

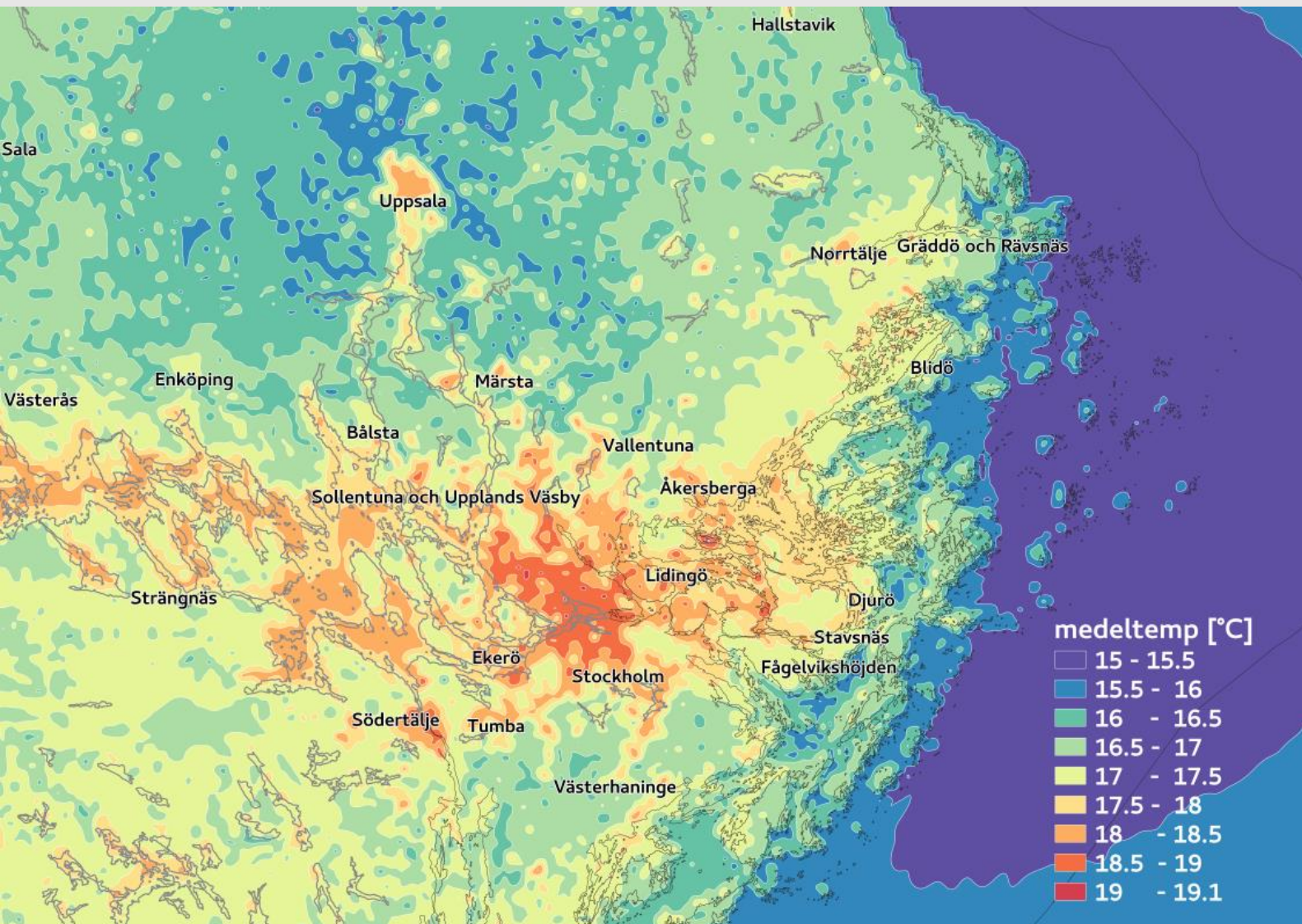


Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

FORSKNING

Fysisk planering i ett varmare klimat

En fallstudie för Stockholm



Fysisk planering i ett varmare klimat

Tidsperiod: 2016-2020

Utförare: SMHI

Ansvarig: David Segersson

Kort sammanfattning

Denna rapport sammanfattar resultaten från en fallstudie inom forskningsprojektet HazardSupport, som SMHI och SEI genomfört på uppdrag av Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap. Syftet med fallstudien var att undersöka vilken potential fysisk planering har för att minska lufttemperaturen i Stockholm och därigenom bidra till minskade hälsoeffekter på grund av värmestress.

Hur det urbana klimatet påverkas av att Stockholm växer och förtätas undersöktes med sommaren 2014 som referensår. En väderprognosmodell användes för att beräkna vilka sommartemperaturer vi skulle haft med ett Stockholm motsvarande detaljplaner och tillväxtscenarier för år 2030 respektive 2050. De huvudsakliga slutsatserna från projektet är:

- Åtgärder inom stadsmiljön för att minska sårbarheten vid värmebölja bör i första hand ha fokus på direkta effekter inom närområdet – t.ex. närhet till grönområden och skugga.
- Ett gott underlag för klimatplanering bör förutom de varmaste dagarna på året, även ta hänsyn till den kalla och mörka delen av året och beroende på typen av vistelsemiljö, eventuellt även inkludera effekten av såväl vind som nederbörd.
- Vid planering av bostäder eller vistelsemiljöer för sårbara grupper såsom äldre eller sjuka bör ett större fokus läggas på att erbjuda svalka under sommarens varmaste dagar.

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)

MSB:s Kontaktpersoner: Ulrika Postgård, 010-240 50 33

Bild omslag: Medellufttemperatur 2 meter över mark, jun-aug 2014

Text: David Segersson, Jorge H. Amorim

Tryck: DanagårdLiTHO

Publ. nr: MSB1679 december 2020

ISBN: 978-91-7927-093-3

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport. Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

Förord

SMHI har utfört denna fallstudie inom ramen för HazardSupport, ett projekt finansierat av MSB. Lena Strömbäck vid SMHIs forskningsavdelning var projektledare och David Segersson, samt Jorge H. Amorim var ansvariga för genomförandet av fallstudien.

Stockholm Stad har gett värdefullt stöd till studien och bidragit med underlag och tid för möten. Ett särskilt tack riktas till Christina Wikberger och Peter Wiborn vid Miljöförvaltningen, samt Virginia Kustvall Larsson vid Stadsbyggnadskontoret för deras engagemang.

Karin André och Linn Järnberg, forskare vid Stockholm Environmental Institute, har faciliterat kontakterna mellan forskare på SMHI och Stockholm Stad. Christofer Åström, forskare i epidemiologi vid Umeå Universitet, har bidragit med beskrivning av hälsokonsekvenser av värmestress. Gustav Strandberg vid Rossby Center på SMHI har bidragit med beskrivning av hur risken för värmeböljor kan komma att förändras i framtiden.

En vetenskaplig artikel publiceras under 2020 i tidskriften Urban Climate (*Amorim J.H., Segersson D., Körnich H., Asker C., Olsson E., Gidbagen L., High resolution simulation of Stockholm's air temperature and its interactions with urban development*).

Norrköping, 2020-06-02

David Segersson

Forskare inom luftmiljö och urbant klimat, SMHI

Innehåll

INLEDNING	5
SYFTE	5
BAKGRUND	6
Hälsoeffekter av värmestress	6
Blir det fler värmeböljor i framtiden?	7
Högre temperatur i staden	7
Grön infrastruktur	8
Lufttemperatur och strålningsvärme	9
METOD	10
Modellberäkningar	10
Beräkningsmodell	12
Beskrivning av markytan	14
Scenarier	15
Scenario för år 2030	16
Scenario för år 2050	16
RESULTAT	17
Jämförelse med mätningar	18
Utvärdering av scenarier	22
SLUTSATSER	25
Planera för god komfort	26
REFERENSER	27

Inledning

Klimatförändringarna väntas leda till att klimatet blir varmare framöver. Inte minst kan vi vänta oss värmeböljor som blir längre och inträffar oftare i framtiden.

SMHI har beräknat att extremt varma tillfällen som hittills inträffat vart tjugonde år i genomsnitt kan inträffa vart tredje till femte år i slutet av århundradet (Nikulin et al., 2011; Collins et al., 2013). Höga temperaturer under längre tid kan få negativa effekter på vår hälsa. Äldre och sjuka människor är särskilt utsatta.

Över de senaste årtiondena har konsekvenserna av värmeböljor nästan årligen uppmärksammats i media. En ögonöppnare var värmeböljan 2003, då omkring 70 000 förtida dödsfall i 16 europeiska länder kunde relateras till höga temperaturer (Robine et al., 2008). I Paris, som drabbades hårt av värmeböljan, var högsta dygnstemperaturen ca 36 °C under mer än en vecka och orsakade 15 000 dödsfall (Fouillet et al. 2016). Motsvarande temperatur har hittills endast uppmätts i Sverige enstaka gånger, men norra Frankrike idag går att jämföra med det klimat som kan förväntas i södra Sverige i slutet av seklet. Efter denna händelse inledde flera länder i Europa ett arbete för att förbättra sin beredskap för värmeböljor. I Sverige ökade insikten om att värmeböljor kan ha stora konsekvenser på samhället ytterligare under sommaren 2018. I takt med den pågående uppvärmningen kan vi förvänta oss att de problem som uppstod under 2018 blir vanligare i framtiden.

För att minska hälsoeffekterna av en värmebölja ökar kraven på beredskap inom sociala myndigheter, kommunal verksamhet och inom vården. Beredskap handlar t.ex. om råd och handlingsplaner kring hur man bör agera under en värmebölja. Även den varningstjänst för värmebölja som infördes av SMHI under år 2014 är ett led i beredskapsarbetet.

I ett längre perspektiv påverkas våra förutsättningar att hantera värmeböljor av hur vi bygger våra städer. För att utnyttja den potential att minska effekterna av en värmebölja som fysisk planering har, behövs förståelse och information kring hur temperaturförhållandena upplevs i olika delar av den bebyggda miljön och hur dessa påverkas av byggnader, material, växtlighet och vatten.

I större städer världen över övervägs strategier för att minska den urbana värmeeffekten. Stadsplanerare frågar sig också hur olika delar av staden kan utformas för att förbättra tillgängligheten till skuggiga och svalkande miljöer såsom parker.

Syfte

Denna rapport avser en fallstudie inom projektet HazardSupport. Syftet med fallstudien är att undersöka hur Stockholms pågående förtätning och expansion påverkar lufttemperaturen under sommaren. Att mikroklimatet påverkas av naturen och den bebyggda miljön är uppenbart. I detta projekt försökte dock även

klargöras i vilken utsträckning fysisk planering, genom strategisk användning av grön infrastruktur, har potential att allmänt, d.v.s. på något större skala, påverka lufttemperaturen i Stockholm. En närliggande fråga är: skulle en omfattande implementering av grönytefaktorn (GYF) i Stockholm ge effekter på lufttemperaturen även i delar av staden där metoden inte använts?

Ett ytterligare syfte med studien är att öka insikten i hur lufttemperaturen varierar inom staden. Till exempel att hur den urbana värmeö ser ut och vilken kylande effekt som erbjuds av parker och andra grönytor under sommaren.

Förhoppningen är att denna studie skall ge Stockholm Stad ytterligare pusselbit för att förstå vilka verktyg som är effektiva och vilka åtgärder som bör prioriteras i strävan efter ett gynnsamt urbant klimat och en god bebyggd miljö.

Bakgrund

Hälsoeffekter av värmestress

Värmerelaterad ohälsa är väldokumenterat såväl internationellt som i Sverige. En rad studier på svenska förhållanden har genomförts under 2000-talet. De flesta studier har fokuserat på Stockholm och funnit att höga temperaturer ökar både antalet sjukhusinläggningar och antalet dödsfall. Temperaturer påverkar främst hälsan hos personer med underliggande sjukdomar eller andra riskfaktorer. I studier har personer med en sjukdomshistorik som innefattar hjärt- och kärlsjukdomar, sjukdomar i andningsorganen och psykiatriska åkommor varit mer påverkade av de höga temperaturerna. Studier från andra länder har funnit att personer som använder viss typ av medicin också kommer att påverkas i större utsträckning. Detta handlar främst om vätskedrivande medicin samt psykofarmaka. Annan medicin som påverkar kroppens förmåga att reglera temperaturen misstänks också ökade en individs sårbarhet under en värmebölja. De tillstånd och omständigheter där man kunnat påvisa en minskad förmåga att hantera höga temperaturer är vanligast förekommande i den äldre delen av befolkningen. Därför har många insatser riktats mot just de äldre.

I Sverige har man även kunnat påvisa en ökning i antalet sjukhusinläggningar till följd av främst respiratoriska sjukdomar när temperaturerna stiger. Antalet dödsfall är dock ofta enklare att studera eftersom det inte varierar med t.ex. tillgänglighet på inom vården, vilket däremot ger tydliga säsongsvariationer och även veckomönster i antalet sjukhusinläggningar.

Även om studier kunnat påvisa relativt dramatiska hälsokonsekvenser kopplade till värmeböljor, så kom dessa konsekvenser inte att påverka beslutsfattare förrän sommaren 2018. Under den värmebölja som under fem veckor i juli och augusti 2018 drabbade Sverige, rapporterade Folkhälsomyndigheten att det inträffade ungefär 750 fler dödsfall än normalt. Modeller har senare kunnat visa att mellan 600 och 745 av dessa kan tillskrivas de höga temperaturerna. Ökningen i dödlighet drabbade hela landet, men det har visat sig att Stockholm drabbades allra värst. De

modeller som skattade ökningen visade på att ökningen i dödlighet för resten av landet följde de mönster man observerat under tidigare somrar, medan dödligheten i Stockholm ökade betydligt mer än vad modellerna skattade. Inga studier har undersökt vilka de underliggande orsakerna kan vara till att det var en så stor skillnad mellan Stockholm och andra delar av Sverige.

Blir det fler värmeböljor i framtiden?

I takt med att klimatet blir varmare ökar sannolikheten för värmeböljor. Det är en trend som redan kan observeras och som kommer att fortsätta i framtiden (Yan et al., 2002; Della Marta et al., 2007). I Skandinavien kan en värmebölja som idag inträffar var 20:e bli så vanlig att den inträffar vart 5:e år, medan de i södra Europa blir ännu vanligare (Nikulín et al., 2011; Collins et al., 2013). Förändringen är alltså olika i olika delar av världen. Förändringen av värmeböljor är inte heller proportionell till förändringen i medeltemperatur. På global skala så beräknas förekomsten av värmeböljor fördubblas om den globala medeltemperaturen ökar med en halv grad (Dosio et al., 2018). Till synes små begränsningar av den globala temperaturen har stor effekt på frekvensen av värmeböljor.

Det är svårt att koppla enskilda väderhändelser till klimatförändringen. Värmeböljor inträffar vid högtrycksblockeringar som är en del av vädrets slumpmässiga variationer. Däremot går det att säga att sannolikheten för värmeböljor ökar, eller att samma väderläge ger högre temperaturer idag än det hade för 50 år sedan (Otto et al., 2012). Genom sådana metoder går det att visa att några av de senaste årens värmeböljor sannolikt inte hade inträffat eller varit mindre extrema om det inte varit för den globala uppvärmningen.

Det bör noteras att det finns flera möjliga definitioner av en värmebölja. Den enklaste är att definiera en värmebölja som en sammanhängande period med temperaturer över ett visst tröskelvärde. Antalet dagar brukar då vara åtminstone tre för att perioden skall kunna kvalificeras som en värmebölja. Tröskelvärdet är specifikt för en viss region och det valda värdet beror på klimatet i regionen; vad som anses extremt på en plats är normalt på en annan. Om en definition utifrån en percentil används blir definitionen mer entydig. Idag finns mer förfinade index för värmeböljor som gör jämförelser mellan regioner och i framtida klimat mer robusta och kan ta hänsyn till såväl längden som intensiteten vid en värmebölja (Russo et al. 2014).

Högre temperatur i staden

Våra städer är speciellt utsatta. Bebyggda områden skapar högre temperaturer än sin omgivning, vilket har flera orsaker. Stadens hårdlagda ytor absorberar i regel mer solljus och lagrar mer värme än grönytor. Under natten avgår denna värme och höjer lufttemperaturen. Under dagen ger den begränsade växtligheten mindre avkylning (genom växternas transpiration) jämfört med omgivande landsbygd och hårdlagda ytor ger ifrån sig värmestrålning som höjer den upplevda temperaturen för människor i staden. Spillvärme från uppvärmning och avkylning av fastigheter,

transporter och olika verksamheter utgör ytterligare en värmekälla. Den förhöjda temperaturen i bebyggda områden kallas den urbana värmeöeffekten.

Värmeböljor är storskaliga fenomen som drabbar såväl stad som landsbygd. Det finns emellertid mekanismer som potentiellt kan förstärka en värmebölja i urban miljö. Li och Bou-Zeid (2013) nämner t.ex. att energibalansen vid marken vid värmeböljor förskjuts mot mer evapotranspiration (avdunstning och växternas vattenanvändning). Eftersom städer i regel har mindre vegetation och är torrare än omgivande landskap blir ökningen av evapotranspirationen mindre, vilket leder till en större skillnad mellan stad och landsbygd. En annan mekanism är den låga vindhastighet som ofta observeras under värmeböljor orsakade av persistenta högtryck. Vid låg vindhastighet förväntas värmeöeffekten intensifieras på grund av det lägre luftutbytet med omgivande svalare miljöer. För kustnära städer finns även en motverkande mekanism i form av en kraftigare sjöbris under värmeböljor (Lebassi et al. 2009, 2011).

Hur betydelsefulla dessa mekanismer är varierar troligen mellan olika städer. Lawaet et al (2015) undersökte förändringen av den urbana värmeöeffekten i flera städer i nuvarande och framtida klimat med hjälp av en meteorologisk beräkningsmodell. Trots de identifierade mekanismerna och den förväntade ökningen av antalet värmeböljor, upptäcktes endast en mycket begränsad ökning av värmeöeffekten.

Grön infrastruktur

Ekosystemtjänster och naturbaserade lösning är heta ämnen och betonar fördelarna med grön infrastruktur. En fördel som ofta nämns är den potentiellt avkylande effekten av skuggande lövverk och växternas transpiration. Den kylande effekten från växternas vattenanvändning begränsas av mängden vatten som transpireras. Därigenom kan mängden transpirerat vatten ge en grov uppskattning av en övre gräns för växternas avkylande potential. Växterna har en dygns cykel med ett minimum under nattetid och ett maximum vid mitt på dagen (Konarska et al., 2015). Maximal avkylande effekt i parkmiljöer har observerats ligga kring 1.5 °C - 3.5 °C, oberoende av det regionala klimatet (Saaroni et al., 2018). För gröna tak har det i simuleringar visats ett linjärt samband mellan andelen gröna tak och avkylningen av det atmosfäriska ytskiktet (Suter et al, 2016). Att klargöra potentialen för grön infrastruktur i en specifik stad och vilken lufttemperatur som människor exponeras för kräver dock hänsyn till fler faktorer. Den något svalare luften i parker och andra grönområden transporteras vidare av vinden och blandas över staden, vilket leder till en generell minskning av temperaturen. Denna avkylning, om än liten (typiskt < 1 °C), kan fortfarande vara värdefull eftersom väldigt många människor påverkas.

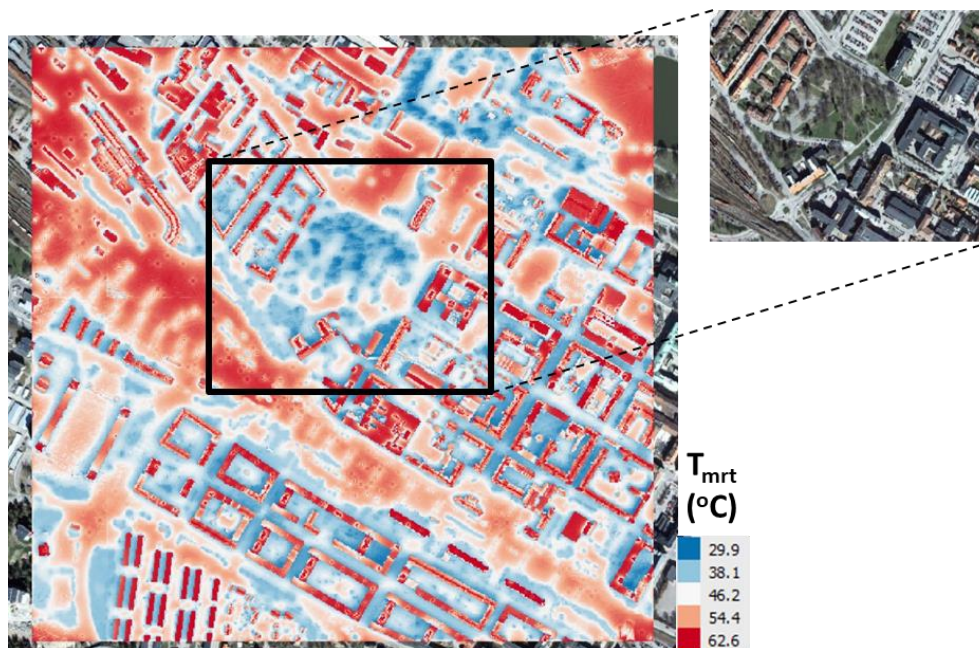


Figur 1. I Norra Djurgårdsstaden, Stockholm har GYF (grönytefaktorn) använts för att styra användning av grön infrastruktur i planeringsprocessen.

Ett verktyg som använts av stadsplanerare i Stockholm, t.ex. i Norra Djurgårdsstaden (se Figur 1), är Grönytefaktorn (GYF). Detta verktyg används för att objektivt jämföra och utvärdera förekomst och kvalitet av gröna ytor och vatten vid detaljplanering. I varje område ges poäng beroende på area av olika typer av grön infrastruktur eller vatten. Aspekter relaterade till värmestress som omfattas av GYF är lövskugga, gröna tak och fler-skiktad vegetation. Resultaten från GYF-metoden styrs mycket av vilken poäng som ansatts för en viss typ av grönyta; något som kan vara svårt att utvärdera. Värdet av minskad risk för värmestress på grund av grön infrastruktur är ett exempel på detta.

Lufttemperatur och strålningsvärme

En indikator som använts för att identifiera varma delar av staden i Stockholm är strålningsstemperatur (Mean Radiant Temperature). Detta anses ibland vara ett bättre mått på värmestress än lufttemperatur, eftersom det inkluderar effekten av solstrålning och värmestrålning. Särskilt direkt solljus är en viktig komponent när strålningsstemperatur beräknas. Förekomst av skugga från t.ex. byggnader och träd bestämmer hur mycket direkt solljus en person exponeras för i utomhusmiljön. Detta betyder att strålningsstemperatur får en mycket kraftigare rumslig variation än lufttemperatur (se exempel i Figur 2).



Figur 2. Strålningstemperatur MRT reduceras med 30°C i områden som är skuggade av byggnader och träd. Beräkningsresultat av modellen Solweig för Eskilstuna, den 26 juli 2014.

Den högsta strålningstemperaturen fås i direkt solljus nära söderväggar mitt på dagen. En svaghet med strålningstemperatur som mått på termisk komfort är att ingen hänsyn tas till vindavkyllning eller luftfuktighet. Av denna anledning passar strålningstemperatur främst som ett mått på upplevd temperatur under värmeböljor, då vindhastigheten normalt är låg och sjöar och kustnära vatten värmts upp och inte längre har någon betydande kylande effekt.

Metod

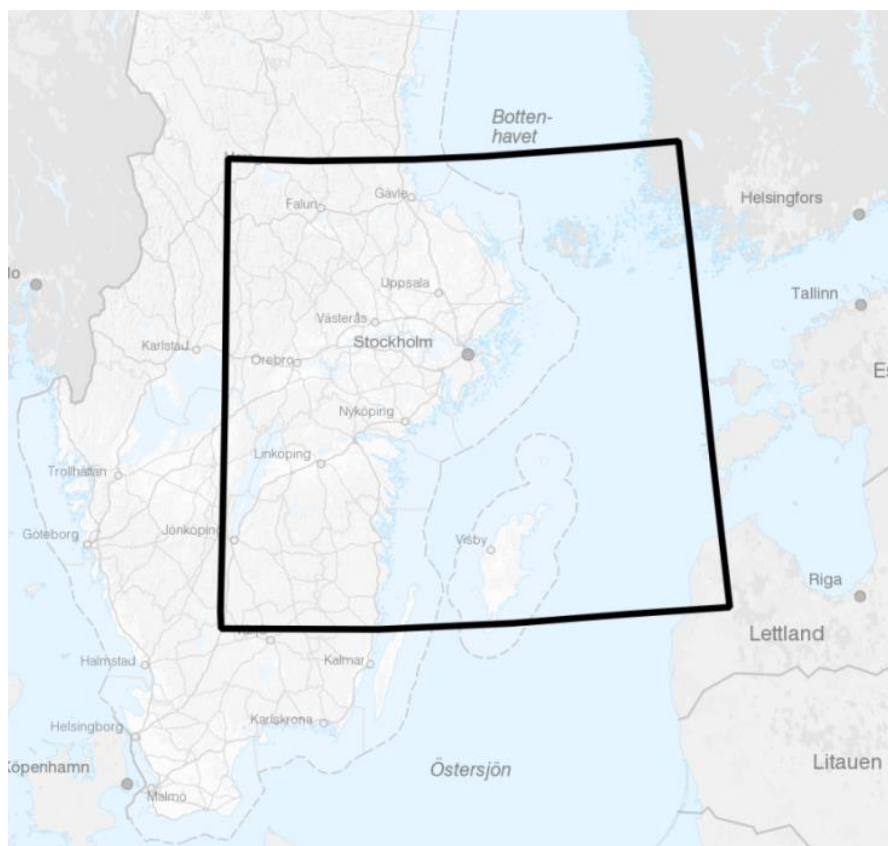
Hur lufttemperaturen i Stockholm kan påverkas genom fysisk planering, och förekomst av grön infrastruktur, har studerats med hjälp av datorsimuleringar. Numeriska experiment gör det möjligt att testa hur det urbana klimatet under ett visst år hade tett sig i en förändrad, framtida version av staden.

Som referens har sommaren år 2014 använts. Denna sommar var något varmare än normalt, med en kortare värmebölja i slutet av juli. Två olika scenarier, d.v.s. förändrade beskrivningar av Stockholms, har sedan utvecklats. Scenarierna speglar förändringar inom Stockholm stad fram till år 2030, respektive förändringar inom Stockholmsregionen fram till år 2050.

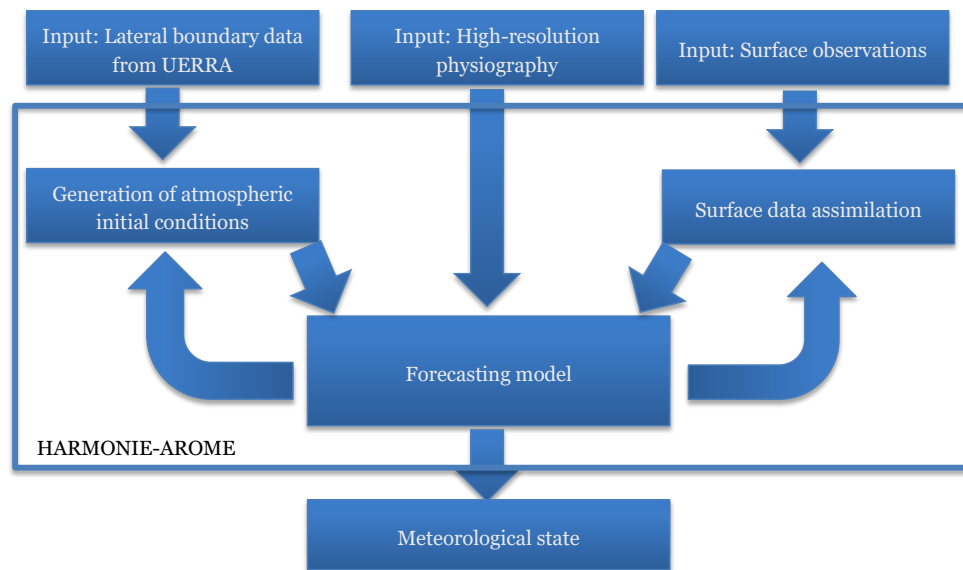
Modellberäkningar

Numeriska experiment har genomförts genom ett koncept som kallas dynamisk nedskalning. I detta sammanhang avser nedskalning att en förfinad analys av meteorologiska förhållanden genomförs med utgångspunkt från en grövre global

analys. Med ”dynamisk” avses att beskrivningen av olika processer huvudsakligen baseras på grundläggande fysikaliska lagar, snarare än statistik. Detta gör det möjligt att studera scenarier genom att justera utvalda parametrar i indata. Eftersom samma meteorologiska drivdata från sommaren 2014 används både för referensåret 2014 och för scenarierna kan de skillnader i temperatur som beräkningarna resulterar i helt relateras till förändringarna av fysiografien (beskrivningen av markytan). Eftersom värmestress endast är relevant under sommarmånaderna begränsas analysen till månaderna juni-augusti. I Figur 3 visas det område inom vilket modellberäkningar utförts. Området behöver vara betydligt större än Stockholmsregionen för att korrekt beskriva påverkan från kringliggande områden.



Figur 3. Området för modellberäkningarna.



Figur 4. Flödesschema för den dynamiska nedskalningen.

Figur 4 visar ett flödesschema för den dynamiska nedskalningen. Högupplösta fysiografiska data sammanställs, meteorologiska data för randvillkor hämtas från en återanalys (UERRA-ALADIN, Ridal et al 2016). En återanalys innebär en fusion av mätningar och modelldata som tagits fram i efterhand för att få en så konsistent, korrekt och komplett beskrivning av meteorologiska förhållandena som möjligt. Utanför Stockholmsregionen assimilerades även mätdata under modellberäkningarna. Inom Stockholmsregionen gjordes ingen assimilation för att tillåta den förändrade markbeskrivningen att fritt påverka resultaten.

Beräkningsmodell

Modellberäkningarna har genomförts med väderprognossystemet HARMONIE-AROME (cycle 40h1.1) (Bengtsson et al., 2017). HARMONIE-AROME används operationellt av länder inom HIRLAM-samarbetet. Till exempel gör Norge och Sverige gemensamma prognoser (Müller et al., 2017), och systemet utgör en del i förvaltningen av det gemensamma ALADIN-HIRLAM system som utvecklas av 26 länder.

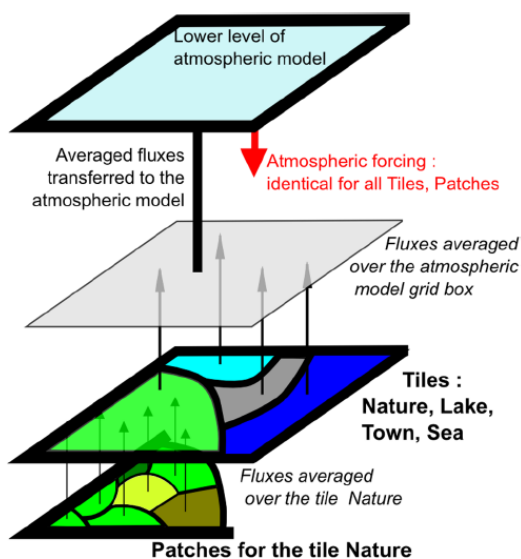
HARMONIE-AROME använder spektrala metoder för att lösa transportekvationerna inom ett begränsat område. De fysiska processer som beskrivs i modellen är avsedda att lösa upp konvektion, vilket kräver en rumslig upplösning av storleksordningen 1km. Eftersom vertikala vindhastigheter inte kan försummas på denna skala, på grund av konvektion och terräng, så görs inga förenklade hydrostatiska antaganden. Modell-parameterisering baseras på AROME (Seity et al., 2011). Specifika ändringar i prognossystemet HARMONIE-AROME som utvecklats inom HIRLAM-samarbetet beskrivs i Bengtsson et al. (2017). Vid SMHI har HARMONIE-AROME använts för värderprognoser sedan

2014. En mer detaljerad beskrivning av beräkningsmodellen ges i Amorim et al. (2020).

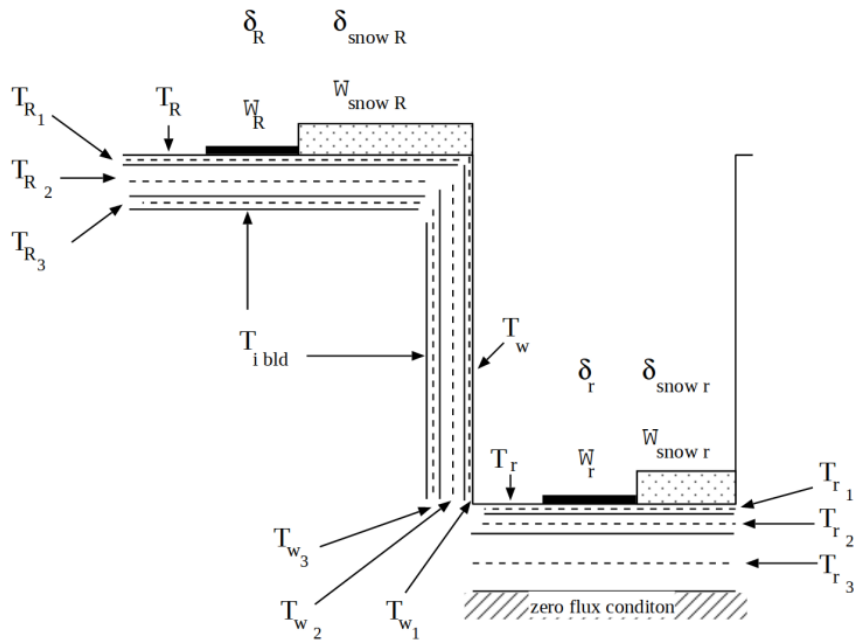
SURFEX (Surface Externalisée, Masson et al. (2013)) heter den komponent i modellsystemet som beskriver utbytet mellan atmosfären och jordytan. SURFEX beskriver markytan inom varje beräkningscell separat för fyra olika huvudtyper av jordyta: Vatten, Hav, Natur och Urbana områden. Resultat från dessa huvudtyper beräknas av olika modeller och parameteriseringar och vägs sedan samman utifrån vilken andel av beräkningscellen som de utgör. Tillsammans bidrar de olika huvudtyper till flöden av rörelsemängd, energi och fuktighet till eller från atmosfären. En schematisk illustration av uppbyggnaden av SURFEX kan ses i Figur 5.

För den urbana markytan kallas den modellen som körs i SURFEX för Town Energy Balance (TEB) (Masson, 2000). TEB representerar ett idealiserat gaturum med egenskaper som är representativa för en beräkningscell (se Figur 6). I detta projekt användes en rumslig upplösning på 1x1 km², vilket betyder att egenskaper för markytan, såsom byggnadshöjd eller andelar av olika typer av vegetation, medelvärdesbildas över detta område. Resultaten från modellen återspeglar därmed inte förhållandena i enskilda gaturum utan i en urban miljö representativ för varje beräkningscell.

Beskrivning av vattentemperatur i sjöar och kustvatten och utbytet mellan dessa vatten och atmosfären används modellen Flake (Le Moigne et al., 2016).



Figur 5. Schema som visar hur SURFEX kopplar till atmosfären och delar in markytan i huvudtyper (tiles). Varje huvudtyp delas sedan in i underkategorier (patches) med olika egenskaper såsom albedo, värmekapacitet m.m. (från Masson et al., 2013).

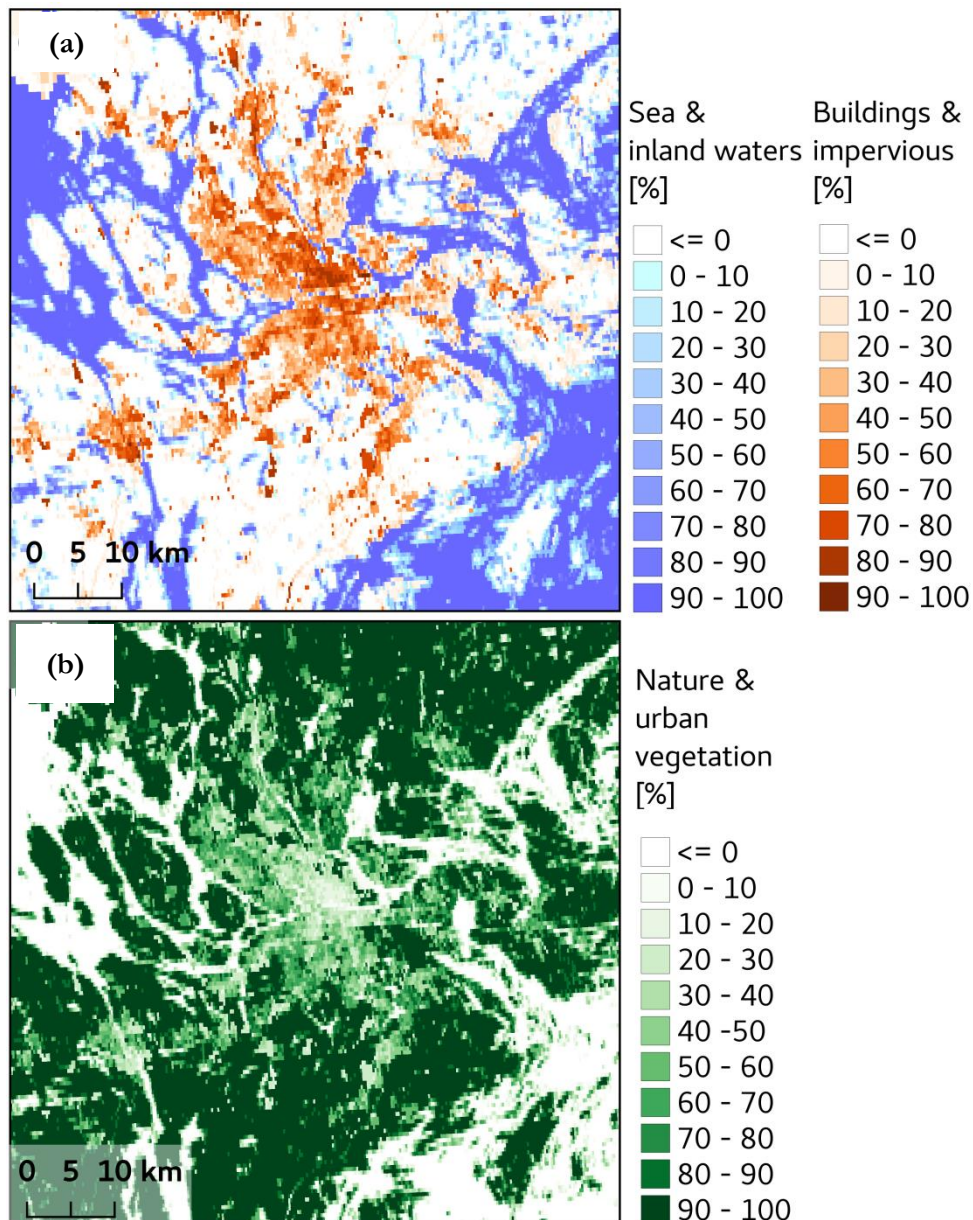


Figur 6. Gaturum som beskrivs av TEB-modellen och relaterade prognosvariabler (Le Moigne, 2012).

Beskrivning av markytan

Vanligtvis beskrivs markytan i SURFEX genom databasen ECOCLIMAP II (Faroux et al., 2013). För varje typ av yta i naturen eller i urbana miljöer finns nödvändiga parametrar såsom albedo, värmekapacitet, konduktivitet och höjd. För Leaf Area Index (LAI), vilket är ett mått på bladtäthet i vegetation, hämtas typiska värden samt variationer under året från satellitprodukter från EU's COPERNICUS-program. Byggnadshöjder och höjd/area-förhållanden för byggnader har justerats för att stämma med faktiska förhållanden i Stockholm. Utöver dessa förändrade egenskaper, har förekomsten av olika mark- och vegetationstyper beräknats utifrån olika datakällor. Den primära datakällan för olika marktyper är Urban Atlas (EEA, 2012). Urban Atlas användes istället för mer detaljerade nationella data för att tillåta att samma metod används i andra europeiska städer. Byggnadskonturer hämtades från OpenStreetMap (www.openstreetmap.org). Byggnadshöjder samt trädhöjd hämtades från Skogsstyrelsen.

Vektordata från Urban Atlas rasterades till en upplösning av 25x25 m² och aggregerades sedan för att beskriva andelar av varje marktyp med en upplösning om ca 300x300 m². För varje markklass i Urban Atlas förelades ytan på olika marktyper definierade i SURFEX-modellen. Fördelningen valdes utifrån definitioner av klasserna i Urban Atlas, samt genom jämförelse med satellitbilder. Andelen av de fyra huvudtyperna av mark som SURFEX använder presenteras tillsammans i Figur 7.



Figur 7. Andelar av olika huvudkategorier av markytan. Överst visas andelen byggnader och hårdlagda ytor, samt andelen vattenyta. Nederst visas andelen natur och urbana grönområden.

Scenarier

Förutom referensåret 2014 har två ytterligare scenarier beräknats. Ett scenario motsvarande planerad omvandling och utveckling för Stockholm Stad fram till 2030 och ett scenario motsvarande förväntad utveckling av Stockholmsregionen fram till 2050. Båda scenarierna innehåller olika förenklade antaganden, men bedöms motsvara en realistisk grad av förtätning och utbredning av stadens urbana ytor.

Scenario för år 2030

Stockholm Stad har bistått med information över områden med planerad förtätning eller omvandling fram till år 2030 (se Figur 8).

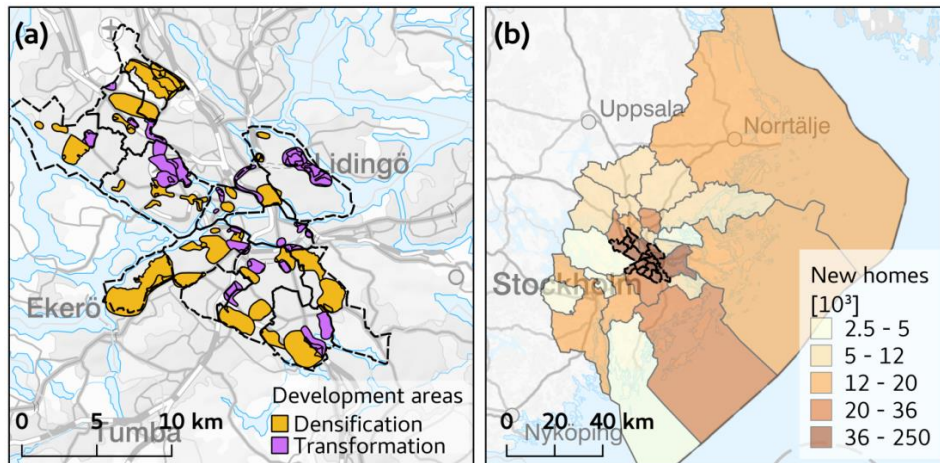
För varje område anpassas andel byggnader, vägar och grönområden motsvarande planerad omvandling. För områden med planerad omvandling kommer det troligen innebära stora förändringar, men beroende på tidigare markanvändning, inte nödvändigtvis orsaka en ökning av hårdlagda ytor och ökad byggnadstäthet. Förutom byggnader och vägar omfattar omvandling även t.ex. nya parker och annan grön infrastruktur.

För alla områden som visas i Figur 8a (lila och bruna polygoner), så specificerades att som mest 40 % av marken utgörs av vegetation. Där detta tröskelvärde överskreds klassas marken om som byggnader (70 %) och vägar (30 %). Genom att ange en maximal andel grönyta infördes förändringar endast i de områden som inte redan har tät bebyggelse. Ökningen av andelen hårdgjorda ytor relativt år 2014 presenteras i Figur 8a.

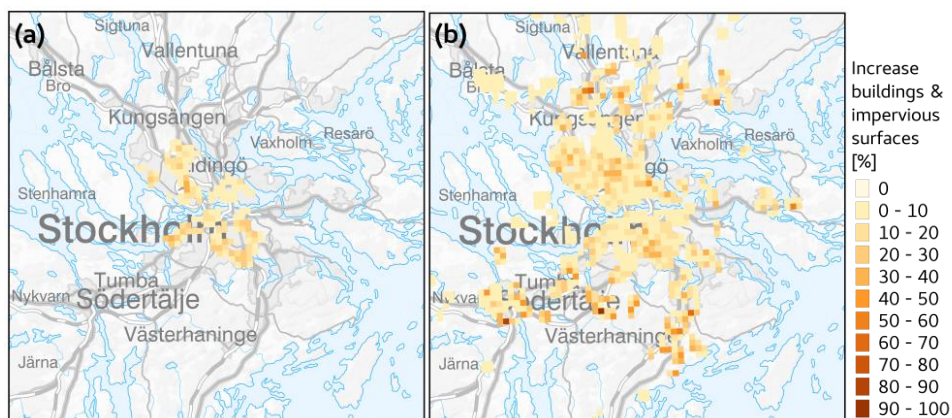
Ett officiellt mål för Stockholms är att bygga 140 000 nya bostäder innan 2030. Detta har använts för att kalibrera scenariot. Under antagandet att 70 % av nya byggnader utgör bostäder och att varje bostad i medel kräver 45 m² byggnadsyta, så uppgår antalet nya bostäder i scenariot till 142 000. Denna förenklade analys visar att scenariot är realistiskt. Den verkliga utvecklingen kommer att vara annorlunda, men effekten på det urbana klimatet kan förväntas att bli jämförbar.

Scenario för år 2050

Scenariot för år 2050 utgår från scenariot för år 2030. Antalet bostäder utökas sedan i enlighet med den regionala utvecklingsplanen för Stockholmsregionen (Region Stockholm, 2018). Natur- och grönområden omvandlas gradvis med början nära befintlig bebyggelse och fram tills att en byggnadsarea uppnåtts som motsvarar det prognosticerade antalet nya bostäder i varje kommun (se Figur 8b). Omvandling av natur- och jordbruksområden prioriteras före omvandling av parker eller grön infrastruktur. Naturresevat och andra skyddade områden exkluderas. Totalt uppgår antalet nya bostäder till ca 600 000. Ökningen av andelen hårdgjorda ytor relativt år 2014 presenteras i Figur 8b.



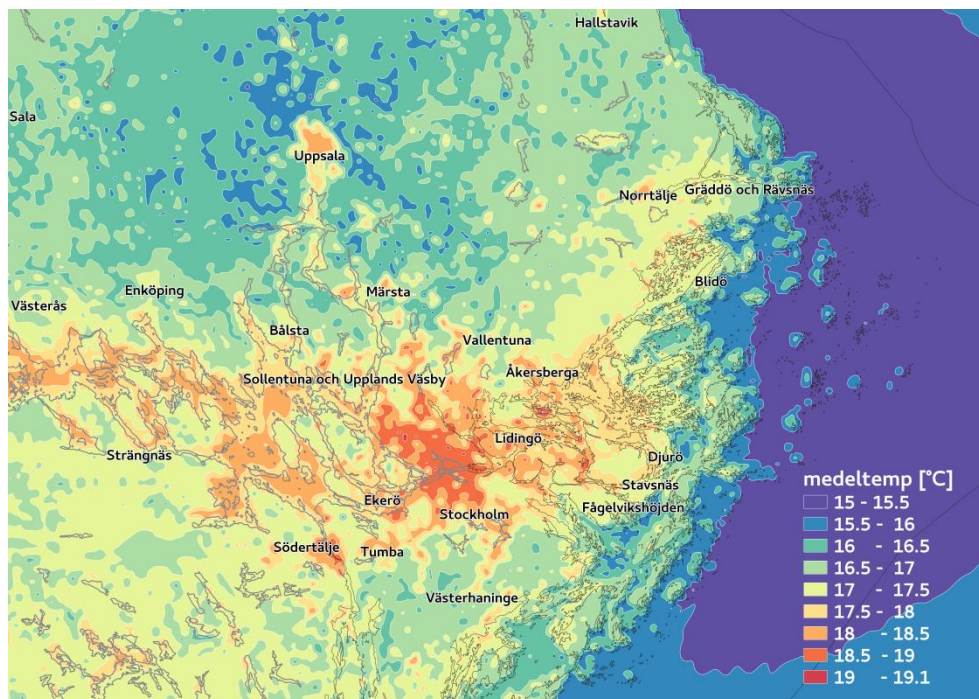
Figur 8. (a) Områden med planerad förtätning (orange) respektive omvandling (lila) fram till 2030. Det streckade svarta området anger det område som administreras av Stockholm Stad. (b) antalet nya bostäder fram till 2050 per kommun enligt RUFS (Region Stockholm, 2018).



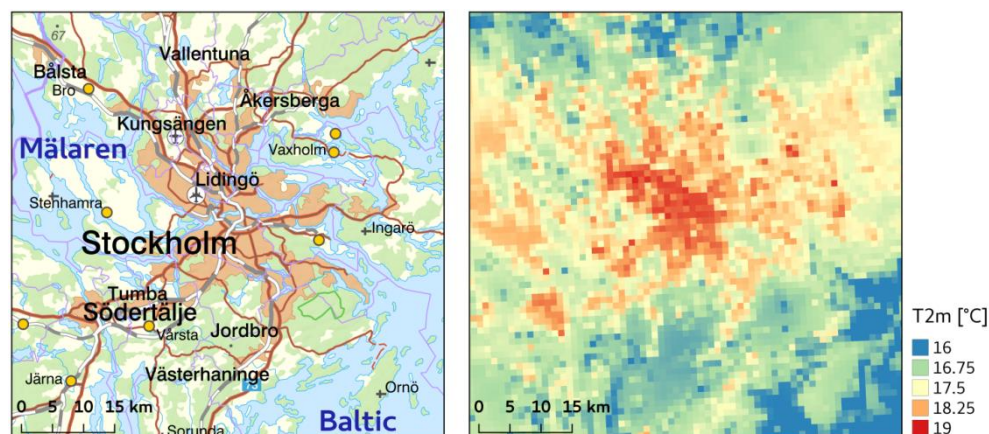
Figur 9. Ökning av andelen byggnader och hårdgjorda ytor relativt år 2014, (a) för år 2030 och (b) för år 2050.

Resultat

Medeltemperaturen under sommaren 2014 (jun-aug) visas i Figur 10. Stockholm har de högsta temperaturerna inom området, men förhöjda temperaturer ses tydligt även över närliggande tätorter såsom Uppsala och Södertälje. Under sommaren höjs även medellufttemperaturen över Mälaren med ca 1 °C. De lägsta temperaturerna inom området hittas över Östersjön. En närbild över temperaturer i Stockholm visas i Figur 11.



Figur 10. Beräknad medeltemperatur 2m över marken under sommaren 2014 (jun-aug). En urban värmeeffekt på 2-3 °C ses tydligt över Stockholm såväl som närliggande större tätorter. Även Mälaren höjder under sommaren medellufttemperaturen med ca 1 °C.



Figur 11. Beräknad medeltemperatur 2 m över marken under sommaren 2014.

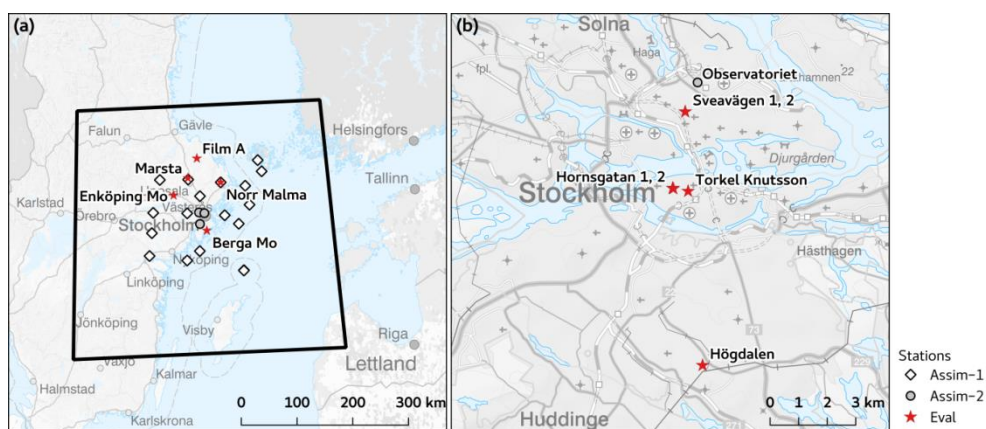
Jämförelse med mätningar

För utvärdering av modellresultaten studerades även åren 2006, 2007, 2012, 2013 och 2014 ut. För samtliga dessa 5 år genomfördes beräkningar med samma modelluppsättning som för referensåret 2014. Delar av dessa beräkningar genomfördes inom projektet Urban-SIS, ett försöksprojekt inom Copernicus Climate Change Service (C3S). Mer information om detta projekt ges i Gidhagen

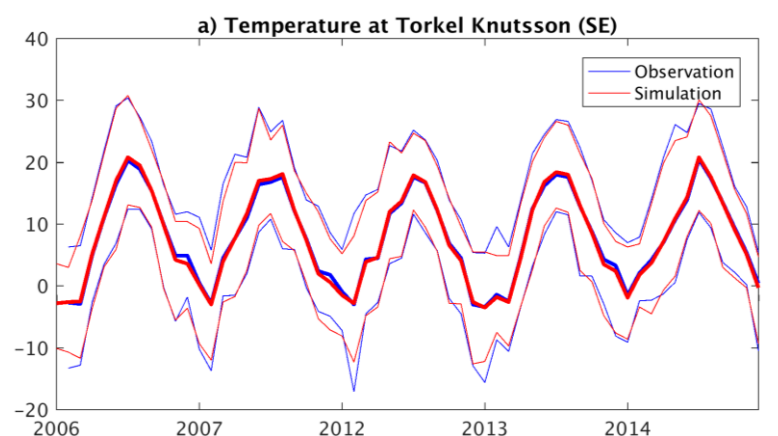
et al. (2020), med resultat tillgängliga för visualisering och nedladdning¹. Läget för de olika mätstationer som används för utvärderingen presenteras i **Figur 12**.

I **Figur 13** visas ett exempel på tidsserier av månadsvis min, max och medeltemperatur under de 5 modellerade åren. Generellt är samstämmigheten mellan modellerade och uppmätta temperaturer god. Det finns en tendens att underskatta de högsta månadstemperaturerna, särskilt under vintern. Under sommaren representeras dock även de högsta temperaturen väl.

Taylor-diagram presenteras separat för urbana och rurala stationer i Figur 14. Taylor-diagram (Taylor, 2001) är ett komprimerat sätt att visa hur väl modellberäkningar beskriver observerade data. En sammanställning av genomsnittliga statistiska mått ges även i **Tabell 1**.

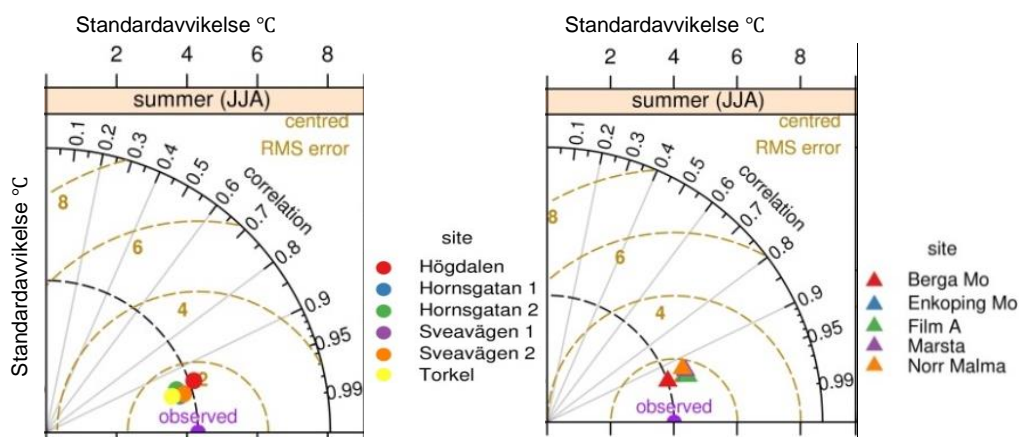


Figur 12. Meteorologiska stationer som använts. Stationer märkta med etiketten "Assim-1" assimilerades i beräkningarna. Stationer märkta med "Assim-2" exkluderades från assimileringen för att tillåta anpassning till den förändrade fysiografin i scenarierna. Stationer som använts i utvärderingen markeras av en stjärna och har etiketten "Eval".



Figur 13. Tidsserier av månadsmedelvärden i °C på Torkel. De tjockare linjerna avser medelvärden och de tunnare anger max och mintemperatur. Notera hoppet mellan 2007 och 2012.

¹ <https://urbansis.eu/>



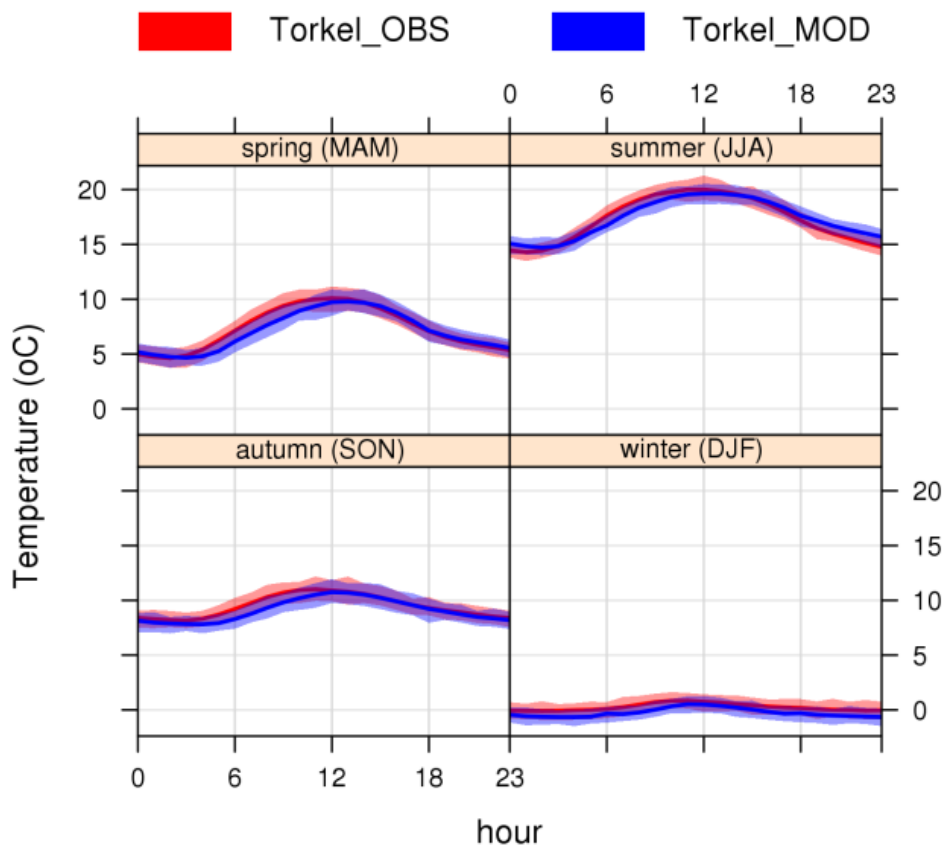
Figur 14. Taylor-diagram över modellens prestanda för urbana stationer (vänster) och rurala (höger). Sammanställningen bygger på 5-års simuleringar och avser temperatur 2m över marken, förutom för stationen Torkel (Torkel Knutssongatan), där modellresultat ca 20m över marken använts för att bättre motsvara mätplatsens höjd. Om modellresultaten överensstämmer helt med mätningarna sammanfaller punkterna med den observerade variabiliteten som är märkt med "observed" på x-axeln. Korrelationen är 1.0 är på x-axel och ökar radiellt enligt den svarta skalan. Jämförelsen visar på en hög korrelation mellan modellerade och uppmätta temperaturer vid samtliga stationer. Standard-avvikelsen, d.v.s. amplituden av variationerna, stämmer helt med mätningarna längs den streckade svarta linjen. Standardavvikelsen underskattas något för de flesta stationer i urban miljö (vänster) och överskattas istället för de flesta rurala stationerna (höger). De bruna streckade linjerna anger medelfelet (RMSE) och ökar med avstånd från punkter för observationerna på x-axeln. För samtliga stationer kan ses att medelfelet är < 2 °C.

Tabell 1. Sammanfattande statistisk jämförelse mellan uppmätta och beräknade temperaturer under sommaren 2014.

Typ av mätplats	Medelfel ⁽¹⁾ [°C]	Pearsons korrelations koefficient r [-]	Wilcox index of agreement d_r [-]
Medelvärde (alla stationer)	1.55	0.96	0.86
Standardavvikelse (alla stationer)	0.31	0.01	0.03
Medelvärde (urbana stationer)	1.32	0.97	0.88
Standardavvikelse (urbana stationer)	0.20	0.00	0.02
Medelvärde (rurala stationer)	1.82	0.96	0.84
Standardavvikelse (rurala stationer)	0.16	0.00	0.03

(1) RMSE (Root Mean Squared Error)

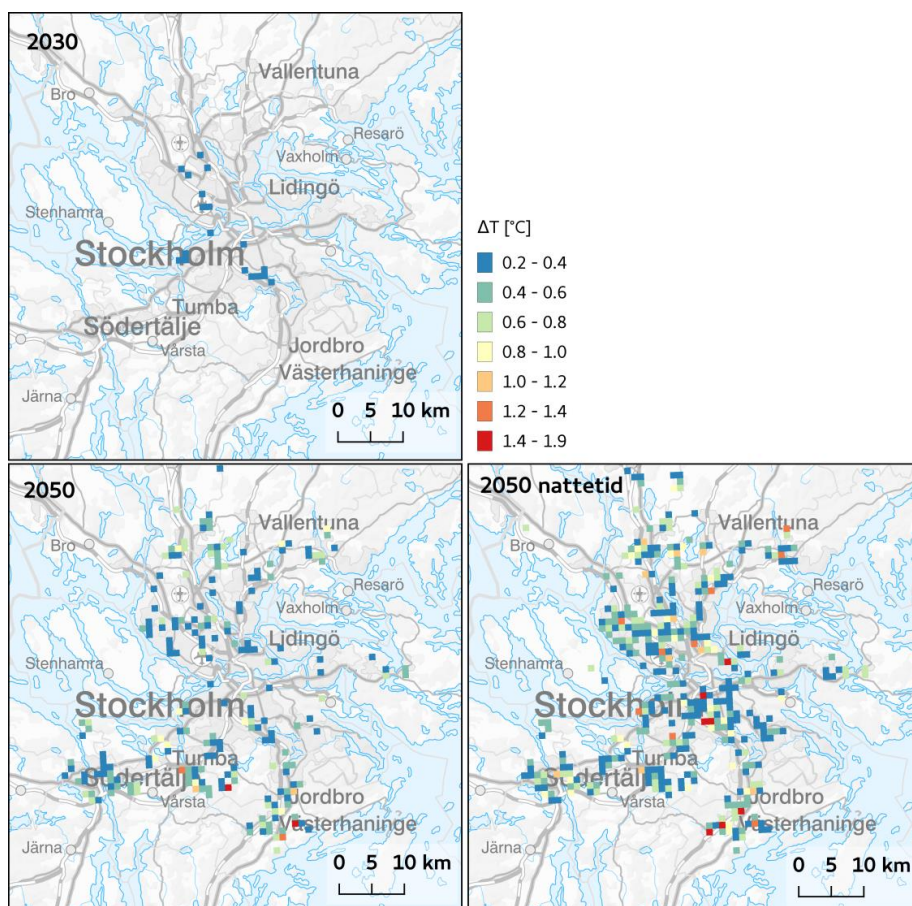
I Figur 15 visas en jämförelse mellan observerad och modellerad dygnsvariation av lufttemperaturen vid en mätstation på Torkel-Knutssongatan i centrala Stockholm. Den modellerade dygnsvariationen följer den observerade. Jämförelsen visar att modellberäkningarna ger något låga temperaturer på morgonen under vår och sommar. Eftersom den högsta temperaturen under dagen stämmer väl med observationerna, indikerar denna bias under morgonen att atmosfären värms långsammare i modellen än i verkligheten. Möjliga förklaringar till detta är osäkerheter i beskrivningen av moln och deras interaktion med strålning, förskrivna aerosol-nivåer i modellen eller osäkerheter i termiska egenskaper för hårdlagda ytor.



Figur 15. Jämförelse av observerad och modellerad dygnsvariation för lufttemperatur under 2014. Medelvärden visas som en linje och skuggningen anger 95 % konfidensintervall (tid i UTC).

Utvärdering av scenarier

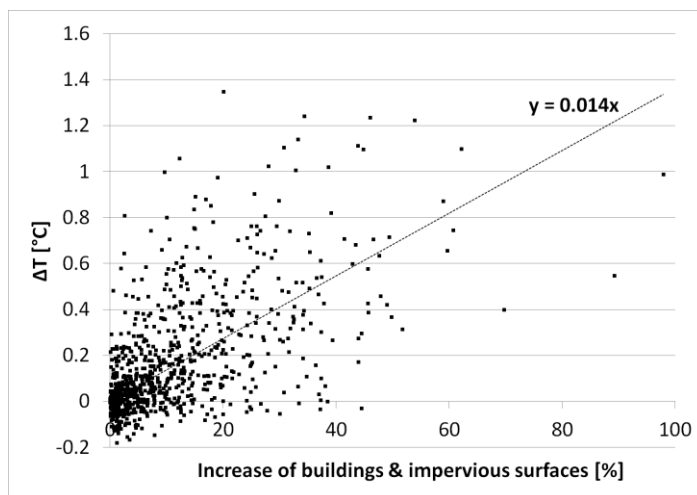
I Figur 16 presenteras skillnaden i lufttemperatur på två meters höjd mellan referensåret 2014 och scenarierna för år 2030 och år 2050. Bara skillnader större än 0.2 °C visas för att undvika numeriskt brus orsakat av den relativt korta tidsperioden. Scenarierna visar på en uppvärmning om 0.29 °C för år 2030 och 0.46 °C för år 2050. Enstaka beräkningspunkter visar på en temperaturhöjning upp till 1.35 °C i det senare scenariot. Den större temperaturökningen för år 2050 beror på den mer omfattande och utbredda förtätningen. En viktig observation är att förändringarna i båda scenarierna är tydligt avgränsade till de ytor där förändringar av fysiografin gjorts. I Figur 16c visas temperaturökningen nattetid. I de områden där fysiografin ändrats blir temperaturökningen nattetid upp till 0.5 °C högre än ökningen för hela dygnet. Denna effekt nattetid förklaras av den långsammare avkyllningen av de i högre utsträckning hårdlagda ytorna under år 2030 och år 2050. Denna skillnad är välkänd och samma process förstärker den urbana värmeö-effekten under lugna klara nätter (Oke et al. 2017).



Figur 16. Skillnad i sommarmedeltemperatur på 2 meters höjd mellan referensåret 2014 och scenario för Stockholm Stad 2030 (överst till vänster), scenario för Stockholmsregionen 2050 (nederst till höger) och scenario för stockholmsregionen 2050, nattetid (nederst till höger).

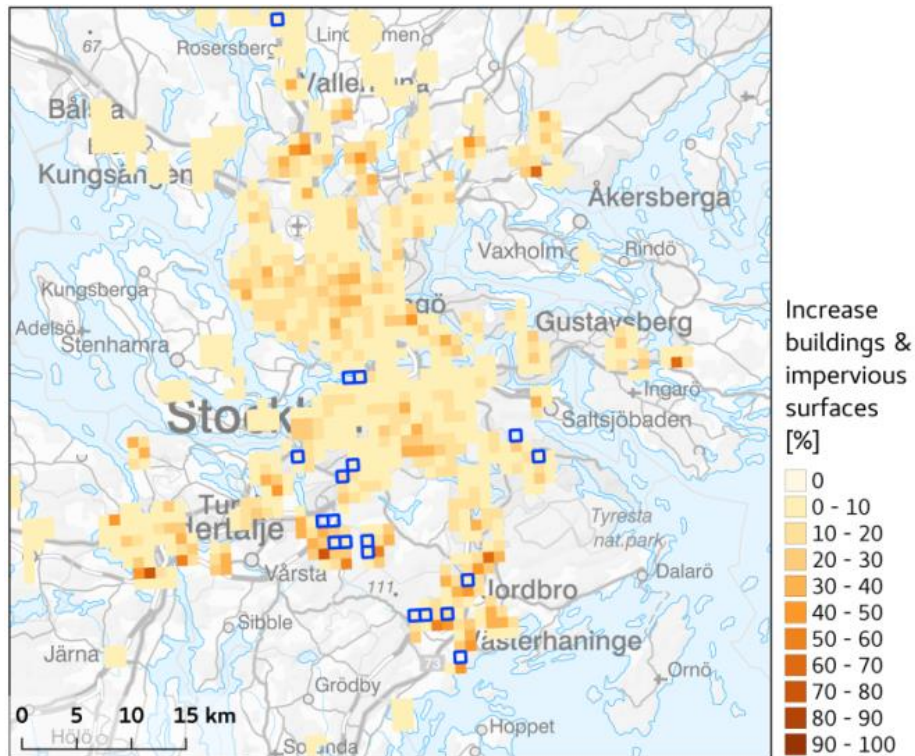
Huvudsakligen två observationer utifrån Figur 16 studeras vidare, dels intensiteten av den beräknade uppvärmningen i relation till graden av förtätning och dels hur stort område som påverkas vid förtätning. Förändringen av temperatur i förhållande till förtätning (här uttryckt som % av markytan som omvandlas från vegetation till vägar eller byggnader) presenteras i Figur 17. Sambandet är svagt linjärt ($R^2 = 0.34$) med stor spridning, vilket gör att det krävs försiktighet vid tolkning. En indikativ uppskattning kan dock ges att 10 % förtätning ger en temperaturökning på 0.14 °C. Den stora spridningen beror på att beräkningspunkterna påverkar varandra, men också att förtätningen i modellen består i omvandling från olika kombinationer av vegetation, som alla har olika egenskaper. Värden under 0.2°C bör inte beaktas då dessa ligger inom den numeriska osäkerheten från modellen vid medelvärdesbildning över denna relativt korta tidsperiod.

En närmare analys visar som väntat att den kraftigaste temperaturökningen i scenarierna fås där naturmiljöer omvandlas till urbana miljöer. Detta indikerar att uppvärmningen främst är lokal. En fördjupad analys görs också för att klargöra vilket påverkansområde förtätning inom ett område har. I Figur 18 visas den förtätning och utbredning av urbana miljöer som är implementerad i scenariot för år 2050. I figuren markeras även alla beräkningsceller med en signifikant temperaturökning (> 0.2 °C) där ingen lokal förändring av markförhållandena gjorts, vilket endast observerades i 19 fall. De flesta fallen finns i söder där förtätningen är mer omfattande. Samtliga fall ligger i direkt anslutning till beräkningsceller där förändringar har gjorts i scenarierna. Detta indikerar att påverkan av medeltemperaturen i modellresultaten som mest sträcker sig 1-2 km. I dessa fall krävs också omfattande förtätning inom flera kvadratkilometer.



Figur 17. Temperaturökning orsakad av förtätning (ökning av andelen av markytan som täcks av byggnader eller vägar). Alla de beräkningsceller där fysiografin ändrats i scenariot för år 2050 visas.

Eftersom de mest centrala delarna av staden är mycket tätbebyggda redan idag, är den ytterligare förtätningen av dessa områden mycket begränsad i scenarierna. Detta har som följd att ingen signifikant temperaturökning kan ses inom detta område i scenarierna, vilket ytterligare bekräftar tidigare observation att uppvärmningen i modellresultaten är begränsad till ett avstånd på upp till 1-2 km, även vid omfattande förtätning. Detta kan troligen till viss del förklaras av Stockholms vattennära läge och större stadsnära naturområden, som ger förutsättningar att effektivt ventilerar bort varmare luft.



Figur 18. Förtätning (ökning av andel byggnader eller hårdlagda ytor) i procent. Beräkningsceller med signifikant temperaturökning utan att någon lokal förtätning utförts markeras med blå fyrkanter.

Slutsatser

För att långsiktigt kunna ta hänsyn till klimatet vid planering av våra städer krävs förståelse för det urbana klimatet och hur det påverkas av stadens fysiografi och de val som görs inom stadsplaneringen. Stadsplanering görs med olika tidshorisonter. På längre sikt finns möjligheter att påverka processen genom att ställa krav och ta fram riktlinjer som används vid framtagning av detaljplaner. Ett exempel på detta är grönytefaktorn, som gör det möjligt att styra utvecklingen av staden och i högre grad dra nytta av de ekosystemtjänster som grön infrastruktur kan ge oss (Persson et al., 2018).

Inom stadsplanering står man inför många val rörande åtgärder för att långsiktigt minska hälsorisker kopplade till värmestress. Resultaten från denna studie indikerar att lokala åtgärder med direkta effekter på klimatet inom den enskilda detaljplanen eller gatumiljön bör prioriteras. Exempel på åtgärder som ger direkta effekter är plantering av skuggande gatuträd (se exempel i Figur 19) och förbättrad tillgång till grönområden med skugga och svalare luft. I närheten av äldreboenden eller andra platser med människor i riskgrupper är tillgång av svalkande vistelsemiljöer i närheten särskilt viktig.

Med indirekta effekter på utomhustemperaturen avses att luften kyls och för med sig svalka när den rör sig och blandas över närmiljön och staden. Åtgärder som ger denna typ av effekter är t.ex. val av material och färg på tak, användande av gröna tak och förekomst av grönområden där få människor vistas. Även om dessa åtgärder inte studeras var för sig, indikerar resultaten från denna känslighetsstudie att effekten från denna typ av åtgärder har en begränsad avkylande potential, även vid omfattande förändringar över stora områden. Det utvärderade scenariot för år 2050 representerar relativt stora förändringar (motsvarande 600 000 nya bostäder i Stockholmsregionen). Den beräknade förhöjningen av medeltemperaturen uppgår till 1-2 °C som mest, vilket avser omvandling av naturmiljöer till tät bebyggelse. Ingen generell ökning av temperaturen i staden ses dock och temperaturen som förtätade stadsdelar når motsvarar den som tätbebyggda delar av staden har redan idag.



Figur 19. Skuggande gatuträd i Malmö.

Planera för god komfort

En stor del av hälsokonsekvenserna av höga temperaturer sker under värmeböljor. Dessa extremhändelser utgör emellertid en mycket kort del av tiden och är därmed bara en av olika aspekter som bör beaktas vid klimatplanering. Att konsekvent minimera direkt solstrålning och maximera avkylande faktorer såsom vind ger inte en god bebyggd miljö. Ett gott underlag för klimatplanering bör förutom de varmaste dagarna på året, även ta hänsyn till den kalla och mörka delen av året och beroende på typen av vistelsemiljö, eventuellt även inkludera effekten av såväl vind som nederbörd. Vid planering av bostäder eller vistelsemiljöer för sårbara grupper såsom äldre eller sjuka bör ett större fokus läggas på att erbjuda svalka under sommarens varmaste dagar.

Förutom lufttemperaturen påverkas människor även av värmestrålning från ytor. Strålningstemperatur är ett mått för att beskriva den upplevda effekten av både lufttemperatur och strålning. Precis som köldeffekt ofta används för att beskriva hur temperaturen upplevs när det blåser, så används strålningstemperaturen för att beskriva hur temperaturen upplevs med hänsyn till sol- och värmestrålning. Begreppet kan förklaras som en ekvivalent lufttemperatur, som ger samma effekt på en människa som summan av de strålningskomponenter som kroppen utsätts för. Strålningstemperatur tar inte hänsyn till vind, luftfuktighet eller avkylning genom avdunstning, men är ett bra mått på upplevd temperatur under en värmebölja, då det ofta är låg vindhastighet. Strålningstemperaturen varierar kraftigt i bebyggd miljö, främst beroende på skuggförhållandena, men även beroende på förekomst och typ av hårdlagda ytor. Strålningstemperatur kan vara en del i ett användbart underlag för klimatplanering.

Ytemperatur beräknad från infraröda satellitbilder under varma sommark dagar är ett annat mått på hur värmestrålning från markytan varierar i stadsmiljön. Detta ger ett detaljerat material för att identifiera större områden med hårdlagda ytor och avsaknad av skugga i den befintliga stadsmiljön.

Det är en utmaning att beakta alla olika aspekter vid klimatplanering. För att sammanfatta påverkan av olika klimatparametrar på ett översiktligt sätt kan man använda komfortindex. Ett exempel på ett sådant index är UTCI (Universal Thermal Climate Index). Detaljerade kartlager över komfortindex för olika årstider inom en detaljplan ger ett komplett och överskådligt underlag. Användning av denna typ av underlag är mycket begränsad i Sverige idag, men förutsättningar finns för att skapa standardiserade verktyg som gör denna typ av underlag betydligt mer lättillgängliga.

En förhöjd ambitionsnivå för klimatplanering och användande av väl anpassade planeringsunderlag ger goda förutsättningar att skapa miljöer med ett gott urbant klimat, såväl idag som i ett framtida klimat.

Referenser

Amorim JH, Körnich H, Strömbäck L, Asker C, Olsson E, Samuelsson P, Segersson D, Gidhagen L, 2017. Urban SIS D441.3.1 Urban climate ECV and impact indicator data for historical conditions. Copernicus Climate Change Service (C3S). Official reference number service contract: C3S_441_Lot3_SMHI_2017/SC2. 23 p. Available on-line at: <http://urbansis.climate.copernicus.eu/project-deliverables/>

Amorim JH, Segersson D., Körnich H., Asker C., Olsson E., Gidhagen L., (2020 – in press). High resolution simulation of Stockholm’s air temperature and its interactions with urban development. *Urban Climate*.

Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelién, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K., Lenderink, G., Niemelä, S., Pagh Nielsen, K., Onvlee, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Santos Muñoz, D., Subias, A., Tijn, S., Toll, V., Yang, X., and Ødegaard Koltzow, M., 2017. The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, doi: 10.1175/MWR-D-16-0417.1.

Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

EEA, 2012. Copernicus Land Monitoring Service – Urban Atlas. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas>

Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and Le Moigne, P. 2013. ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 563–582, doi:10.5194/gmd-6-563-2013.

Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyaux, C., Clavel, J., Jouglu, E., Hémon, D. 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health* 80, 16–24, doi: 10.1007/s00420-006-0089-4.

Gidhagen, L., Olsson, J., Amorim, J.H., Asker, C., Belusic, D., Carvalho, A.C., Engardt, M., Hundecha, Y., Körnich, H., Lind, P., Lindstedt, D., Olsson, E., Rosberg, J., Segersson, D., Strömbäck, L., 2020. Towards climate services for

- European cities: lessons learnt from the Copernicus project Urban SIS. *Urban Climate* 31, 100549, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100549>.
- Konarska J., Uddling J., Holmer B., Lutz M., Lindberg F., Pleijel H., Thorsson S. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *Int J Biometeorol*, 2015. DOI 10.1007/s00484-015-1014-x
- Lauwaet D., Hooyberghs H., Maiheu B., Lefebvre W., Driesen G., Van Looy S., De Ridder K., Detailed Urban Heat Island Projections for Cities Worldwide: Dynamical Downscaling CMIP5 Global Climate Models. *Climate* 2015, 3(2), 391-415
- Lebassi, B., and Coauthors, 2009: Observed 1970–2005 cooling of summer daytime temperatures in coastal California. *J. Climate*, 22, 3558–3573.
- Lebassi, B., J. Gonzalez, and R. Bornstein, 2011: Modeled large-scale warming impacts on summer California coastal-cooling trends. *J. Geophys. Res.*, 116, D20114, doi:10.1029/2011JD015759.
- Le Moigne P., SURFEX scientific documentation. Aug 2012.
- Le Moigne, P., Colin, J., and Decharme, B. 2016. Impact of lake surface temperatures simulated by the FLake scheme in the CNRM-CM5 climate model. *Tellus A*, 68, 31274, doi: 10.3402/tellusa.v68.31274.
- Li D., Bou-Zeid E., Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts, *J. Appl. Met. Clim.*, 2013;52:2051-2064
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94 (3), 357–397.
- Nikulin, G., E. Kjellström, U. Hansson, G. Strandberg, and A. Ullerstig, 2011: Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A*, 63, 41–55.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., Voogt, J., 2017. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. 252 pp. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>.
- Olsson J, Amorim JH, Körnich H, Sjökvist E, Gidhagen L, 2017. Urban SIS D441_Lot3.5.1 Validation of climate variables. Copernicus Climate Change Service (C3S). Official reference number service contract: C3S_441_Lot3_SMHI_2017/SC2. 28 p. Available on-line at: <http://urbansis.climate.copernicus.eu/project-deliverables/>
- Persson G., Wikberger C., Amorim J.H., 2018. Klimatanpassa nordiska städer med grön infrastruktur. *Klimatologi* Nr 50. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI). ISSN: 1654-2258. 60 p. <http://smhi.diva-portal.org/smash/get/diva2:1272429/FULLTEXT01.pdf>

- Ridal, M., Körnich, H., and Olsson, E. 2016. Report of results and datasets of two physics HARMONIE runs for spread estimation. Deliverable D2.5 of project UERRA. Available at <http://www.uerra.eu/publications/deliverable-reports.html>
- Robine JM, et al. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol.* 2008 Feb;331(2):171-8.
- Russo S et al 2014 Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world *J. Geophys. Res.* 119 D022098
- Region Stockholm, 2018, RUF5 2050, http://www.rufs.se/globalassets/e.-rufs-2050/rufs_regional_utvecklingsplan_for_stockholmsregionen_2050_tillganglig.pdf
- Saaroni H, Amorim JH, Hiemstra JA, Pearlmutter D, 2018. Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate* 24, 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V., 2011. The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976–991.
- Suter I., et al., A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs, *Urban Climate* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.007>
- Swedish Forest Agency, Skogliga grunddata, medelhöjd. Accessed 2016.
- Åström C. et al. 2014. Developing a Heatwave Early Warning System for Sweden: Evaluating Sensitivity of Different Epidemiological Modelling Approaches to Forecast Temperatures. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2015, 12, 254-267; [doi:10.3390/ijerph120100254](https://doi.org/10.3390/ijerph120100254)



Myndigheten för
samhällsskydd
och beredskap

I samarbete med:

SMHI