga värmestress
- vilka åtgärder som kan minska förekomsten av värmestress i befintlig bebyggelse.

Hur och var uppstår höga temperaturer i en tätort?

Den urbana värmeön

Klimatet i en tätort beror på den klimatzon tätorten ligger i, rådande väderförhållanden, topografi, höjd över havet och avstånd till havet, men det påverkas också av den bebyggda miljön. Bebyggda områden är generellt sett varmare än obebyggda områden. Detta fenomen brukar benämnas ”urban värmeö” (eng: Urban Heat Island). Den urbana värmeön är främst ett nattligt fenomen, som uppstår på grund av att bebyggda områden kyls av långsammare under sen eftermiddag och kväll än det omgivande landskapet. Skillnader i avkylning beror på markytans egenskaper (geometri och material- och ytegenskaper), årstiden och väderförhållandena. Under dagen är skillnaderna i lufttemperatur små, men under klara och vindstilla nätter kan skillnaderna uppgå till flera grader.

Ju tätare bebyggelse, högre andel hårdgjorda ytor och mindre mängd vegetation, desto större värmeöeffekt (17). Utsläpp av antropogen värme påverkar också uppkomsten och intensiteten av den urbana värmeön (2, 19). Nedan följer en beskrivning av de faktorer som ger upphov till den urbana värmeön.

Bebyggelsegeometri

Bebyggelsegeometrin beskriver bebyggelsens höjd, avstånd och riktning, och är en viktig faktor som påverkar det urbana klimatet. Framför allt spelar bebyggelsetätheten en stor roll, dvs. hur tätt byggnaderna står intill varandra. Detta kan beskrivas på flera olika sätt. En av de vanligaste beskrivningarna är genom himmelsfaktorn (eng: Sky View Factor), vilken förenklat beskriver hur mycket av himlen som är synlig från en punkt i landskapet med ett 180-graders perspektiv (20, 21). Ett annat sätt att beskriva bebyggelsetätheten är förhållandet (eng: Height/Widht ratio) mellan höjden på husen och bredden på gatan mellan dem. En tätbebyggd tätort lagrar generellt sett mer värme än en glesare sådan (22). Den värme som lagrats under dagen avges saktare, och en tät bebyggelse kyls därför av långsammare än en tätort med låg och gles bebyggelse (2, 23-27). Samtidigt ger en tät bebyggelse upphov till skugga dagtid, vilket minskar solinstrålningen som når marken och fasaderna och ger därmed lägre yt- och lufttemperatur (2, 24, 27, 28). Det finns ett samband mellan bebyggelsetätheten, uttryckt i himmelsfaktorn, och den maximala intensiteten på den urbana värmeön nattetid (21). I europeiska tätorter innebär en minskning av himmelsfaktorn med 0,1 generellt en ökning av den maximala värmeön med drygt 1 °C.

Riktningen på husen har också betydelse. Gatukanjoner i nord-sydlig riktning där byggnaderna står tätt blir solbelysta endast en kort tid mitt på dagen. Dessa gatukanjoner är varmest någon gång mitt på dagen, när solen ligger i syd (norra halvklotet) och belyser hela gatan (28, 29). Gatukanjoner i öst-västlig riktning är däremot relativt varma under morgonen och eftermiddagen (28, 29). De sydliga

fasaderna på den norra sidan av dessa kanjoner blir dessutom solbelysta under en stor del av dagen.

Material- och ytegenskaper

Material- och ytegenskaper är andra faktorer som har stor betydelse för det urbana klimatet. Ytegenskaper spelar roll på så sätt att de t.ex. avgör hur mycket solinstrålning som reflekteras respektive absorberas. Reflektionsförmågan brukar benämnas albedo. Generellt gäller att en yta med lågt albedo är mörk och absorberar mycket solinstrålning, medan en yta med högt albedo är ljus och reflekterar mycket solinstrålning. En yta med lågt albedo, såsom asfalt, absorberar mycket av solinstrålningen, vilket i sin tur leder till ökad yt- och lufttemperatur. Ytor med högt albedo, såsom en ljust målad husfasad, reflekterar i stället mycket av den inkommande solinstrålningen, vilket leder till minskad yt- och lufttemperatur. Tätorter har generellt ett något lägre albedo i de centralt tätbebyggda delarna jämfört med omgivningen (30). Dock varierar albedot stort mellan olika ytor. Genom att öka albedot på gator, husfasader och tak kan man till viss del minska den urbana värmeö (31). Ett ökat albedo har dock ingen nämnvärd effekt på den termiska komforten utomhus, eftersom den minskade värmestrålningen till stor del vägs upp av den ökade reflektionen av solinstrålning (29). Däremot har ett förändrat albedo stor effekt på värmelagringen och därmed inomhustemperaturen.

De termiska egenskaperna hos de vanligaste byggnadsmaterialen (betong, asfalt, tegel etc.) ger goda förutsättningar för att lagra värme. Det behöver dock inte finnas stora skillnader i t.ex. värmekapacitet och värmeledningsförmåga mellan byggnadsmaterial och naturligt förekommande material (sand, lera etc.), så länge de naturligt förekommande materialen innehåller mycket vatten. I sand och lera varierar vatteninnehållet kraftigt beroende på nederbörd, medan vatteninnehållet i betong, asfalt och tegel är mer konstant och därmed också ger en mer konstant värmekapacitet och värmeledningsförmåga (17). Byggnadsmaterialen har dessutom ofta en högre densitet och därmed en god förmåga att lagra värme. En annan viktig materialegenskap är termisk admittans, vilken beskriver hur snabbt ett material tar upp och avger värme. Det beror på värmeledningsförmågan och värmekapaciteten (17): ju högre termisk admittans, desto långsammare uppvärmning och avkylning. Exempel på material med hög termisk admittans är betong, asfalt och sten (21). Ett exempel på material med låg termisk admittans är trä.

Ytterligare en materialegenskap som har stor betydelse för det urbana klimatet är permeabiliteten, dvs. ett materials förmåga att släppa igenom vatten. Exempel på material med låg permeabilitet, vilka ofta benämns som hårdgjorda ytor, är asfalterade och stenlagda gator, parkeringsplatser och torg. Även byggnader består till största delen av hårdgjorda ytor. Dessa ytor leder snabbt bort vatten och kan därför fortare värmas upp och ge upphov till högre yt- och lufttemperatur. Permeabla ytor, t.ex. bevuxna ytor (gräsmattor, parker etc.) och grusplaner, kan däremot hålla mer vatten och också hålla kvar vatten längre, vilket ger ökad avdunstning och avdunstning under längre tid (2). När vatten avdunstar tas värme

från omgivningen, vilket leder till lägre yt- och lufttemperatur (2). I tätorter finns generellt en stor andel hårdgjorda ytor, och det finns ett samband även mellan den andelen och intensiteten på den urbana värmeö (32).

Antropogen värme

Antropogen värme, dvs. den energi som släpps ut i atmosfären genom mänsklig aktivitet, bidrar även den till den urbana värmeö. Det antropogena värmeflödet varierar mellan och inom tätorter, och beroende på tid på året och rådande väderförhållanden. Vintertid utgör uppvärmning av våra hus den största delen av det antropogena värmeflödet, eftersom behovet av uppvärmning då är som störst (33-35). Även utsläpp från trafiken är en viktig värmekälla, om än mindre än uppvärmningen av hus (34, 36). Sommartid kan dock värmeutsläppet från trafik vara högre än värmeutsläppet från byggnader (36).

Luftföroreningar

Luftföroreningar påverkar det urbana klimatet på olika sätt, beroende på typen av förorening. Luftföroreningar såsom N_2O och CH_4 absorberar och återemitterar värme från marken (37, 38). Aerosoler (partiklar) kan å andra sidan, beroende på ämne, antingen reflektera den inkommande solinstrålningen och därmed sänka lufttemperaturen nere vid marken (37, 38) eller absorbera den inkommande solinstrålningen och på så sätt öka den marknära lufttemperaturen (39). Påverkan på det urbana klimatet är dock liten i jämförelse med andra faktorer såsom bebyggelsegeometri, materialegenskaper, ytegenskaper och antropogen värme (17).

Vid värmeböljor, vilka kännetecknas av soliga, varma och vindstilla väderförhållanden, ökar halten av vissa luftföroreningar såsom ozon och partiklar och de förstärker värmens skadliga hälsoeffekter (40-42).

Storlek på tätort

Det finns ett samband mellan storleken på tätort mätt i invånarantal och intensiteten på den urbana värmeö (43). Invånarantalet kan ses som ett samlat mått på de ovanstående faktorerna. För en genomsnittlig europeisk tätort med 1 miljon invånare kan den maximala värmeö angett i lufttemperatur bli ca 8 °C varmare än sin omgivning, medan en tätort med 100 000 invånare kan utveckla en värmeö på ca 6 °C. Även små tätorter (< 1 000) invånare kan utveckla en värmeö (< 2 °C).

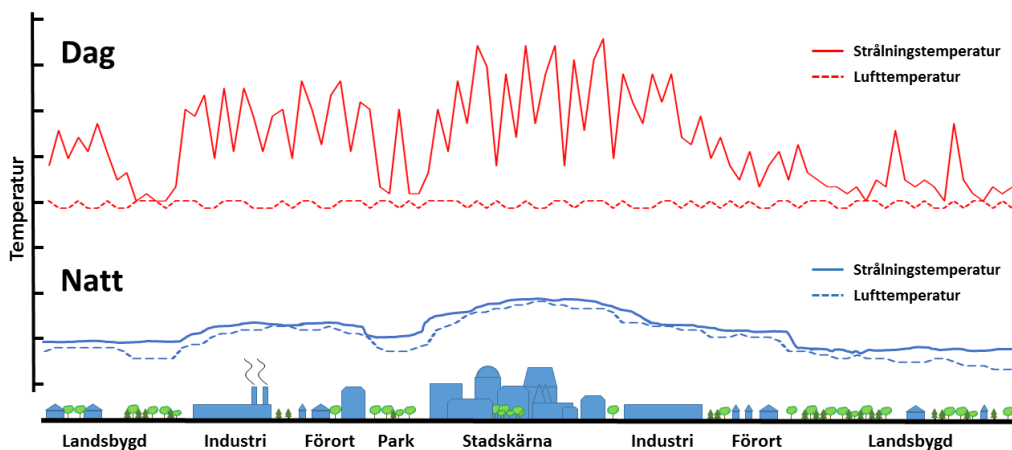
Det finns även ett samband mellan tätortens ytstorlek och intensiteten av den urbana värmeö (44), även om inverkan är mindre än för bebyggelsetätheten. Formen på tätorten påverkar också intensiteten på värmeö, på så sätt att en mer avlång tätort ger upphov till mindre skillnader i lufttemperatur mellan landsbygd och tätort än en cirkulär tätort. Detta beror på att avståndet till landsbygden är kortare i en utsträckt tätort jämfört med en tätort som symmetriskt ökar i storlek (cirkulärt) ut från centrum (44).

Var finner vi de högsta temperaturerna?

Trots stora skillnader i ytemperatur dagtid är skillnaderna i lufttemperatur små i den urbana miljön (45), på grund av större turbulens och högre vindhastigheter på dagen än på natten. Däremot varierar strålningstemperaturen mycket mellan olika delar i och runt en stad (figur 1), vilket framför allt beror på sol- och skuggmönstret. Strålningstemperaturen är en av de viktigaste meteorologiska variablerna som påverkar energiutbytet och den termiska komforten under soliga och varma dagar (46). Sådana dagar kan strålningstemperaturen uppgå till drygt 60 °C mitt på dagen, vilket är ca 35 °C högre än lufttemperaturen. Natttid är strålningstemperaturen ungefär densamma som lufttemperaturen.

Natttid finns som tidigare nämnts den högsta lufttemperaturen i de tätbebyggda, centralt belägna delarna med lite vegetation (figur 1) (47). Lufttemperaturen avtar relativt snabbt med avståndet från centrum. Under klara vindstilla dagar kan dock lufttemperaturen i tätbebyggda delar vara lägre än i omgivande landsbygd (47), pga. att husen står så tätt att solen inte kan nå ner och värma marken och fasaderna i gatunivå (2, 28). I bebyggda områden finns den högsta lufttemperaturen på vindskyddade och solbelysta platser i nära anslutning till bebyggelse (48, 49), exempelvis på innergårdar och i gatukanjoner med ingen eller lite vegetation.

Figur 1. Schematisk rumslig variation av lufttemperatur och strålningstemperatur dagtid och natttid i och runt en stad.



Modifierad efter Oke (17).

Metoder för att beräkna värmestress

Det finns ett antal termiska index för att beräkna värmestress, och ett antal modeller för att kartlägga var och när värmestress kan uppstå. I detta kapitel finns exempel på några termiska index och modeller som är lämpliga för att kartera värmestress i befintlig bebyggelse, och som är relevanta för svenska förhållanden.

Termisk komfort och värmestress

Den termiska komforten och graden av värmestress bestäms av värmeutbytet mellan människokroppen och dess omgivning. Värmeöverföringen kan ske genom konvektion, ledning och strålning, och styrs av lufttemperatur, strålningstemperatur, vindhastighet och luftfuktighet, liksom av personens aktivitet, klädsel, längd, vikt och kön.

Strålningstemperaturen bestäms av strålningsutbytet (kort- och långvågig strålning) mellan en människa och dess omgivning (46). Den kan bland annat beräknas utifrån mätningar av kort- och långvågig strålning eller mätningar av globtemperatur, vindhastighet och lufttemperatur (50). Under värmeböljor utgör värmeöverföring från kort- och långvågig strålning den största delen av den totala värmebelastningen från omgivningen (46, 51), och förklarar upp till 90 procent av variationen i termisk upplevelse (52). Strålningstemperaturen har därför visat sig vara ett lämpligare mått på värmestress och värmerelaterad dödlighet under dessa förhållanden, jämfört med lufttemperatur som vanligtvis används inom medicinska studier (11).

Vindhastigheten är en annan viktig meteorologisk variabel. Vindhastigheten påverkar dels det konvektiva värmeflödet, dels avdunstningen och därmed svettningens avkylande effekt (53, 54). Ju högre vindhastighet, desto större värmeflöde och avdunstning. Om lufttemperaturen är lägre än hudens temperatur (ca 33 °C) har vinden en kylande effekt. Är däremot lufttemperaturen högre har vinden en värmande effekt.

Luftfuktigheten påverkar inte värmeflödet direkt, men den påverkar luftens avdunstningsförmåga och därmed svettningens avkylande effekt (53). Ju högre luftfuktighet, desto sämre avdunstning. Vid måttliga lufttemperaturer påverkar inte luftfuktigheten de fysiologiska och sensoriska reaktionerna i kroppen nämnvärt (53), men hög luftfuktighet i samband med hög temperatur kan ge upphov till ökad värmestress och därmed ökade hälsoproblem.

Termiska index

Olika index används för att beskriva hur vädret upplevs och graden av värmestress. De anger då den samlade effekten av två eller flera variabler på de sensoriska och fysiologiska reaktionerna i kroppen (53).

Det finns två olika typer av index – empiriska och rationella. Empiriska index är baserade på mätningar och följer nödvändigtvis inte någon teori utan anger den

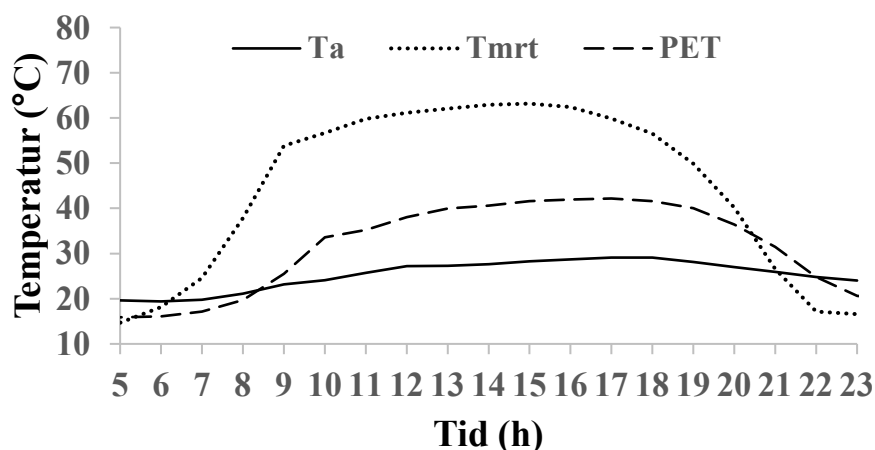
samlade effekten av två eller fler av de meteorologiska variablerna lufttemperatur, luftfuktighet, vindhastighet och strålningstemperatur. Rationella index är i stället baserade på människans energibalans och inkluderar samtliga meteorologiska variabler. Dessutom ingår människans aktivitet, metabolism, vikt, längd, kön och klädsel.

Ett empiriskt index är Wind Chill Equivalent Temperature som används av bland annat SMHI för att beskriva vindens kylande effekt (55). Ett annat exempel är Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) (56), vilket används inom bland annat idrottsmedicin som ett screeningsverktyg för att bedöma värmestress vid olika sportevenemang (57). Det används också inom arbets- och miljömedicin.

Ett av de vanligaste rationella indexen i biometeorologiska utomhusstudier är Physiological Equivalent Temperature (PET) (58). Det anger hur vädret upplevs i en fiktiv inomhusmiljö (lufttemperatur 20 °C, relativ luftfuktighet 50 procent och vindhastighet 0,1 ms⁻¹). Indexet anges i °C, där 18–23 °C upplevs som komfortabelt och ett högre och lägre värde upplevs som varmare respektive kallare (46). Under varma och soliga sommardagar kan indexets värde uppgå till drygt 40 °C, vilket är ca 10 °C högre än lufttemperaturen (figur 2). Det upplevs som mycket varmt och ger upphov till hög värmestress (59).

Ett annat vanligt rationellt index är Universal Thermal Climate Index (UTCI) (60, 61). Detta index anges också i °C och bygger på att kroppen delas in i 12 olika noder (armar, händer, ben, fötter, huvud, hals, axlar och kropp etc.), för vilka värmeflödet beräknas (61). Physiological Equivalent Temperature beräknar däremot värmeflödet för hela kroppen på en och samma gång (46).

Figur 2. Lufttemperatur (T_a), strålningstemperatur (T_{mrt}) och physiological equivalent temperature (PET) under en varm och solig sommardag i Göteborg.



Kartläggning av värmestress i befintlig bebyggelse

Under årens lopp har ett antal modeller tagits fram för att studera hur olika processer är kopplade till varandra, men också för att kartlägga var och när värmestress kan uppkomma i bebyggelse. Vissa modeller kan användas för att simulera värmestress på enskilda platser (i en punkt), och andra kan användas för att simulera rumsliga variationer. Tabell 1 listar ett antal modeller för att analysera var värmestress kan uppkomma i befintlig bebyggelse. Samtliga kräver en viss erfarenhet av klimatdatahantering och klimatmodellering samt av att analysera och tolka modellberäkningarna. Generellt minskar användarvänligheten med ökad komplexitet. De mest populära modellerna ur ett internationellt perspektiv är RayMan och ENVI-met, medan SOLWEIG har använts i stor utsträckning i Sverige. ENVI-met kan analysera rumsliga variationer av termisk komfort, men på grund av sin komplexitet (3D) undersöks oftast en kortare tidsperiod (dygn) än med t.ex. SOLWEIG (år).

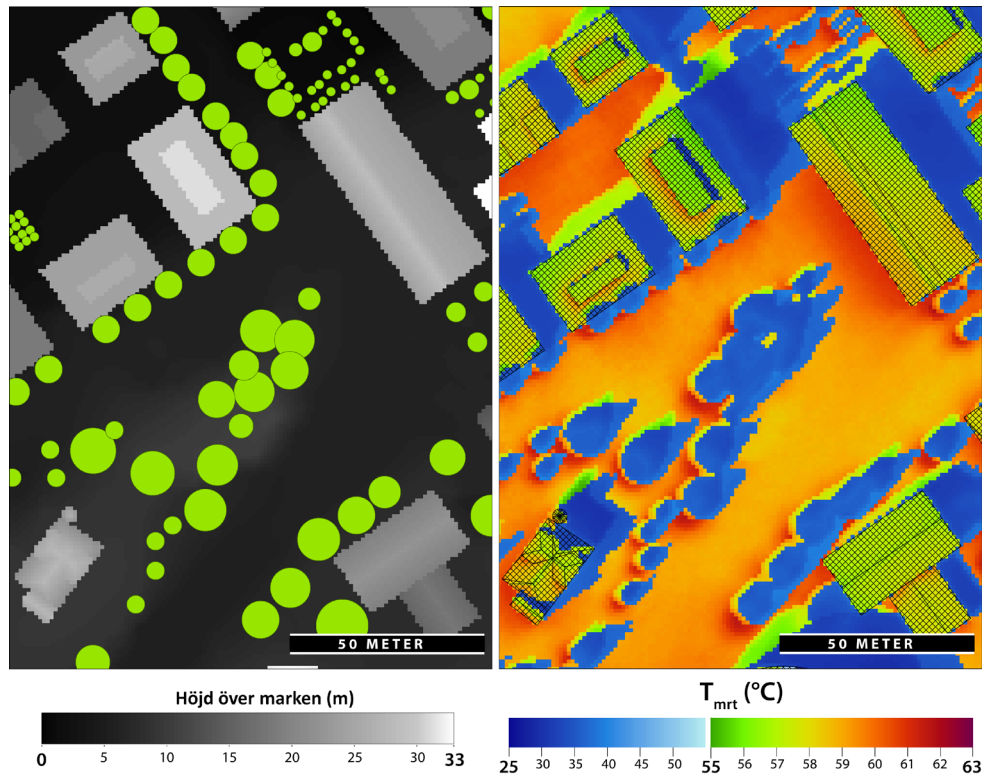
Tabell 1. Tabell över olika urbanklimatologiska modeller samt deras egenskaper och referenser.

Modell	Beskrivning	Komplexitet/ utbredning	Referenser
SOLWEIG	Beräknar och rumsliga variationer av lång- och kortvågig strålning och T_{mrt} . Rasterbaserad.	2D/10 ³ meter	(62)
RayMan	Punktbaserad modell som beräknar variationer av T_{mrt} och olika termiska index (t.ex. PET och UTCI) för en punkt i rummet.	1D/NA	(63)
ENVI-met	Enklare CFD-modell (computer fluid dynamics) som beräknar rumsliga variationer av T_{mrt} och olika termiska index.	3D/10 ² meter	(64-67)
SOLENE-microclimate	Strålningsmodell, kopplad till en CFD-modell som beräknar rumsliga variationer av lång- och kortvågig strålning och olika termiska index	3D/10 ² meter	(68)
PALM4U	Avancerad CFD-modell för att beräkna rumsliga variationer av T_{mrt} och olika termiska index	3D/10 ² meter	(69)

Figur 3 visar den varierande strålningstemperaturen i en del av Stockholm (11) simulerad med SOLWEIG (70). Jämfört med lufttemperaturen, som kännetecknas av små rumsliga variationer dagtid, uppvisar strålningstemperaturen stora rumsliga variationer, främst på grund av det skuggmönster som genereras av närliggande byggnader och vegetation (27, 51). Högst strålningstemperatur finns i nära anslutning till solbelysta väggar som är riktade mot sydöst-syd-sydväst. Detta är ett resultat av hög direkt och reflekterad kortvågig strålning i kombination med emitterad långvågig strålning från närliggande solbelysta väggar (71, 72). Öppna områden visar lägre strålningstemperatur eftersom avståndet till varma husväggar är stort. Under soliga och varma sommarkvarnar kan strålningstemperaturen på dessa platser uppgå till drygt 60 °C, vilket är upp till 30 °C högre än på närliggande

skuggade platser (72). På natten finns ingen kortvågig strålning, och då är strålningstemperaturen i stort sett densamma som lufttemperaturen och de rumsliga skillnaderna små.

Figur 3. Vänster: Höjdmodell och placering av träd. Höger: Rumslig variation av strålningstemperatur en varm och solig sommardag (10 juli 1999, kl. 14) i Hjorthagen, Stockholm.



Modifierad efter Thorsson et al. 2014 (11).

Figur 4 visar de varmaste (90:e percentilen) platserna när det gäller strålningstemperatur i centrala Göteborg beräknat under en längre period (1998–2005) (72). Som framgår av figuren finns de varmaste platserna i nära anslutning till solbelysta väggar som är riktade mot sydöst-syd-sydväst, i det nordvästra hörnet av innergårdar och på vissa öppna ytor som är solbelysta under stora delar av dagen och har relativt hög diffus (spridd) solinstrålning. De rumsliga mönstren i figur 4 är medvetet beräknade utan vegetationens inverkan för att enbart se vilken effekt bebyggelsen har på strålningstemperatur.

Strålningstemperaturen är direkt påverkad av bebyggelsegeometri, ytegenskaper och materialegenskaper, och därför passar den variabeln för att identifiera värmeutsatta områden och uppskatta effektiviteten av olika åtgärder för att minska värmestress (11).

Figur 4. Vänster: Flygfoto över centrala Göteborg. Höger: Värmeutsatta platser (bruna till mörkbruna). I modellberäkningarna (SOLWEIG) som ligger till grund för figuren till höger har man inte tagit hänsyn till effekten av vegetation.



Modifierad efter Thorsson et al. 2017 (72).

Åtgärder för att minska värmestress i befintlig bebyggelse

Det finns olika åtgärder för att minska värmestress i befintlig bebyggelse, såsom att öka den urbana grönskan, ändra bebyggelsegeometrin (höjden på byggnader, avståndet mellan byggnader och riktningen på gator), ändra material- och ytegenskaper och öka andelen öppna vattenytor. Nedan följer en beskrivning av de olika åtgärderna.

Vegetation

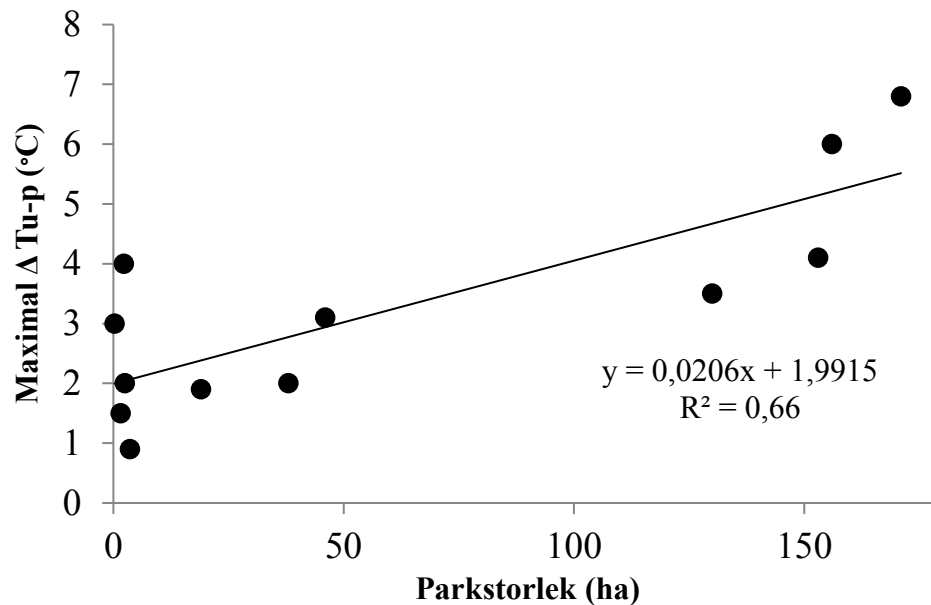
Ett av de mest effektiva sätten att minska värmestress i befintlig bebyggelse är att öka mängden vegetation (18). Vegetation kyler sin omgivning, dels genom transpiration (2, 65, 73), dels genom skuggning (65, 74-77).

Transpiration är vattenånga som avges via klyvöppningarna (stomata) eller epidermis (yttersta cellskiktet som bekläder rot, stam och blad), och det är en biprodukt av fotosyntesen. När flytande vatten förångas genom transpiration används energi från omgivningen, och därmed sänks omgivningens temperatur. Ju mer vegetation, desto större kyleffekt (2, 73). Detta innebär att platser med mycket vegetation är svalare än platser med lite eller ingen vegetation. Transpirationen beror på ljusintensiteten och omgivningens temperatur och fuktighet, vilket innebär att den är som störst under soliga och varma dagar då vattentillgången är god (78). Transpirationen fortgår även efter solnedgång, om än i mindre omfattning (ca 10–20 procent av den transpiration som sker dagtid) och bidrar således även till avkyllningen nattetid.

Skuggeffekten, dvs. vegetationens förmåga att blockera solljus, kyler omgivningen genom att minska den direkta solinstrålningen, men även genom att minska reflektionen av solinstrålning från närliggande ytor och uppvärmningen av dessa. Effekten beror på vegetationens art, krontäthet, höjd och form. Skuggeffekten hos några av våra vanligaste gatuträd (lind, hästkastanj, silverbjörk, körsbär och svartall) kan uppgå till 95–99 procent hos solitära individer (74). Det gäller sommartid då lövverket är fullt utvecklat. Vintertid, när lövträden har fällt sina blad, är skuggeffekten 48–60 procent. Effekten är alltså betydande under både sommar (önskad) och vinter (oönskad). Vidare beror skuggeffekten på solhöjd och solvinkel. När solen står lågt kan den nå in under grenverket (74).

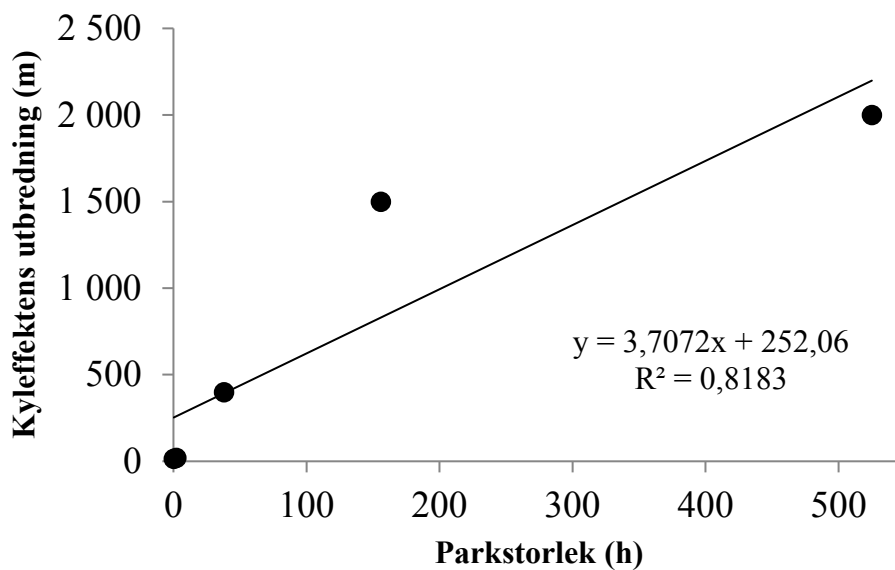
Kyleffekten från enstaka träd är begränsad till den närmaste omgivningen. Detta gäller även fasad- och takvegetation, även om denna effektivt skuggar och minskar de enskilda husens ytemperatur och värmelagring (67, 79). Kyleffekten från större grönområden, såsom parker och tätortsnära natur, kan dock vara flera grader och sträcka sig flera hundra meter in i omgivande bebyggelse (80, 81). Ju större grönområde, desto större kyleffekt, se figur 5 nedan. Figuren är baserad på data från olika klimat (80, 82-87), och visar sambandet mellan parkstorlek och kyleffekt.

Figur 5. Sambandet mellan kyleffekt (°C) och storlek på parken (ha).



Kyleffekten in i bebyggelsen ökar också ju större parken är, men avtar med ökat avstånd från parken (figur 6). Kyleffekten beror på vindriktningen och vindhastigheten. Även denna figur är baserad på data från olika klimat (83, 84, 86, 88, 89).

Figur 6. Sambandet mellan hur långt in i omgivande bebyggelse som parken har en kyleffekt (m) och storlek på parken (ha).



Genom att öka mängden grönska i bebyggelsen kan man således minska värmestressen såväl dagtid som nattetid. Kyleffekten blir maximal om man placerar vegetationen i solbelysta områden med lite eller ingen vegetation och god

vattentillgång (71, 74, 78). Träd är att föredra framför buskar, gräsmattor och fasad- och takvegetation eftersom de ger mer skugga och transpirerar mer. Det är också viktigt att välja arter som trivs i den relativt varma och torra urbana miljön.

Förutom att minska värmestressen bidrar vegetationen till att minska buller, förbättra luftkvaliteten, hantera och rena dagvatten, öka välbefinnandet m.m. (90).

Bebyggelsegeometri

Bebyggelsegeometrin i en tätort är svår att förändra, framför allt hur gator är orienterade. Det går dock att förtäta bebyggelsen, antingen genom att bygga nya hus mellan befintlig bebyggelse eller genom att bygga på våningar på befintliga byggnader. Genom att bygga nya hus eller bygga på höjden ökar man skuggeffekten, vilket leder till lägre yt- och lufttemperatur dagtid (71). En sådan åtgärd kommer dock att minska avkylningen och därmed ge upphov till högre yt- och lufttemperatur nattetid. Att förtäta har dock mindre påverkan på det urbana klimatet jämfört med att bygga nya byggnader på platser som upptas av vegetation eller barmark (91).

En förtätning av befintlig bebyggelse leder också till minskat dagsljus i inomhusmiljöer, vilket kan ha negativ påverkan på hälsa (92).

Material- och ytegenskaper

Ett relativt enkelt och billigt sätt att förändra det urbana klimatet är att ändra albedo på byggnader och gator. Att ändra färgen från mörk till ljus på tak, fasader och gator sänker effektivt yttemperaturen på solbelysta ytor och minskar därmed värmelagringen. Detta kan medföra lägre utomhus- och inomhustemperatur, och då behövs mindre energi för att kyla byggnaderna under varma perioder (93-95). Effekten på utomhustemperaturen är dock begränsad eftersom omblandningen av luft är stor. Att ändra albedo på högt belägna tak har också mycket begränsad effekt på klimatet på gatunivå (67). Effekten av ett ändrat albedo beror på hur fasaderna är riktade, vilken vinkel taket har och hur högt taket är beläget. Riktningen på fasader avgör om och hur mycket de är solbelysta under en dag. Vinkeln på taket avgör hur stor del av solinstrålningen som reflekteras ner till gatunivå och tillbaka ut i atmosfären. Hög bebyggelse har också större ytor som kan reflektera jämfört med lägre bebyggelse. Ett ökat albedo på gator och fasader kan också ge upphov till bländning (94). Man bör därför undvika kraftigt högre reflekterade ytbeläggningar och material på gator och väggar. Ljusa ytor kräver dessutom mer underhåll, såsom tvätt och målning, än mörka ytor.

Ett annat sätt att minska den urbana värmeö är att minska andelen hårdgjorda ytor. En minskning från 60 till 50 procent kan ge en minskad värmeöeffekt på ca 1 °C (32). Med mindre hårdgjorda ytor i nära anslutning till gatuträd ökar mängden vatten som kan infiltrera ner i marken och tas upp av träden, och på så sätt kan man öka transpirationen och avkylningen från träden (78).

Öppna vattenytor

Öppna vattenytor såsom sjöar, dammar, kanaler och bäckar dämpar temperatursvängningarna såväl över dygnet som över året. Dagtid har de en kylande effekt. Kyleffekten är dock relativt outforskad och de studier som finns visar en begränsad effekt, såväl i storlek som i utbredning (96). Öppna vattenytor leder också till ökad luftfuktighet, vilket kan ha en negativ effekt på hälsan vid höga lufttemperaturer.

Diskussion om effekter av olika åtgärder

Eftersom både hög dagstemperatur och hög nattemperatur kan leda till ökad ohälsa och dödlighet hos befolkningen (11, 16) är det viktigt att vidta åtgärder som minskar värmestressen såväl dagtid som nattetid. I tabell 2 sammanfattas och rankas de ovan nämnda åtgärderna utifrån hur effektiva de är för att minska värmestress under dag och natt. Åtgärderna och rankningen är framtagna i ett svenskt perspektiv. För dagtid är det mest effektivt att öka mängden skugga, t.ex. genom att öka mängden högre vegetation (träd) eller förtäta bebyggelse. Det är mindre effektivt med åtgärder som rör material- och ytegenskaper såsom albedo, termisk admittans och permeabilitet, även om de har stor betydelse för värmelagringen av de enskilda husen och därmed inomhusklimatet. Öppna vattenytor i staden har dagtid en kylande effekt även om den är begränsad. För att minska värmestressen nattetid är åtgärder som främjar snabb avkylning viktiga. Detta kan ske genom att skapa stora öppna ytor i staden och öka mängden låg vegetation (gräs, buskar etc.).

De flesta åtgärder för att minska värmestressen dagtid har en motsatt effekt under natten och vice versa (18). Ett exempel är förtätning av bebyggelsen som ger upphov till mer skugga och därmed minskar värmestressen dagtid, men på natten leder den till minskad avkylning och därmed högre yt- och lufttemperatur. Förtätning bör således alltid kombineras med mer grönska för att minska värmestressen nattetid. Vegetation är också ett av få alternativ för att minska värmestress i befintlig bebyggelse såväl dagtid som nattetid. Enskilda träd ger störst kyleffekt om de placeras i solbelysta områden med inga eller få träd och med god vattentillgång samt om man väljer arter som trivs i den relativt varma och torra bebyggda miljön (71, 74, 78). Eftersom utomhusklimatet är direkt kopplat till inomhusklimatet ger ett bra utomhusklimat även goda förutsättningar för ett bra inomhusklimat. Grönska ger dessutom en mängd mervärden, vilket bidrar till en god och attraktiv stadsmiljö.

För att minska värmestressen i bebyggda områden är det sammanfattningsvis bra med en tät och ljus bebyggelse bestående av material med låg värmekapacitet samt med stora grönområden och parker och träd nära bebyggelse. Sådana åtgärder blir allt viktigare i takt med den globala uppvärmningen.

Tabell 2. Åtgärder i den fysiska värmestress i befintlig bebyggelse, dess effekter och beräknade effektvärden (rank) dagtid och nattetid. Rankingen sträcker sig mellan -3 (motsatt effekt), genom 0 (ingen betydande effekt), till 3 (väldigt effektiv) och är baserad på referenslitteraturen i tabellen. Modifierad efter (18).

Strategier	Åtgärd	Effekt dagtid	Rank (dag)	Effekt nattetid	Rank (natt)	Referens
Material	Albedo	Öka andelen ljusa, reflektiva ytor	Ökad reflektion av solinstrålning (kortvägig strålning); minskad yt- och lufttemperatur	0	Försämrar effekt	(29, 67)
	Termisk admittans	Öka andelen material med låg termisk admittans	Minskad yt- och lufttemperatur	1	Ökad yt- och lufttemperatur	(97)
	Permeabilitet	Öka andelen permeabla ytor	Ökad evaporation, minskad yt- och lufttemperatur	1	Ökad evaporation, minskad yt- och lufttemperatur	(64)
Bebyggelsegeometri	Byggnadsdensitet	Öka byggnadsdensiteten, d.v.s. höga och kompakta byggnadsstrukturer	Ökad skugga; minskad yt- och lufttemperatur; minskad vindhastighet	3	Ökad instängd värmeenergi, ökad yt- och lufttemperatur	(23-27, 64)
	Vegetation	Parker/urbana skogsområden	Ökad skugga och evapotranspiration; minskad yt- och lufttemperatur, och vindhastighet	3	Ökad evapotranspiration, minskad yt- och lufttemperatur	(67, 80, 81, 98)
Vegetation	Gatutråd	Öka antalet gatutråd och permeabiliteten i marken kring träden	Ökad skugga och transpiration; minskad yt- och lufttemperatur, och vindhastighet	3	Ökad transpiration, minskad yt- och lufttemperatur	(73, 74, 99)
	Gröna tak och väggar	Öka andelen gröna tak och väggar	Ökad transpiration; minskad yt- och lufttemperatur	1	Ökad transpiration; minskad yt- och lufttemperatur	(67, 79, 100)
	Öppna vattenytor	Sjöar, dammar, kanaler, bäckar etc.	Ökad evaporation, minskad yt- och lufttemperatur	1	Försämrar effekt	(96)

Referenser

1. Gabriel KMA, Endlicher WR. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*. 2011;159(8-9):2044-50.
2. Oke TR. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982;108(455):1-24.
3. Fortuniak K, Klysik K, Wibig J. Urban - Rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theoretical and Applied Climatology*. 2006;84(1-3):91-101.
4. Bornstein RD, Johnson DS. Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment (1967)*. 1977;11(7):597-604.
5. Lee DO. The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban-rural wind speed differences. *Atmospheric Environment (1967)*. 1979;13(8):1175-80.
6. SMHI. Värmeböljor i Sverige. Faktablad nr 49 - 2011 2011 [2017-11-27]. Available from: https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.16889!/webbFaktablad_49.pdf.
7. Kjellström E, Abrahamsson R, Boberg P, Jernbäcker E, Karlberg M, Morel J, et al. Uppdatering av det klimatvetenskapliga kunskapsläget. SMHI; 2014.
8. Folkhälsomyndigheten. Hälsoeffekter av höga temperaturer - En kunskapssammanställning. 2015.
9. Folkhälsomyndigheten. Att hantera hälsoeffekter av värmeböljor - Vägledning till handlingsplaner. 2017.
10. Rocklöv J, Forsberg B. The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998–2003: A study of lag structures and heatwave effects. *Scandinavian Journal of Public Health*. 2008;36(5):516-23.
11. Thorsson S, Rocklöv J, Konarska J, Lindberg F, Holmer B, Dousset B, et al. Mean radiant temperature - A predictor of heat related mortality. *Urban Climate*. 2014;10(P2):332-45.
12. Nafstad P, Skrondal A, Bjertness E. Mortality and temperature in Oslo, Norway, 1990-1995. *European Journal of Epidemiology*. 2001;17(7):621-7.
13. Keatinge WR, Donaldson GC, Cordioli E, Martinelli M, Kunst AE, Mackenbach JP, et al. Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: Observational study. *British Medical Journal*. 2000;321(7262):670-3.
14. Keatinge WR. Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *Lancet*. 1997;349(9062):1341-6.
15. Rocklöv J, Ebi K, Forsberg B. Mortality related to temperature and persistent extreme temperatures: A study of cause-specific and age-stratified mortality. *Occupational and Environmental Medicine*. 2011;68(7):531-6.
16. Fouillet A, Rey G, Laurent F, Pavillon G, Bellec S, Guihenneuc-Jouyaux C, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2006;80(1):16-24.
17. Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. *Urban Climates*: Cambridge University Press; 2017.
18. Andersson-Sköld Y, Thorsson S, Rayner D, Lindberg F, Janhäll S, Jonsson A, et al. An integrated method for assessing climate-related risks and adaptation alternatives in urban areas. *Climate Risk Management*. 2015;7:31-50.
19. Taha H. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. 1997;25(2):99-103.
20. Steyn DG. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs: Research note. 1980.

21. Oke TR. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*. 1981;1(3):237-54.
22. Coutts AM, Beringer J, Tapper NJ. 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*. 2007;46(4):477-93.
23. Holmer B, Thorsson S, Eliasson I. Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature difference. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*. 2007;89 A(4):237-48.
24. Lindberg F. Towards the use of local governmental 3-D data within urban climatology studies. *Mapping and Image Science*. 2005(2):32-7.
25. Unger J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach. *Climate Research*. 2004;27(3):253-64.
26. Svensson MK. Sky view factor analysis - Implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*. 2004;11(3):201-11.
27. Thorsson S, Lindberg F, Björklund J, Holmer B, Rayner D. Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: The influence of urban geometry. *International Journal of Climatology*. 2011;31(2):324-35.
28. Erell E, Williamson T. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology*. 2007;27(9):1243-55.
29. Erell E, Pearlmutter D, Boneh D, Kutiel PB. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*. 2014;10(P2):367-86.
30. Oke TR. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*. 1988;12(4):471-508.
31. Fallmann J, Emeis S, Suppan P. Mitigation of urban heat stress -a modelling case study for the area of Stuttgart. *Erde*. 2013;144(3-4):202-16.
32. Park HS. City size and urban heat island intensity for Japanese and Korean cities. *Geographical Review of Japan, Series A*. 1987;60(4):238-50.
33. Klysiak K, Fortuniak K. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*. 1999;33(24-25):3885-95.
34. Klysiak K. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*. 1996;30(20):3397-404.
35. Sailor DJ, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*. 2004;38(17):2737-48.
36. Sailor DJ. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*. 2011;31(2):189-99.
37. Charlson RJ, Schwartz SE, Hales JM, Cess RD, Coakley Jr JA, Hansen JE, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*. 1992;255(5043):423-30.
38. Kiehl JT, Briegleb BP. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*. 1993;260(5106):311-4.
39. Jacobson MZ. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*. 2001;409(6821):695-7.
40. Orru H, Andersson C, Ebi KL, Langner J, Åström C, Forsberg B. Impact of climate change on ozone-related mortality and morbidity in Europe. *European Respiratory Journal*. 2013;41(2):285-94.
41. Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, et al. Human health: Impacts, adaptation, and co-benefits. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects 2014*. p. 709-54.

42. Watts N, Adger WN, Agnolucci P, Blackstock J, Byass P, Cai W, et al. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *The Lancet*. 2015;386(10006):1861-914.
43. Oke TR. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967). 1973;7(8):769-79.
44. Zhou B, Rybski D, Kropp JP. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*. 2017;7(1).
45. Stoll MJ, Brazel AJ. Surface-air temperature relationships in the urban environment of phoenix, arizona. *Physical Geography*. 1992;13(2):160-79.
46. Mayer H, Höppe P. Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*. 1987;38(1):43-9.
47. Svensson MK, Eliasson I. Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning. *Landscape and Urban Planning*. 2002;61(1):37-54.
48. Konarska J, Holmer B, Lindberg F, Thorsson S. Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. *International Journal of Climatology*. 2016;36(5):2379-95.
49. Ali-Toudert F, Mayer H. Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theoretical and Applied Climatology*. 2007;87(1-4):223-37.
50. Thorsson S, Lindberg F, Eliasson I, Holmer B. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*. 2007;27(14):1983-93.
51. Mayer H, Holst J, Dostal P, Imbery F, Schindler D. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*. 2008;17(3):241-50.
52. Lee H, Holst J, Mayer H. Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. *Advances in Meteorology*. 2013;2013.
53. Givoni B. *Man, Climate and Architecture: Applied Science Publ.*; 1976.
54. Osczevski R, Bluestein M. The new wind chill equivalent temperature chart. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2005;86(10):1453-8.
55. SMHI. *Vindens kyleffekt*. 2017.
56. ISO7243. *Hot environments-estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (Wet Bulb Globe Temperature)*. International Standards Organization, Geneva; 1989.
57. Bergeron MF, Bahr R, Bärtsch P, Bourdon L, Calbet JAL, Carlsen K, et al. International Olympic Committee consensus statement on thermoregulatory and altitude challenges for high-level athletes. *British Journal of Sports Medicine*. 2012;46(11):770-9.
58. Höppe P. The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*. 1999;43(2):71-5.
59. Matzarakis A, Mayer, H. Another kind of environmental stress. *WHO News*. 1996;18:7-10.
60. Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI-Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*. 2012;56(3):421-8.
61. Fiala D, Havenith G, Bröde P, Kampmann B, Jendritzky G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*. 2012;56(3):429-41.
62. Lindberg F, Holmer B, Thorsson S. SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*. 2008;52(7):697-713.

63. Matzarakis A, Rutz F, Mayer H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*. 2010;54(2):131-9.
64. Hedquist BC, Brazel AJ. Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, U.S.A. *Building and Environment*. 2014;72(Supplement C):377-88.
65. Wu Z, Kong F, Wang Y, Sun R, Chen L. The impact of greenspace on thermal comfort in a residential quarter of Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016;13(12).
66. Salata F, Golasi I, Petitti D, de Lieto Vollaro E, Coppi M, de Lieto Vollaro A. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*. 2017;30:79-96.
67. Müller N, Kuttler W, Barlag AB. Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology*. 2014;115(1-2):243-57.
68. Musy M, Malys L, Morille B, Inard C. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Climate*. 2015;14(Part 2):213-23.
69. Maronga B, Gryscha M, Heinze R, Hoffmann F, Kanani-Sühring F, Keck M, et al. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: Model formulation, recent developments, and future perspectives. *Geoscientific Model Development*. 2015;8(8):2515-51.
70. Lindberg F, Grimmond CSB. 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*. 2011;105(3):311-23.
71. Lindberg F, Thorsson S, Rayner D, Lau K. The impact of urban planning strategies on heat stress in a climate-change perspective. *Sustainable Cities and Society*. 2016;25:1-12.
72. Thorsson S, Rayner D, Lindberg F, Monteiro A, Katschner L, Lau KKL, et al. Present and projected future mean radiant temperature for three European cities. *International Journal of Biometeorology*. 2017;61(9):1531-43.
73. Holmer B, Thorsson S, Lindén J. Evening evapotranspirative cooling in relation to vegetation and urban geometry in the city of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Climatology*. 2013;33(15):3089-105.
74. Konarska J, Lindberg F, Larsson A, Thorsson S, Holmer B. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees-application for outdoor thermal comfort modelling. *Theoretical and Applied Climatology*. 2014;117(3-4):363-76.
75. Matzarakis A, Endler C. Climate change and thermal bioclimate in cities: Impacts and options for adaptation in Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology*. 2010;54(4):479-83.
76. Thom JK, Coutts AM, Broadbent AM, Tapper NJ. The influence of increasing tree cover on mean radiant temperature across a mixed development suburb in Adelaide, Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2016;20:233-42.
77. Brown RD, Vanos J, Kenny N, Lenzholzer S. Designing urban parks that ameliorate the effects of climate change. *Landscape and Urban Planning*. 2015;138:118-31.
78. Konarska J, Uddling J, Holmer B, Lutz M, Lindberg F, Pleijel H, et al. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology*. 2016;60(1):159-72.
79. Perini K, Ottelé M, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*. 2011;46(11):2287-94.
80. Upmanis H, Eliasson I, Lindqvist S. The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*. 1998;18(6):681-700.

81. Petralli M, Massetti L, Brandani G, Orlandini S. Urban planning indicators: Useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. *International Journal of Climatology*. 2014;34(4):1236-44.
82. Bründl W, Mayer H, Baumgartner A. Untersuchung des einflusses von bebanung und bewachs auf das klima und die lufthygienischen verhältnisse in bayerischen grosstated, Stadtklima Bayern. Abschlussbericht zum Teilprogramm 'Klimamessungen Munchen'. 1986.
83. Oke TR. The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions - Royal Society of London, B*. 1989;324(1223):335-49.
84. Saito I, Ishihara O, Katayama T. Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*. 1990;15(3-4):493-8.
85. Ahmad S. Some effects of urban parks on air temperature variations in Kuala Lumpur, Malaysia. 2nd Tohwa University International Symposium, CUTEST'92. 1992:107-8.
86. Lindqvist S. Local climatological modelling for road stretches and urban areas. *Geografiska Annaler, Series A*. 1992;74 A(2-3):265-74.
87. Spronken-Smith RA. Energetics and Cooling in Urban Parks. *Energetics and Cooling in Urban Parks*. 1994.
88. Jauregui E. Microclima del Bosque de Chapultepec. 1975.
89. Jauregui E. Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and Buildings*. 1990;15(3-4):457-63.
90. Andersson-Sköld Y, Klingberg J, Gunnarsson B, Cullinane K, Gustafsson I, Hedblom M, et al. A framework for assessing urban greenery's effects and valuing its ecosystem services. *Journal of Environmental Management*. 2018;205:274-85.
91. Ward HC, Grimmond CSB. Assessing the impact of changes in surface cover, human behaviour and climate on energy partitioning across Greater London. *Landscape and Urban Planning*. 2017;165(Supplement C):142-61.
92. Folkhälsomyndigheten. Ljus och hälsa - En kunskapssammanställning med fokus på dagsljusets betydelse i inomhusmiljö. 2017.
93. Akbari H, Taha H. The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*. 1992;17(2):141-9.
94. Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*. 2001;70(3):295-310.
95. Silva HR, Phelan PE, Golden JS. Modeling effects of urban heat island mitigation strategies on heat-related morbidity: A case study for Phoenix, Arizona, USA. *International Journal of Biometeorology*. 2010;54(1):13-22.
96. Völker S, Baumeister H, Classen T, Hornberg C, Kistemann T. Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space - A health geographic perspective. *Erdkunde*. 2013;67(4):355-71.
97. Christen A, Meier F, Scherer D. High-frequency fluctuations of surface temperatures in an urban environment. *Theoretical and Applied Climatology*. 2012;108(1-2):301-24.
98. Honjo T, Takakura T. Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. *Energy and Buildings*. 1990;15(3-4):443-6.
99. Shashua-Bar L, Pearlmutter D, Erell E. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*. 2011;31(10):1498-506.
100. Nyuk Hien W, Puay Yok T, Yu C. Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment*. 2007;42(1):25-54.

Folkhälsomyndigheten är en nationell kunskapsmyndighet som arbetar för en bättre folkhälsa. Det gör myndigheten genom att utveckla och stödja samhällets arbete med att främja hälsa, förebygga ohälsa och skydda mot hälsorhot.

Vår vision är en folkhälsa som stärker samhällets utveckling.



Folkhälsomyndigheten

Solna Nobels väg 18, SE-171 82 Solna **Östersund** Forskarens väg 3, SE-831 40 Östersund.

www.folkhalsomyndigheten.se