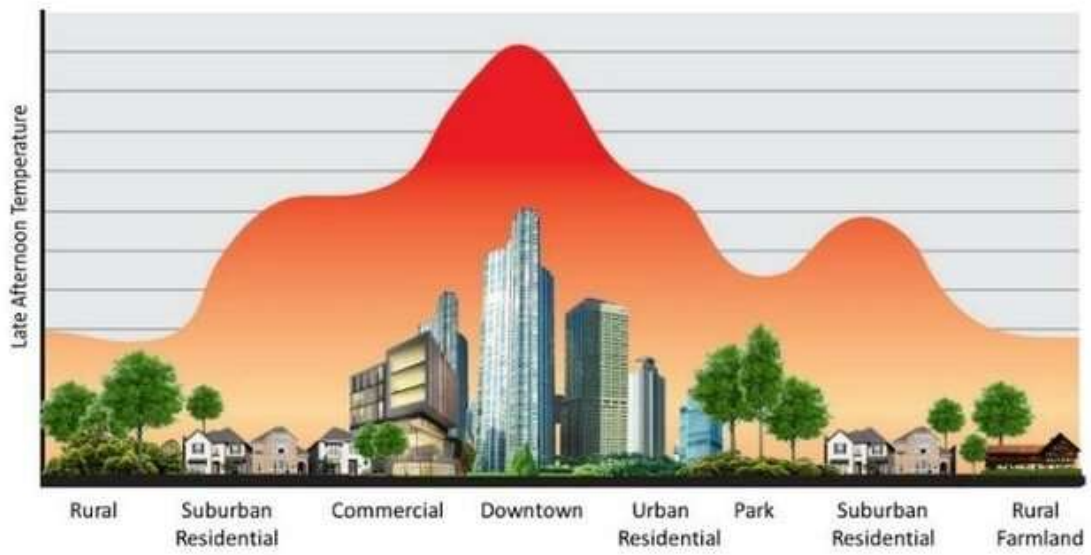


# Notat om Jernbanebyens varme-ø-forhold



## Forord

Dette notat er udarbejdet af Marina Bergen Jensen og Henrik Vejre, begge professorer ved Københavns Universitet, på opdrag fra Vesterbro Lokaludvalg.

Formålet med notatet er at give en vurdering af de fremtidige temperaturforhold, navnlig høje temperaturer, herunder varme-ø-effekten, i den kommende bydel på Godsbaneterrænet i København, "Jernbanebyen" jf. arkitektkonkurrencens vinderforslag, og desuden at pege på værktøjer, der kan reducere varmeøeffekten.

Notatet er udarbejdet i august 2024. Det er skrevet af Marina Bergen Jensen og kvalitetssikret af Henrik Vejre, og er alene forfatterens ansvar.

### Om forfatterne:

Marina Bergen Jensen er PhD i jordbundsvidenskab og professor i naturbaseret klimatilpasning af byer. Hun er medforfatter til rapporten "Urban Heat Island i København: Beskrivelse af fænomenet, vurdering af omfang i København, input til strategi for håndtering", udgivet i 2010. Aktuelt forsker hun i muligheden for at koble lokal håndtering af regnafstrømning til køling af byen.

Henrik Vejre er PhD i skovøkologi, og professor i landskabsforvaltning. Han har bredt beskæftiget sig med planlægning og forvaltning af grønne områder i Storkøbenhavn, og har specifikt forsket i betydningen af grønne områder for klima og velbefindende i byer. Han er medforfatter til 13 videnskabelige publikationer om UHI, klima i byer og befolkningens livskvalitet i forhold til det urbane klima.

### Opdrag

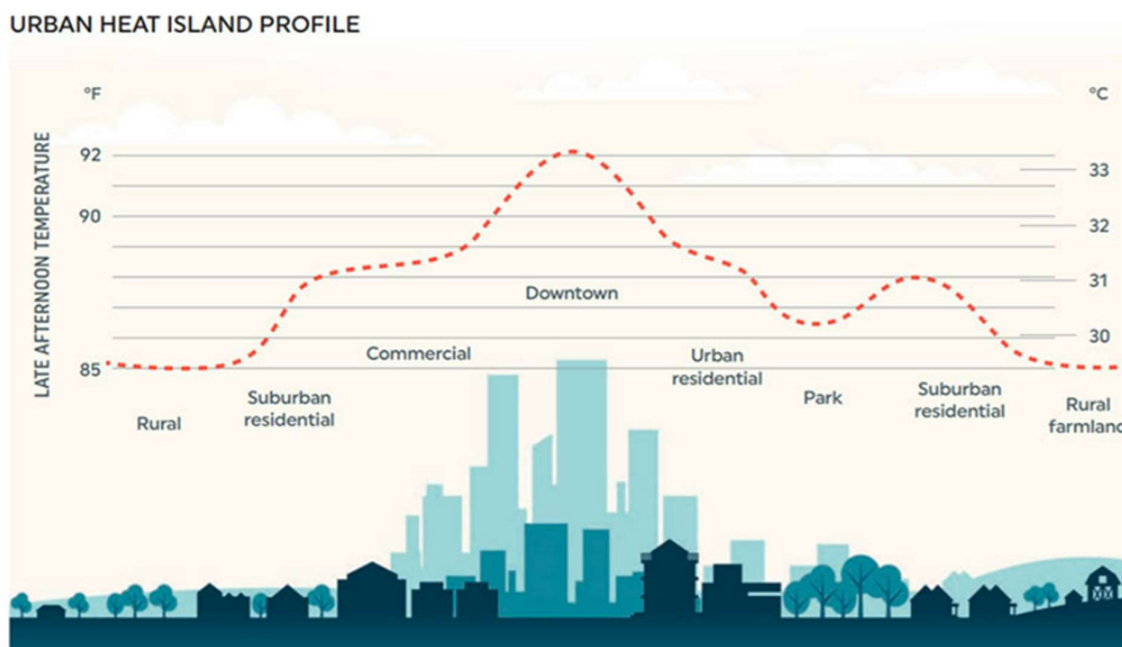
Vesterbro Lokaludvalg er bekymret for, at den nye bydel bliver en varmeø, og ønsker at få en vurdering af denne risiko, samt bud på hvordan risikoen kan minimeres. Tanken er at notatet skal inspirere diskussioner i Lokalplanforslagets høringsperiode, der forventes at ligge i september-oktober 2024, samt evt. indgå i Vesterbro Lokaludvalgs hørings svar.

*Forsideillustrationer er kopieret herfra:*

[https://www.researchgate.net/publication/352786126\\_Response\\_of\\_Crops\\_to\\_Heat\\_Stress\\_in\\_a\\_Warming\\_World\\_Adaptation\\_Measures\\_under\\_Sri\\_Lankan\\_Context/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/352786126_Response_of_Crops_to_Heat_Stress_in_a_Warming_World_Adaptation_Measures_under_Sri_Lankan_Context/figures?lo=1).

## 1. Indledning

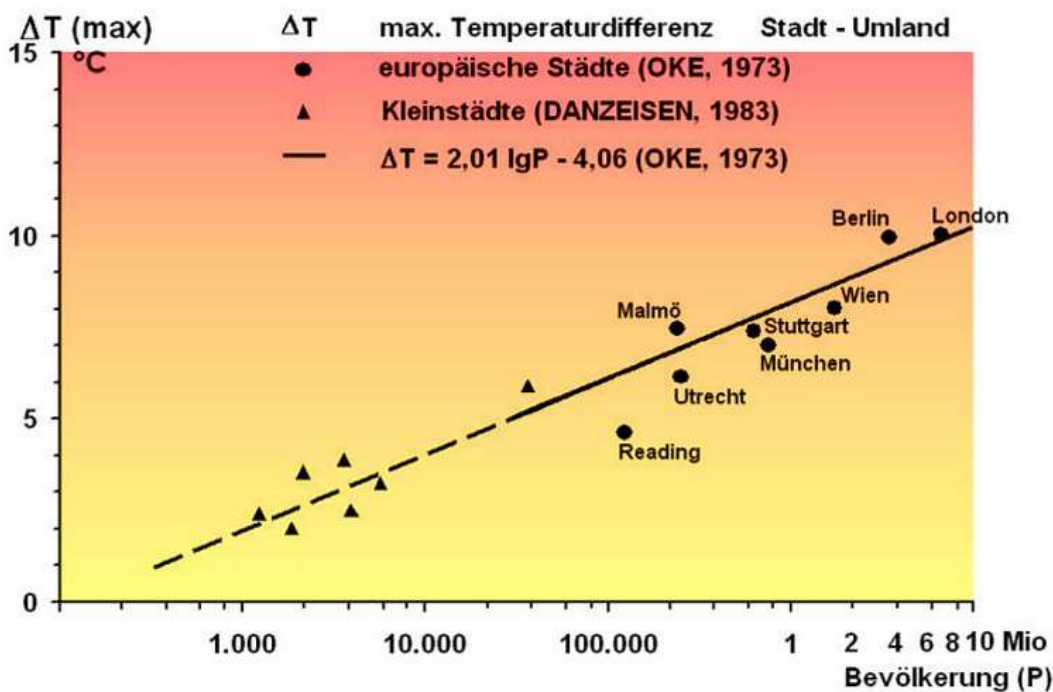
Varmeøeffekten udtrykker det fænomen, at lufttemperaturen i byer af en vis størrelse har en tendens til at være højere end i det omkringliggende åbne land. Med en varmeøeffekt fremstår byen som en varm ø i et køligere landskab, derfor navnet 'varmeø' (engelsk Urban Heat Island, eller UHI). Fænomenet optræder kun sidst på dagen og om natten, og især når det er vindstille og skyfrit. Varmeøer opstår fordi byens bygninger kan akkumulere varme i løbet af dagen, som langsomt frigives om natten og holder lufttemperaturen oppe. Effekten forstærkes af, at byen mangler vand og vegetation, der ellers kan hjælpe med at komme af med varmen gennem fordampning. Varmeøeffekten vokser derfor mod byens centrum, hvor koncentrationen af bygninger er størst og andelen af grønt mindst. I figur 1 er vist en typisk varmeø.



Figur 1: Illustration af en varmeø (Urban Heat Island), som den typisk optræder hen over et transekt med åbent land, forstæder, industri, bycentrum og parker. Y-aksen (til højre) viser lufttemperaturen i grader celsius målt i 2 m højde over terræn. I det viste tilfælde er temperaturen i det åbne land omkring 29°C mens den på samme tidspunkt er omkring 33,5 °C i bycentrum. Varmeøeffekten i eksemplet her er dermed på 4,5 °C (maksimal temperatur i byen minus temperaturen i det åbne land). Temperaturprofilen er vist for det tidspunkt på døgnet hvor varmeøeffekten typisk er størst, nemlig sidst på eftermiddagen. Effekten bliver svagere hen igennem natten, og er typisk væk næste morgen. Fænomenet optræder kun når det er vindstille og himlen er skyfri. Figuren er hentet her: <https://www.weforum.org/agenda/2023/02/urban-trees-reduce-heat-deaths/>.

København er stor nok til, at varmeø-fænomenet optræder, og i forbindelse med byudviklingsprojekter er det derfor en god idé at forsøge at afbøde effekten gennem valg af bygningsmaterialer og indpasning af vand og vegetation i byen.

Vi har ingen specifikke tal for København, men ud fra figur 2, er et niveau for temperaturforskelle på 3-5 °C sandsynligt.



Figur 2: Den maksimale varmøeffekt i forskellige byer, vist efter byens befolkningstal. Figuren er hentet her: <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=6&p2=2.3>

Højere temperaturer i byen om aftenen og natten kan gøre det svært at sove og også føre til overdødelighed i byer i tilfælde af hedeølger. I flere byer, f.eks. Zürich i Schweiz og Stuttgart i Tyskland, indgår afbødning af varmeøeffekten som et kritisk aspekt af byplanlægningen for at undgå den slags overdødelighed ([www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt\\_energie/klimaanpassung/hitze.html](http://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/umwelt_energie/klimaanpassung/hitze.html) <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=62&p2=6>).

Udover forhøjede lufttemperaturer, der ses sidst på dagen og om natten, kan byens mange hårde overflader også føre til forhøjede overfladetemperaturer, sammenlignet med det åbne land. Især metal-overflader kan blive ekstremt varme, men også asfalt- og betonoverflader kan blive betydeligt varmere end vegetationsdækkede overflader. Man taler derfor også om varmeøeffekt som resultat af overfladernes temperatur. Denne 'overflade-varmeø' ses i modsætning til 'luft-varmeø' kun om dagen, og kun på solskinsdage. Helbredsmæssigt kan overflade-varmeøer (engelsk: Surface-UHI) øge risikoen for varmerelateret ubehag, solstik og hedeslag.

### 1.1 Læsevejledning

Først gives en mere udførlig forklaring på, hvorfor varmeøer opstår (afsnit 2), og hvilke negative konsekvenser de indebærer (afsnit 3). Herefter resumeres den viden, vi har om UHI-effekten i København, og der laves en specifik vurdering af forholdene for den foreslåede Jernbaneby (afsnit 4). Notatet afsluttes med forslag til tiltag, der kan overvejes som afbødningsstrategi (afsnit 5) og konkrete anbefalinger til den foreslåede Jernbaneby (afsnit 6).

## 2. Varmeøffekten – uddybet forklaring

### 2.1 Historien bag

Fænomenet urban varmeø (UHI) blev første gang beskrevet i begyndelsen af 1800-tallet. Den britiske amatørmeteorolog Luke Howard sammenlignede lufttemperaturen målt i et par meters højde forskellige steder i London med lufttemperaturen målt uden for byen og kunne derved påvise, at byen hen over året var 0,9 °C varmere

([https://www.researchgate.net/publication/292141041\\_The\\_Climate\\_of\\_London\\_by\\_Luke\\_Howard\\_1833](https://www.researchgate.net/publication/292141041_The_Climate_of_London_by_Luke_Howard_1833)). Howard bemærkede også at forskellen var størst om natten, og størst mod bycentrum.

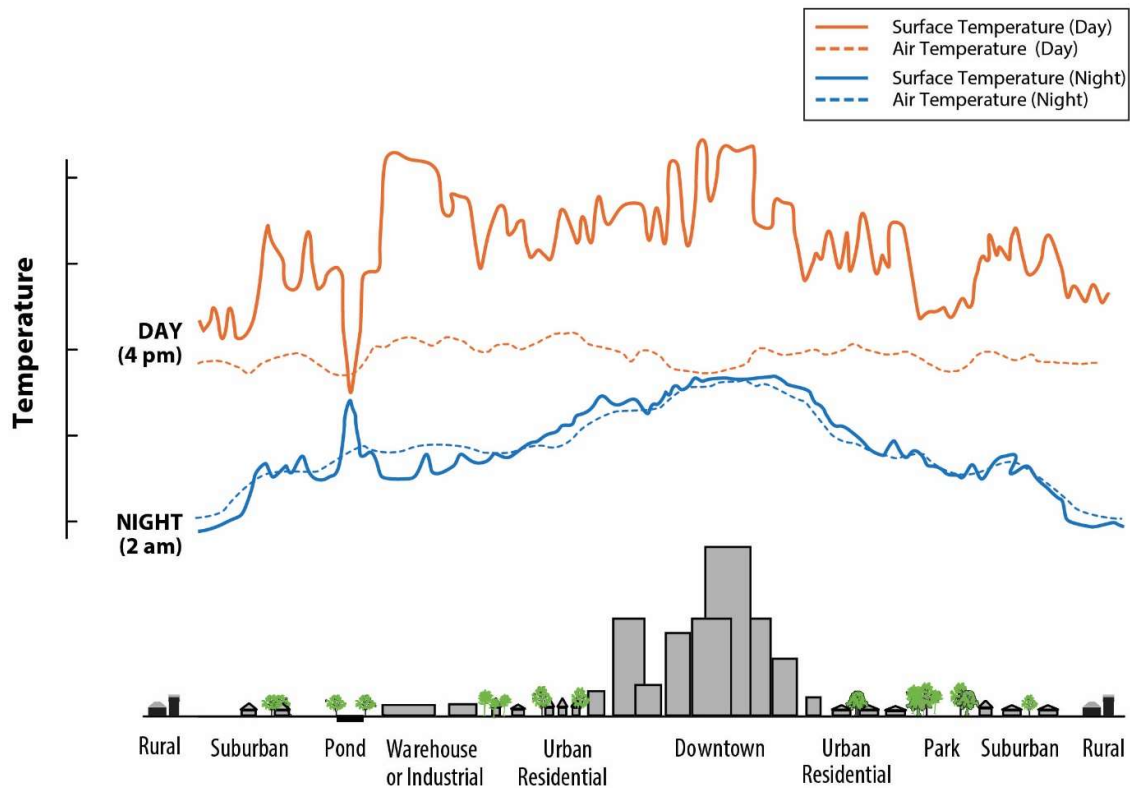
Sidenhen er Howards observationer bekræftet i mange forskellige studier, som også har afdækket mere detaljeret viden om fænomenet.

Med fremkomsten af satellitteknologi sidst i 1900-tallet blev der lagt et nyt lag på studiet af urbane varmeøer, for satellitter udstyret med termiske infrarøde sensorer kan afsløre at mange af byens overflader bliver betydeligt varmere end vegetation, vand og fugtig jord. Dermed adskiller byen sig igen fra det omkringliggende åbne land, men i modsætning til den form for UHI, som Luke Howard dokumenterede, ses de forhøjede overfladetemperaturer om dagen, og kan desuden variere brat over korte afstande.

Der er derfor tale om to former for UHI, som vi betegner henholdsvis luft-UHI og overflade-UHI. De to former for UHI drives kun delvist af de samme mekanismer. Strategier for at afbøde UHI effekterne er også kun delvist overlappende. I tabel 1 er nogle karakteristika for de to former for UHI oplyst, og diagrammet i figur 3 viser typiske temperaturforløb for de to UHI former.

Tabel 1: Oversigt over centrale forskelle på luft-UHI og overflade UHI.

	Luft-UHI	Overflade-UHI
Definition	Forskellen mellem luftens temperatur målt i 2 m højde i en by og dens omkringliggende åbne land	Forskellen mellem overfladens temperatur, målt direkte på overfladen (jord, vegetation, vej, bygning m.v.) i en by og dens omkringliggende åbne land
Typisk målemetode og dens fordele og ulemper	Vejrstationer med termofølere. Gennemsnit for et område baseres på interpolation mellem vejrstationer. Dårlig arealmæssig opløsning, men kontinuerte målinger (f.eks. en måling per sekund).	Satellitter, f.eks. Landsat, med termiske infrarøde sensorer. Opløsningen er ned til omkring 30 m, dvs. en gennemsnitstemperatur per 30x30 m overfladeareal. Fin arealmæssig opløsning, men dårlig tidsmæssig opløsning (en måling per dag eller per 14 dage).
Alternativ målemetode	Termoføler monteret i 2 m højde på rygsæk, cykel eller bil	Varmefølsomme kameraer rettet mod facader og eller kørebane, monteret på rygsæk, cykel eller bil
Døgn-mønster	Størst på dagen og om natten. Ses ikke om dagen.	Størst midt på dagen. Ses ikke om natten.
Vejrforhold	Optræder kun når det er vindstille og skyfrit. Ses i mindre grad under tørke.	Kræver direkte sol. Ses også i blæsevejr og under tørke.
Udbredelse	Optræder både indendørs og udendørs. Varierer gradvist fra bydel til bydel.	Optræder kun udendørs. Kan variere brat over få meter.
Vigtigste parametre der bestemmer omfang	Byens størrelse, albedo, varmekapacitet, og evne til at fordampe vand	Byens albedo, varmeledende evne (termisk ledningsevne) og evne til at fordampe vand.
Sundhedsmæssige aspekter	Kan gøre det ekstra svært for byboere at få en god søvn og i tilfælde af hedeølger er risikoen for dødsfald større i byen.	Kan øge risikoen for ubehag, solstik og hedeslag i byen



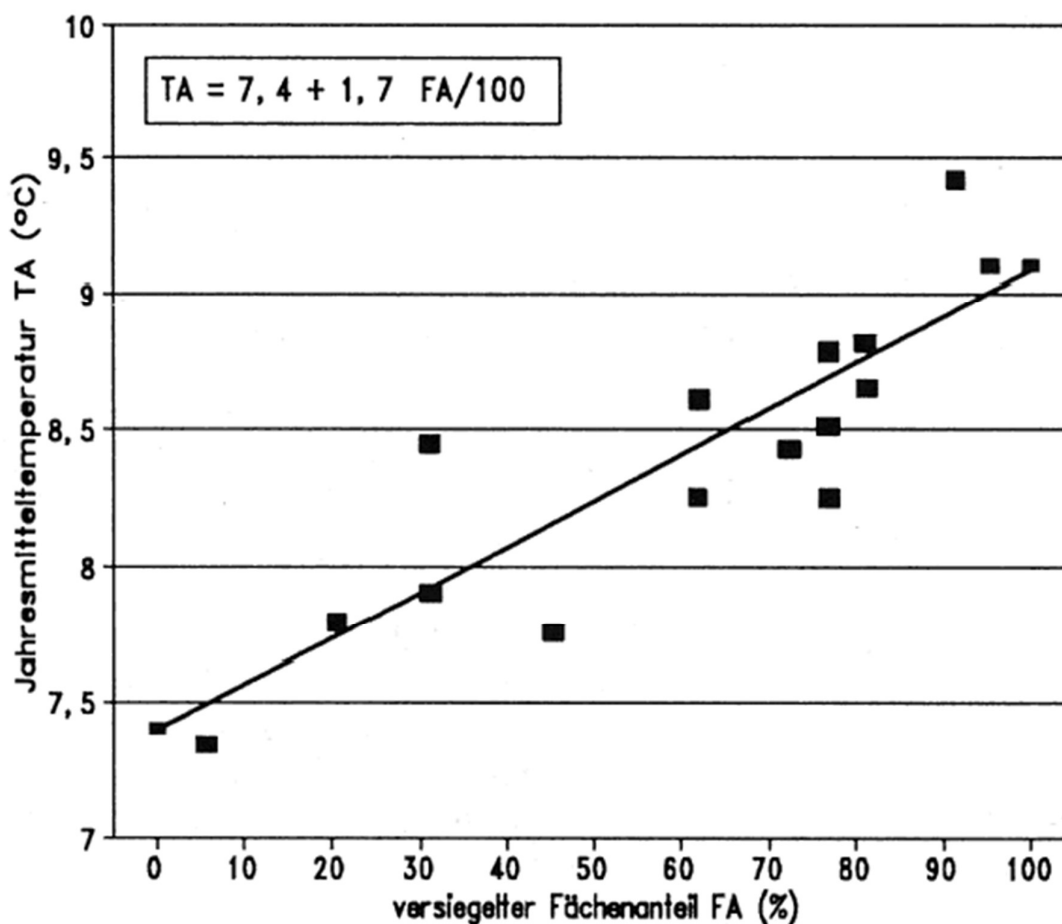
Figur 3: Her ses et transekt gennem et område med landbrug, forstæder, vand, megacentre/industri, lav tæt by, bycentrum, parker m.v. og de tilhørende temperaturer om natten (blå kurver) og dagen (røde kurver). Lufttemperaturen er vist med stiplede linjer, mens overfladetemperaturen er vist med fuldt optrukne linjer. Sammenlignes de to stiplede kurver, ses det at lufttemperaturen ligger på omtrent samme niveau i dagtimerne uanset om arealet er dækket af by eller natur, mens lufttemperaturen om natten er lav i det åbne land, men forbliver høj over byen, især over centrum. Dermed forekommer luft-UHI. Sammenlignes de to fuldt optrukne kurver, ses det at overfladetemperaturen ligger markant højere om dagen end om natten og er højest i de bebyggede arealer. Om natten følger overfladetemperaturen lufttemperaturen. Det ses også at kurven for overfladetemperatur i dagtimerne svinger markant mere end de tre øvrige kurver. Figuren er hentet fra <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands>.

## 2.2 Forskellen på luft-UHI og overflade-UHI

Man skelner mellem luft-UHI (engelsk: Atmospheric Urban Heat Island, eller Canopy Urban Heat Island), der har været kendt siden 1800-tallet og overflade-UHI (engelsk: Surface Urban Heat Island), der først er blevet ordentligt dokumenteret i nyere tid takket være satellitdata.

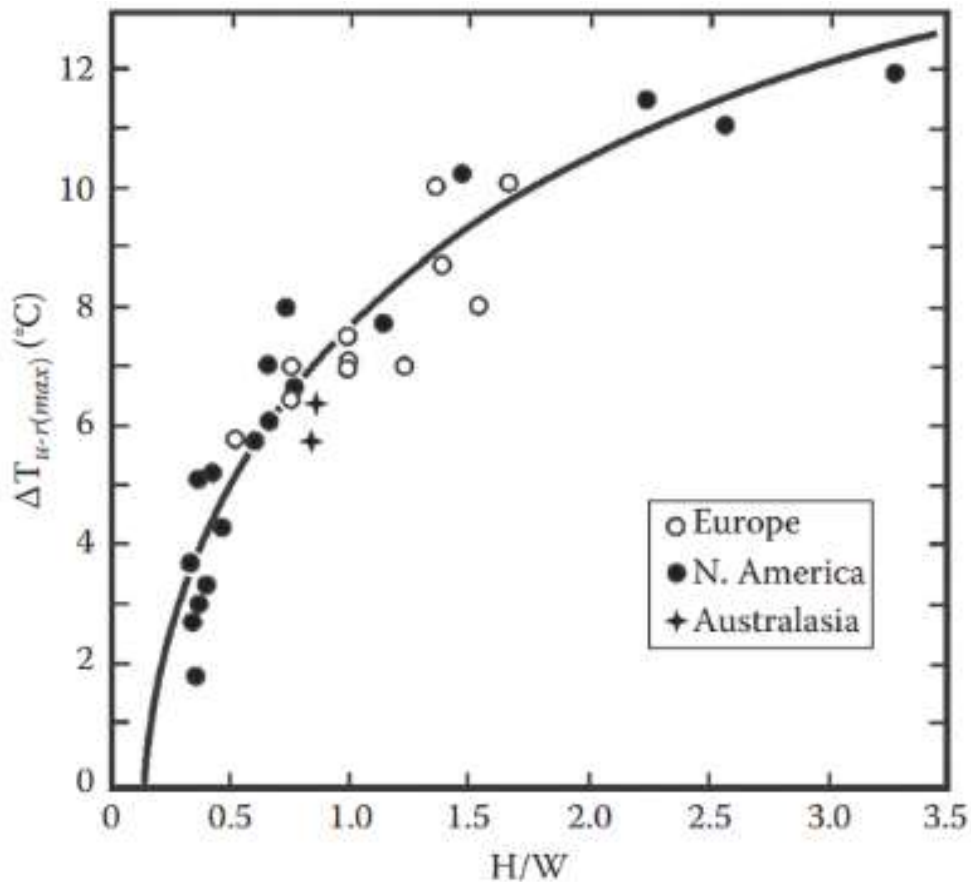
### Luft-UHI

Luft-UHI er forskellen mellem luftens temperatur målt i 2 meters højde (også kaldet kronehøjde; engelsk: canopy) i byen og lufttemperaturen målt i samme højde uden for byen. Luft-UHI ses kun om aftenen og natten og kun i byer af en vis størrelse og dermed bygningstæthed (figur 2), og er størst i de tættest bebyggede bydele (figur 4), og især i smalle gader med høje bygninger på begge sider. Her er registreret luft-UHI-effekter på op til 12 grader, dvs. at luften i byen er 12 grader varmere end luften i det omkringliggende åbne land, se figur 5. Hvorfor luft-UHI kun ses om natten og ikke om dagen er forklaret nærmere nedenfor.



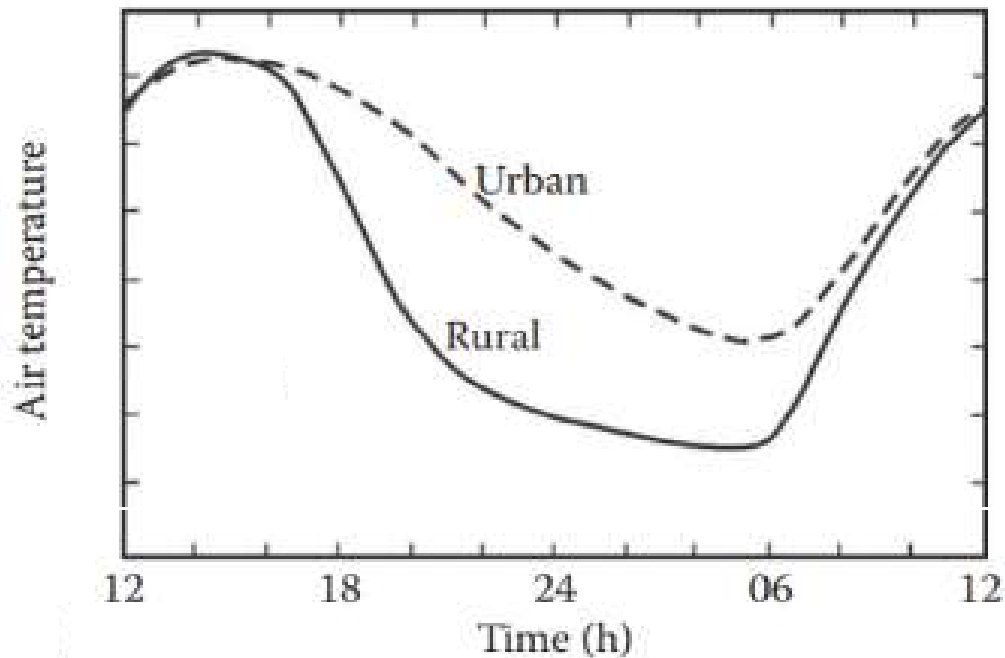
Figur 4: Luft-UHI hænger sammen med bygningsmassens tæthed, og der er derfor også en vis sammenhæng med byens befæstelsesgrad. Data her stammer fra: <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=6&p2=2.3>, hvor det konstateres at byens gennemsnitlige lufttemperaturen i Stuttgart vokser med ca. 0,2 °C for hver 10% befæstelsesgraden øges.





Figur 5: Maksimal luft-UHI målt i gader i forskellige byer i Europa, Nordamerika og Australien. Det ses, at luften i gaden kan være 2-12 grader varmere end uden for byen. Det ses også at der er en sammenhæng mellem luft-UHI og gadens højde-bredde forhold (H/W): Jo højere bygningerne på hver side af gaden er, og jo smallere gaden er, desto større luft-UHI. Forklaringen er at høje bygninger (stort H) har et stort varmelager, der kan udstråle meget varme og smalle veje (lille W) har et lille luftvolumen til at optage varmen og derfor opvarmes meget. For de europæiske gader ligger luft-UHI på 6-10 grader. Målingerne er foretaget sidst på dagen, i tørre somre i skyfri og vindstille perioder fra en gennemkørende bil. Figuren er hentet fra <https://ap5.fas.nus.edu.sg/fass/geomr/roth%20uhi%20hefd13.pdf>. Data stammer oprindeligt fra Oke, T.R., *Boundary-Layer Climates*, London, U.K., Methuen, 1987.

Luft-UHI skyldes for det første byens store bygningsmasse af især mursten, beton og asfalt, der har stor specifik varmekapacitet sammenlignet med vegetationsdækkede områder, og derfor kan fungere som et varmelager. Varmelageret fyldes op i løbet af dagen, mens solen skinner, og den akkumulerede varme frigives om aftenen og natten efter solnedgang, når indstrålingen stopper og temperaturgradienten vendes. Fænomenet ses kun på dette tidspunkt, for så længe solen skinner stiger den varme luft til vejrs (termisk konvektion) og lufttemperaturen i byen følger derfor lufttemperaturen i det åbne land. Et typisk forløb af luft-UHI hen over et døgn er vist i figur 6.



Figur 6: Figuren viser et typisk forløb af luftens temperatur i byen og i det omkringliggende landskab over et døgn hvor luft-UHI-effekt optræder. Størrelsen på luft-UHI svarer til lommen mellem de to kurver. Om dagen, fra solen står op omkring klokken 9 til den går ned omkring kl. 18, følges lufttemperaturerne i by og på land stort set ad, men efter solnedgang går afkølingen af det omkringliggende landskab hurtigt sammenlignet med byen, hvor lufttemperaturen forbliver højere hele natten. Kilde:

<https://www.researchgate.net/publication/268424536> Reducing urban heat island effects A systematic review to achieve energy consumption balance

En anden vigtig parameter for omfanget af UHI er fordampning. Hvis fordampning kan finde sted opvarmes området mindre. Det gælder uanset om der er tale om fordampning fra en fugtig jordoverflade, et frit vandspejl eller via planternes transpiration (dvs. vand opsuges gennem rødderne og fordampet via bladernes spalteåbninger), for det kræver i alle tilfælde en betydelig energimængde at ændre vands tilstand fra flydende form til gas form, og denne energi tages fra omgivelserne. I det åbne land indbygges en stor del af energien modtaget fra solen i vanddamp i løbet af dagen og dermed er der mindre energi, der når jordens overflade og varmelageret her fyldes mindre op. Om natten er der ikke nogen videre transpiration fra vegetationen, men fordampning fra jordoverfladen sker fortsat og bidrager til at det åbne land køler hurtigere ned end byen. I byen er der mindre vegetation, så planternes transpiration er tilsvarende mindre i løbet af dagen, og samtidig er en stor del af arealet præget af bygninger og belægninger, der forhindrer fordampning fra jordoverfladen.

Ud over byens varmekapacitet- og fordampning betyder refleksion (albedo og skyview) og antropogen varmetilførsel noget for størrelsen af luft-UHI, men da disse faktorer også påvirker overflade-UHI beskrives de samlet efterfølgende.

Luft-UHI optræder som nævnt på stort set vindstille aftener og nætter og kun når himlen er stort set skyfri. Det vil sige at der også er mange døgn hvor UHI ikke optræder i særlig udbredt grad. Hvis det f.eks. er blæsevej, bæres den varmere luft væk fra bygningerne og blandes op, så forskellene mellem by og land viskes ud. Der ses heller ingen luft-UHI, hvis himlen er overskyet, for så holder skyerne på dagens varme over såvel by som land. I perioder med tørke vil der heller ikke være så stor forskel på lufttemperaturen i by og på land, fordi afkølingen af det omkringliggende landskab via fordampning sættes ud af kraft, når landskabet er tørret ud. Ifølge Kuttler, 2008, har byer i det centrale Europa en højere lufttemperatur end deres omgivelser i ca. 80 % af tiden (Kuttler, W., 2008, "The Urban Climate –Basic and Applied Aspects", In: Marzluff, J.M.et al. Urban Ecology, Springer).

#### *Overflade-UHI*

Som nævnt ovenfor betegner overflade-UHI det fænomen, at solen kan opvarme byens befæstede overflader til betydeligt højere temperaturer end vegetationsdækkede overflader. Sammenlignet med luft-UHI er overflade-UHI et mere lokalt fænomen, der hænger direkte sammen med den enkelte overflades varmeledende egenskaber (termisk ledningsevne). Det er især metaliske overflader der kan blive meget varme, men også beton, tegl og asfalt kan blive betydeligt varmere end vegetation og andre fugtige materialer.

Eftersom overflade-UHI er så tæt knyttet til den enkelte overflades varmeegenskaber, kan temperaturen variere over meget korte afstande, eksempelvis kan en asfaltvej være betydeligt varmere end et græsareal, der ligger klos op af.

Da fænomenet skyldes simpel opvarmning af overfladen med sollys, ses overflade-UHI kun om dagen, kun på solskinsdage og det er kun overflader, der ikke ligger i skygge, der kan bidrage. Overflade-UHI kan måles med satellit ved registrering af varmeudstråling. Satellitmålingerne har en opløsning på omkring 30 m og afslører som regel, at samme overflade-temperaturer findes udbredt i større områder, hvilket skyldes at der er en tendens til, at samme materialetyper eller overflader går igen inden for de enkelte bykvarterer. Det er også kun på grund af den høje koncentration af bygningsmaterialer i en by, at det giver mening at omtale overflade-UHI som et by-fænomen, for de samme materialer anvendt på landet bliver lige så varme. For eksempel bliver et bliktag i det åbne land ligeså varmt som et bliktag i byen, men fordi der er langt til det næste bliktag i det åbne land opstår der ikke på samme måde hotspots som tilfældet er i byen hvor tætheden af materialer, der hurtigt responderer på solens indstråling, er stor.

#### *Albedo, skyline-effekten og antropogen varme*

Udover byens termiske egenskaber og forekomsten af fordampende overflader påvirkes luft-UHI og overflade-UHI af albedo, skyline-effekten og antropogen varme.

#### *Albedo*

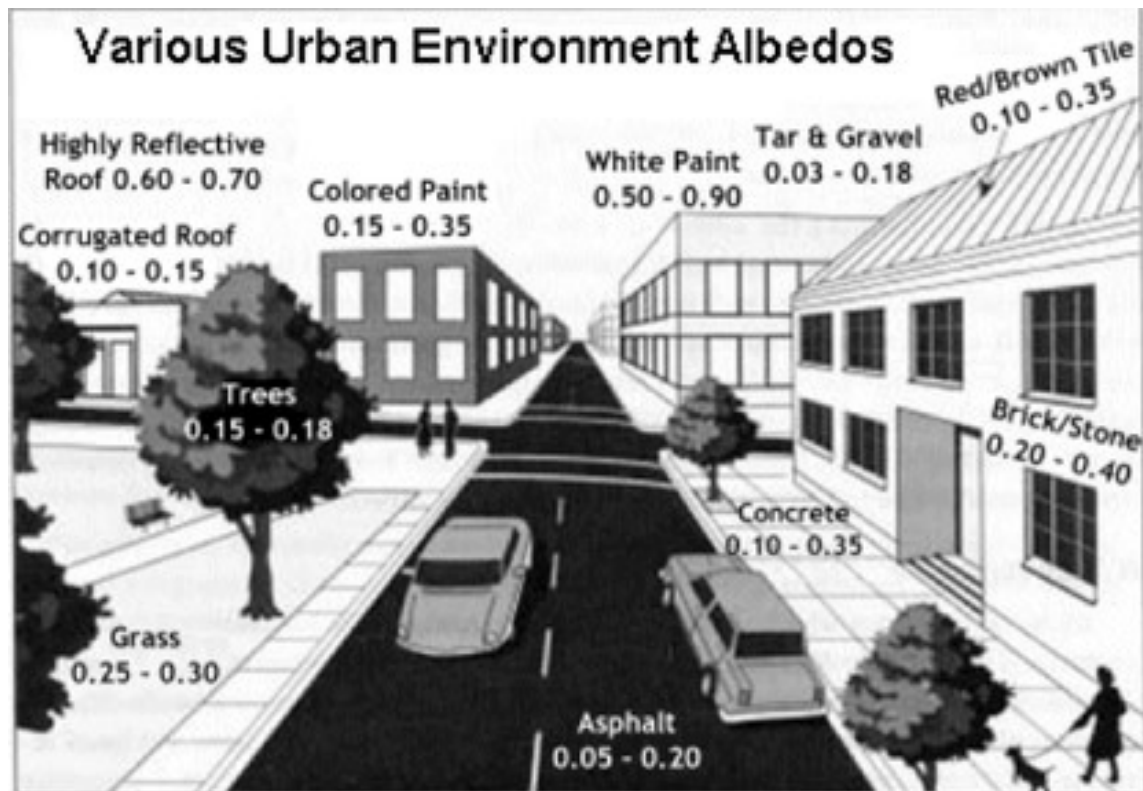
Den andel af solens energi, der reflekteres i jordens overflade og sendes tilbage til atmosfæren, bidrager ikke til opvarmning. Hvor stor en del der er tale om beskrives som overfladens albedo. Hvide og lyse overflader som eksempelvis ren sne, hvidmalede facader og lys beton kan have en høj albedo og reflektere meget energi, mens sorte og mørke overflader som asfalt og sorte tegl har en lav albedo og reflekterer mindre.

En albedo på f.eks. 0,15 betyder at 15 % af energien reflekteres og 85 % optages i materialet. Ud over farve kan materialets tekstur påvirke albedoen, hvor glatte overflader som glas og metal

reflekterer mere end ru overflader med et mikro-relief. Vegetations grønne farve har en ret lav albedo og vegetation reflekterer derfor ikke særlig meget lys. I tabel 2 og figur 7 ses værdier for albedo. Som det ses, ligger værdierne generelt lavt, bortset fra 'hvide tage', der dækker over en række forskellige tagløsninger udviklet med refleksion for øje, såkaldte cool roofs. Eneste naturlige materiale her er tage med hvid ral som øverste lag. Se mere under afbødningsmuligheder.

*Tabel 2: Eksempler på albedo-værdier for konstruktionsmaterialer, vegetation, vand og jord.*

Materiale	Albedo	Reference
Asfalt	0,05-0,2	Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." <i>Solar Energy</i> , 70(3), 295-310
Beton	0,10-0,35	Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." <i>Solar Energy</i> , 70(3), 295-310
Mursten	0,20-0,40	Taha, H. (1997). "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat." <i>Energy and Buildings</i> , 25(2), 99-103
Hvide tage	0,7-0,8	Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). "Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain." <i>Solar Energy</i> , 84(9), 1717-1744.
Sorte tage	0,05-2,0	Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). "Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain." <i>Solar Energy</i> , 84(9), 1717-1744.
Umalet træ	0,1-0,3	Oke, T. R. (1987). "Boundary Layer Climates." Routledge
Vand	0,05-1,0	Oke, T. R. (1987). "Boundary Layer Climates." Routledge
Bar jord	0,17-0,27	Oke, T. R. (1987). "Boundary Layer Climates." Routledge
Grus	0,15-0,3	Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions." <i>Energy and Buildings</i> , 39(11), 1167-1174
Græs	0,16-0,26	Oke, T. R. (1987). "Boundary Layer Climates." Routledge
Træer	0,10-0,20	Oke, T. R. (1987). "Boundary Layer Climates." Routledge
Grønne tage (vegetationsdækkede)	0,20-0,30	Sailor, D. J., & Hagos, M. E. (2011). "An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media." <i>Energy and Buildings</i> , 43(9), 2298-2303



Figur 7: Illustration af albedo-værdier i en by. Figuren er hentet her:

<https://thebritishgeographer.weebly.com/urban-climates.html>

#### Skyview-effekten

Også skyview-effekten kan påvirke mængden af sol-energi afsat i en by, samt mængden der udstråles fra en by. Skyview-faktoren betegner, hvor stor en del af himlen der kan ses fra et givent punkt. Er der frit udsyn til hele horisonten 360 grader rundt, f.eks. fra toppen af en bakke, er faktoren 1, mens den kan være tæt på 0 i en lille gyde, hvor kun en smal stribe af himlen er synlig. Skyview-effekten er det fænomen, at energi kan kastes frem og tilbage mellem bygninger. Hvis et område har en lav sky-view faktor, påvirkes både den indkommende energi, hvor mere af solens energi akkumuleres, og den udgående varmestråling, hvor mindre udstråles, så afkøling blokeres. De fleste studier af skyview-effekten fokuserer på begrænsningen af varmeudstråling, der vurderes at kunne bidrage med 2-5 °C højere luft-UHI hvis der er en lav skyview-factor (Oke, T. R., 1988, "The urban energy balance", *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471-508; Li, D., & Bou-Zeid, E., 2013, "Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves", *Environmental Research Letters*, 8(3), 034034).

#### Antropogen varme

Antropogen varme betegner energi tilført et område som følge af menneskelig aktivitet, dvs. energi brugt i industrien til at drive maskiner, til opvarmning og afkøling af bygninger, til transport m.v. For centrum af storbyerne Phoenix i Arizona og Shanghai i Kina er det vurderet, at luft-UHI øges med 1-4 °C som følge af antropogen varme (Loughner, C. P., et al., 2012, "Role of anthropogenic heating in the urban heat island effect: A case study of Phoenix, Arizona", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D16), D16120; He, Y., & Yang, L., 2020, "Quantifying the contributions of

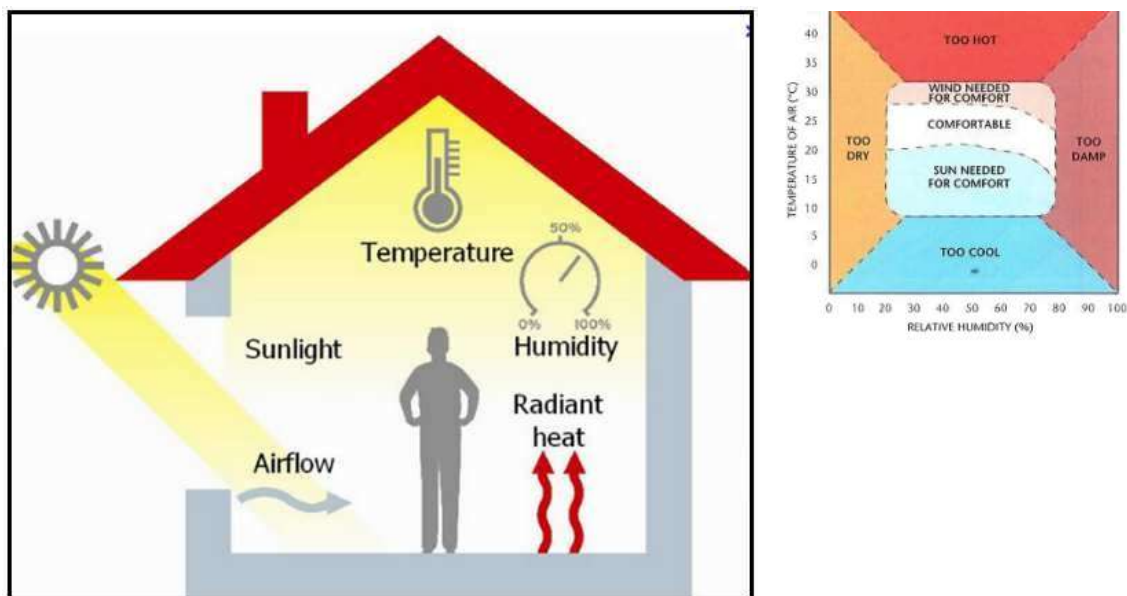
anthropogenic heat to the urban heat island effect in Shanghai, China", Science of the Total Environment, 706, 135838).

### 3. Negative konsekvenser af UHI

#### 3.1 Termisk komfort

Mennesker er ret følsomme over for temperatursvingninger, og er kun velbefindende i et snævert temperaturinterval. Sammenhængen mellem omgivelsernes temperatur og menneskets velbefindende betegnes termisk komfort. Vores termiske komfort afhænger af forskellige faktorer i vores omgivelser, se figur 8. Vigtigst er luftens temperatur, hvor både for høje og for lave temperaturer kan være ubehagelige eller kritiske. Dernæst spiller luftfugtigheden en stor rolle for den termiske komfort ved høje temperaturer, fordi højere luftfugtighed gør det sværere for kroppen at komme af med varmen gennem svedproduktion. Også vind eller ventilation betyder meget for den termiske komfort, fordi luftbevægelse ved høje temperaturer kan hjælpe med at bære varmen væk fra kroppen, eller omvendt gennem chill-faktoren, der afkøler kroppen og dermed forværrer den termiske komfort ved lave temperaturer. Den direkte varmestråling fra de omgivelser, vi befinder os i, betyder også noget; her er den store forskel om man rammes af solens stråler, eller befinder sig i skyggen. Varmestrålingen fra forskellige typer overflader gør også en forskel for den termiske komfort. Endelig påvirkes vores termiske komfort af vores aktivitetsniveau og påklædning.

På aftener og nætter med luft-UHI er det primært den højere luft-temperatur, der generer mennesket ved at skabe varm luft ("airflow" i figur 8). I forhold til overflade-UHI, der kun forekommer udendørs, er problemet varmestrålingen fra ophevede overflader, kombineret med direkte solstråling ("sunlight" og "radiant heat" i figur 8).



Figur 8: Vores termiske komfort afhænger af forskellige faktorer i det miljø vi befinder os i. Huset viser de vigtigste, mens den lille figur i højre hjørne udpensler problemet hvis vi er uden for den termiske komfort zone. Figureerne er hentet her:

<https://www.researchgate.net/publication/317109298/figure/fig8/AS:668532467585042@1536401>

[969885/The-most-important-environmental-factors-affecting-thermal-comfort.jpg](https://969885/The-most-important-environmental-factors-affecting-thermal-comfort.jpg) og her:  
<https://library.wmo.int/viewer/55190/?offset=#page=8&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=> .

### 3.2 Gener forbundet med luft-UHI

Gener forbundet med luft-UHI optræder sidst på dagen og om natten, hvor de ekstraordinært høje lufttemperaturer påvirker den termiske komfort direkte, og kan føre til ildebefindende eller ligefrem dødsfald. Byluften er varmere, ikke bare ude i gaderne men også inde i boligerne. Det er værst på vindstille nætter, for da er der ingen luftudskiftning, og selv med åbne vinduer, kan der ikke skabes gennemtræk. I perioder med hedebølger kan den ekstra varme som Luft-UHI forårsager føre til en overrepræsentation af storbyer i statistikken over varmerelaterede dødsfald. Således medførte hedebølgen over Europa og England i 2003 omkring 70.000 ekstra dødsfald og her var storbyer som Berlin, Paris og London overrepræsenterede (<https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/biologies/articles/10.1016/j.crv.2007.12.001/>; [https://www.researchgate.net/profile/Heather-Walton/publication/7932252\\_The\\_impact\\_of\\_the\\_2003\\_heat\\_wave\\_on\\_mortality\\_and\\_hospital\\_admissions\\_in\\_England/links/09e4150d5a62020995000000/The-impact-of-the-2003-heat-wave-on-mortality-and-hospital-admissions-in-England.pdf#page=6](https://www.researchgate.net/profile/Heather-Walton/publication/7932252_The_impact_of_the_2003_heat_wave_on_mortality_and_hospital_admissions_in_England/links/09e4150d5a62020995000000/The-impact-of-the-2003-heat-wave-on-mortality-and-hospital-admissions-in-England.pdf#page=6)). Værst gik det ud over børn, ældre og personer med et i forvejen dårligt helbred.

### 3.3 Gener forbundet med overflade-UHI

Gener forbundet med overflade-UHI optræder på varme solskinsdage, og opstår hvis man ikke kan finde skygge og rammes direkte af solens lys, og forstærkes hvis man opholder sig på ophevede overflader, som fx befæstede pladser. Inden døre har overflade-UHI ingen betydning for den termiske komfort, for her befinder man sig typisk i skygge. Med stigende eksponering til varme-høje temperaturer vokser risikoen for ubehag, især ved samtidig fysisk aktivitet, men der er også øget risiko for egentlig ildebefindende i form af solstik og hedeslag. Solstik kan opstå hvis hoved og nakke udsættes for direkte sollys og symptomerne er hovedpine, svimmelhed, kvalme og besvimelse. Det er som regel nok at få personen ind i skygge, køle vedkommende ned med kolde klud og kølige drikke. Hedeslag opstår når kroppen overopheder på grund af langvarig udsættelse for høje temperaturer og/eller fysisk aktivitet, og har de samme symptomer som solstik, men er en mere alvorlig tilstand, der også kan føre til kramper og koma. Hedeslag kræver hurtig professionel behandling.

### 3.4 Høj luftfugtighed forværrer UHI-generne

Menneskekroppen kan regulere temperaturen ved at svede, for når vandet fordamper fra kroppens overflade afkøles kroppen. Er luftens indhold af vanddamp allerede høj er det langt sværere for kroppen at komme af med varmen gennem sved. Denne negative korrelation mellem temperaturregulering og luftfugtighed afspejles i figur 9, der viser et hedeindeks udarbejdet af DMI. Sammenhængen betyder, at risiko for ubehag, solstik og hedeslag øges hvis luftfugtigheden samtidig er høj.

Rel. Fugt %	Temp i °C																				
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
40	25	26	27	28	29	30	31	32	33	35	37	39	41	43	45	48	50	53	56	59	62
45	25	26	27	28	29	30	31	33	34	36	38	41	43	45	48	51	54	57	60		
50	25	26	27	28	29	30	32	34	36	38	40	43	45	48	51	54	58	61			
55	25	26	27	28	30	31	33	35	37	40	42	45	48	51	54	58	62				
60	25	26	28	29	31	32	34	37	39	42	45	48	51	54	58	62					
65	25	27	28	30	31	33	36	38	41	44	47	51	54	58	62						
70	25	27	28	30	32	35	37	40	43	46	50	54	68	62							
75	25	27	29	31	33	36	39	42	45	49	53	57	62								
80	25	27	29	32	34	37	40	44	48	52	56	61									
85	25	27	30	32	35	39	42	46	50	55	59										
90	25	28	30	33	37	40	44	48	53	58											
95	25	28	31	34	38	42	46	51	56	61											
100	25	28	31	35	39	44	49	54	59												

Hedeindeks	Ved vedvarende påvirkning
26°C til 32°C	Minimal risiko, udmattelse mulig
32°C til 40°C	Tiltagende risiko, solstik og udmattelse mulig
40°C til 55°C	Fare, hedeslag, solstik og udmattelse sandsynlig
over 55°C	Stor fare, hedeslag eller solstik meget sandsynlig

Figur 9: DMIs Hedeindeks. Øverst ses hedeindekset og nedenunder den tilhørende forklaring. En temperatur på f.eks. 30 °C udgør en minimal risiko, hvis luften er tør (relativ luftfugtighed 40 % eller derunder), mens den samme temperatur ved en luftfugtighed på 80 % og derover kan give hedeslag. Kilde: <https://www.dmi.dk/vejr-og-atmosfare/temaforside-kuldeindeks-og-hedeindeks/hedeindeks>.

Med den globale opvarmning vil situationen gradvist forværres. Flere områder på kloden vil opleve kritisk høje temperaturer, og i et tempereret klima som det danske vil antallet af sommerdage med ubehageligt høje temperaturer øges, svarende til at situationen forskydes mod højre i DMIs Hedeindeks (figur 9). Oven i den globale opvarmning optræder ekstremvejr også hyppigere. Det drejer sig især om hedeølger, hvor luft-UHI gør byerne ekstra farlige at opholde sig i, men også om tørke hvor varme dage kan blive ekstra varme fordi fordampningsmekanismen ikke bidrager til nedkøling.

#### 4. Viden om UHI i København og vurdering af UHI for byudviklingsprojektet Jernbanebyen

##### 4.1 Viden om UHI i København

I 2010 udgav Københavns Universitet i samarbejde med GRAS en dansksproget rapport om UHI i København baseret på satellitmålinger af overfladetemperaturen: "Urban heat island i København - beskrivelse af fænomenet, vurdering af omfang i København, input til strategi for håndtering", af Bühler, Tøttrup, Borgstrøm, Rasmus og Jensen, 2010 (<https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>)

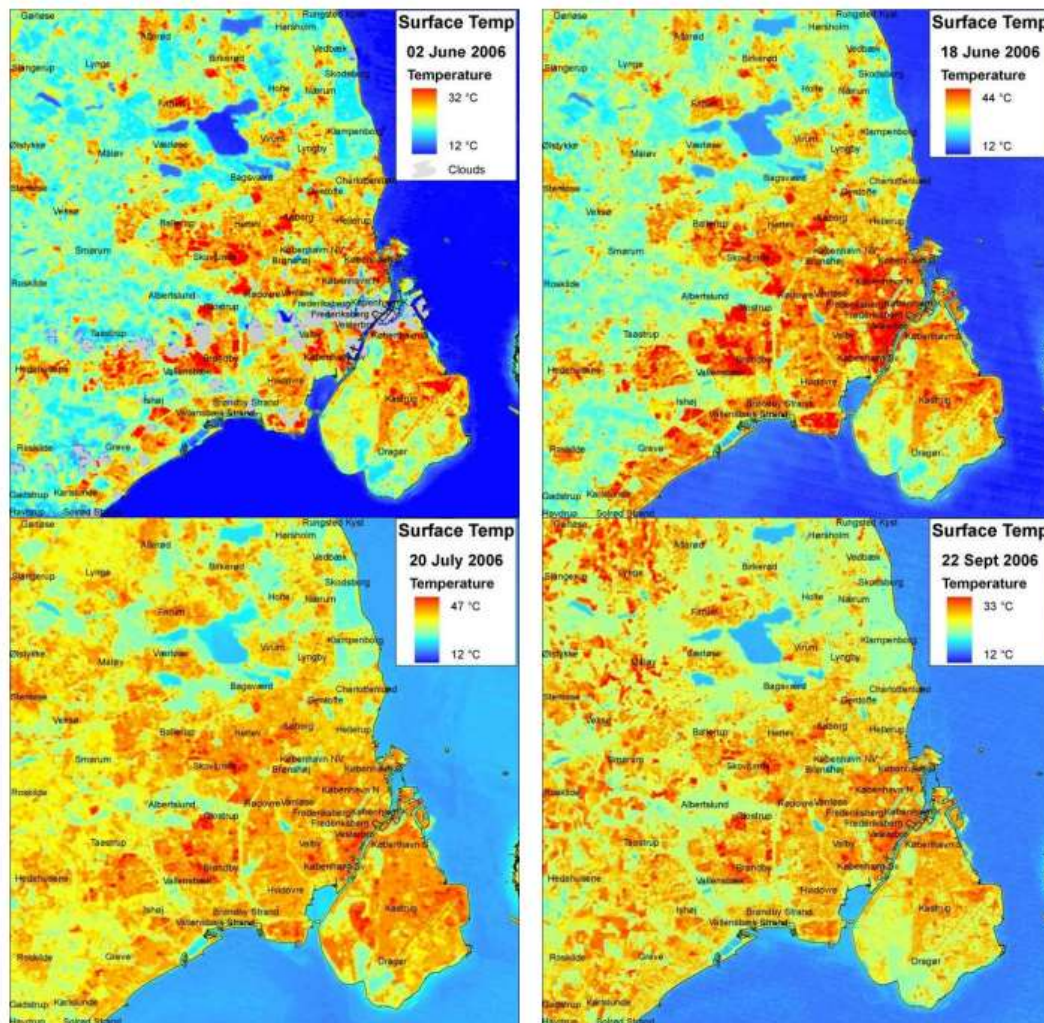
KU-GRAS rapporten er så vidt vides det eneste studie, der direkte rapporterer værdier for UHI i København. Centrale resultater fra rapporten resumeres nedenfor.



Studiet er baseret på fire satellitfotos fra sommeren 2006, optaget på skyfri dage. Det vil sige, at der er tale om overflade-temperaturer, og dermed et studie af evt. overflade-UHI. Der er et målepunkt for hvert område af 120 m x 120 m. Sommeren 2006 var som helhed solrig og varm.

I figur 10 ses de fire satellitbilleder, som rapporten er baseret på. De fire målinger viser en klar tendens til højere overfladetemperaturer i bebyggede områder, herunder Københavns indre bydele, mens de koldeste områder er vandoverflader, efterfulgt af de større skovområder (Dyrehaven ved Klampenborg, skovene omkring Furesøen, og Vestskoven ved Albertslund). Overfladetemperaturen d. 20. juli, der var 2006-sommerens varmeste dag, nåede for nogle overflader op på 47 °C, mens de maksimale temperaturer for de øvrige 3 dage lå fra 32 °C til 44 °C. Det ses også, at det er omtrent de samme områder, der fremstår varmest på de fire undersøgte dage. På baggrund af studiet kan det konstateres at overflade-UHI ser ud til at forekomme i København.

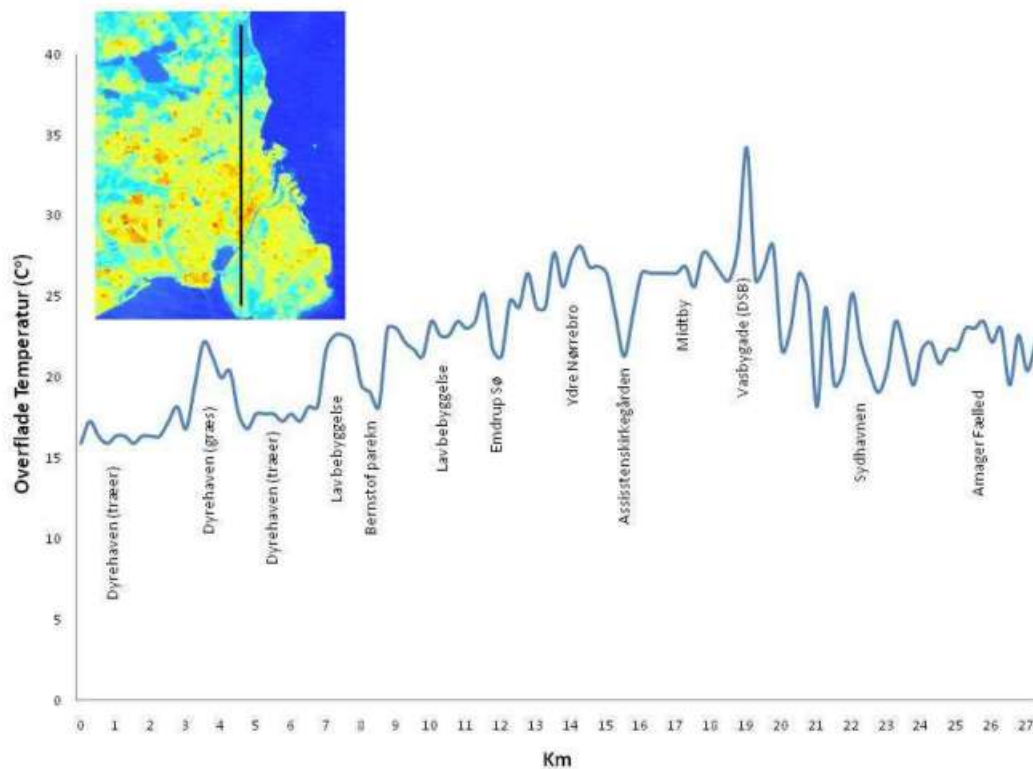
:



Figur 10: Overfladetemperatur målt i København og omegn med satellit fire forskellige solskinsdage i sommeren 2006 (2. juni, 18. juni, 20. juli og 22. september). Kilde:

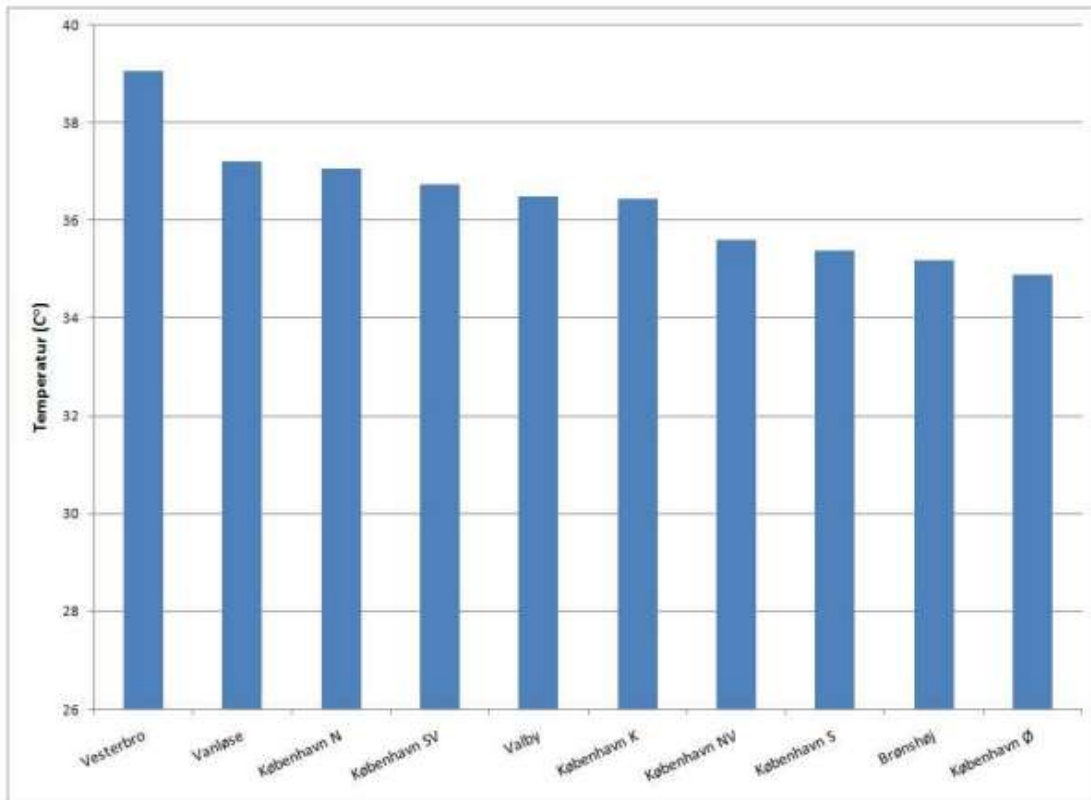
<https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>.

I rapporten blev der også lavet et nord-syd-gående transekt fra Dyrehaven nord for København, tværs gennem Vesterbro til det sydlige Amager, se figur 11. Det ses, at temperaturerne er lavest i de grønne områder nord for byen, stigende over forstæderne, og kulminerende i centrum. Det fremgår at de grønne områder, især træbevoksede, virker kølende. Omvendt er det absolut varmeste område DSB's jernbaneterræn nær Vasbygade i København SV, som ligger i det område, der skal byudvikles.



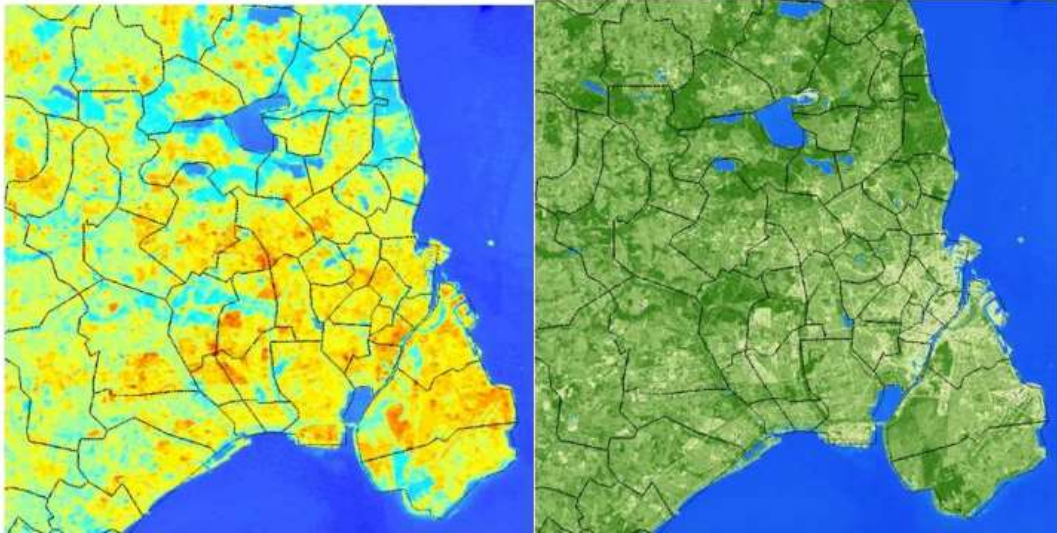
Figur 11: Nord-syd-gående transekt gennem København, der viser overfladetemperaturerne d. 20. juli. Kilde: <https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>.

Plottes gennemsnitsværdierne for overfladetemperaturerne målt d. 20 juli efter postdistrikt i Københavns Kommune ses Vesterbro at have de varmeste overflader; ovenikøbet et godt stykke varmere end de efterfølgende distrikter (Vanløse og Nørrebro), se figur 12.



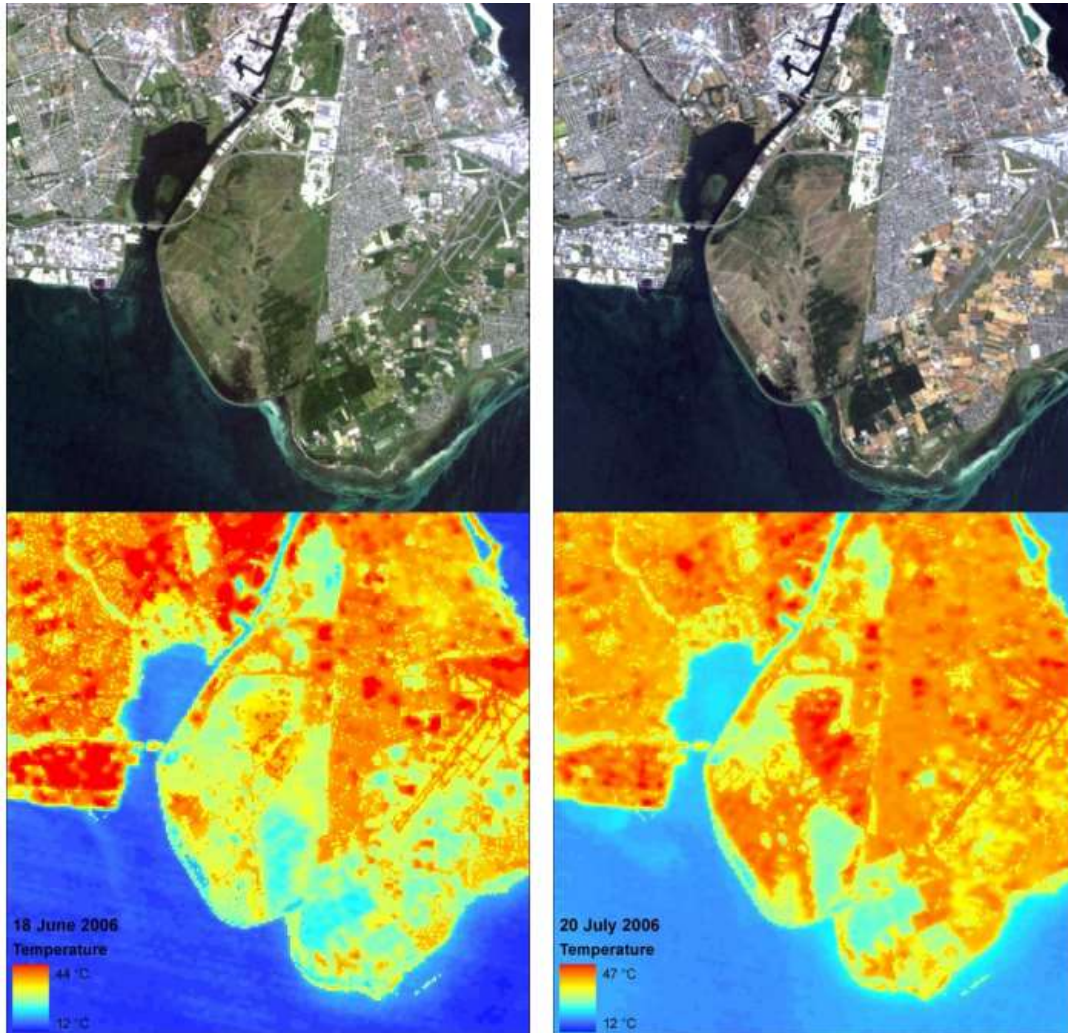
Figur 12: Postdistrikter i Københavns Kommune opstillet efter distriktets middeloverfladetemperatur d. 20. juli, 2006. Kilde: <https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>.

I rapporten blev overfladetemperaturerne for den 20. juli sammenlignet med et kort over områdets vegetationsdække, baseret på NDVI data fra samme satellitoverflyvning. NDVI kan opfattes som et grønhedsindeks. De to kort, der er gengivet i figur 13 er nærmest hinandens spejlbilleder. Således ses, at de områder, der har højeste overfladetemperaturer, har et lavt vegetationsdække, mens omvendt de køligste områder, er dækket af vegetation.



Figur 13: Til venstre ses overfladetemperaturerne målt d. 20 juli og til højre ses vegetationsdækket (NDVI) samme dag. Kilde: <https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>.

Rapporten dokumenterer også, at vegetation kun er i stand til at køle hvis den er i live. Perioden mellem overflyvningerne d. 18. juni og 20. juli var præget af meget af varme og meget lidt nedbør, hvilket førte til at græsområder visnede. Konsekvensen, der ses i figur 14, er at disse områder opvarmes ligeså meget som naboområderne. Kun områder med levende vegetation havde fortsat kølende effekt.



Figur 14: Ortofotos sammenlignet med overfladetemperaturer d. 18. juni, hvor vegetationen ikke manglede vand (de to fotos til venstre), og igen d. 20. juli, hvor græsset mange steder var tørret ud (de to fotos til højre). Der er zoomet ind på det sydlige Amager. Forandringen ses tydeligt: fra et græsdække med nogen kølende effekt d. 18. juni, til det afsvedne græstæppe d. 20. juli og temperaturer på højde med de varmeste bydele. Kun hvor vegetationen fortsat er i live, f.eks. skovområderne mod syd, er der stadig en næsten intakt kølende effekt. Kilde:

<https://core.ac.uk/download/pdf/269197678.pdf>.

Samlet kan det konkluderes, at København ligesom de omkringliggende bebyggelser udviser højere overfladetemperaturer, og at tætheden af varme områder vokser mod Københavns centrum. Det kan også konkluderes, at grønne områder har markant lavere temperaturer, hvis vegetation er i live.

Selv om rapporten også forsøger sig med en oversættelse af overfladetemperaturer til lufttemperaturer, gengives disse ikke her, da de er forbundet med stor usikkerhed. Ud fra rapporten kan der derfor ikke konkluderes noget om luft-UHI.

## 4.2 Vurdering af UHI ved byudviklingsprojektet på Godsbaneterrænet (Jernbanebyen)

I den aktuelle situation vurderes det, at Godsbaneterrænet stort set hverken gør fra eller til for luft-UHI (forhøjede temperaturer aften og nat), da bygningsmassen er begrænset. Derimod repræsenterer området i forhold til overflade-UHI et hot-spot (forhøjede overfladetemperaturer i dagtimerne).

Ved den forestående byomdannelse bør fokus være på at minimere de nye konstruktioners varmeakkumulerende evne, så områdets bidrag til luft-UHI fortsat kan holdes lavt. Samtidig bør bydelens begrønning maksimeres. Desuden bør overfladematerialer med høj termisk ledningsevne undgås, sådan at områdets markante overflade-UHI elimineres. Disse aspekter uddybes i det følgende.

### *Situationen omkring luft-UHI og overflade-UHI*

I forhold luft-UHI har vi desværre ikke meget viden, hverken om forholdene generelt i København eller specifikt for Vesterbro, men vurderet ud fra litteraturen er en luft-UHI (dvs. forhøjede lufttemperaturer aften og nat) på omkring 3-5 °C sandsynlig for København (figur 2). På det planlagte byudviklingsområde, Godsbaneterrænet, er der i dag enkelte store asfalt-flader og nogle få lave bygninger, og ikke megen vegetation. På grund af den begrænsede bygningsmasse vurderes området ikke at akkumulere særlig meget varme, og på grund af den begrænsede vegetation heller ikke at bidrage særligt til byens afkøling. Samlet set gør Godsbaneterrænet, som det ligger i dag, hverken luft-UHI specielt meget værre eller bedre.

I forhold til overflade-UHI er Vesterbro det klart varmeste postdistrikt i Københavns Kommune i UHI-rapporten omtalt ovenfor (figur 12). Yderligere har netop Godsbaneterrænet rekorden for den højeste temperatur målt i det nord-syd gående transekt vist i figur 11, der tilfældigvis skærer lige igennem byudviklingsområdet. Dette tilskrives områdets asfaltoverflader og det faktum at de eksisterende bygninger har mørke tagflader. Metalskinner og stenbefæstninger bidrager også negativt. Desuden betyder det også noget at der ikke er meget grønt i området i dag.

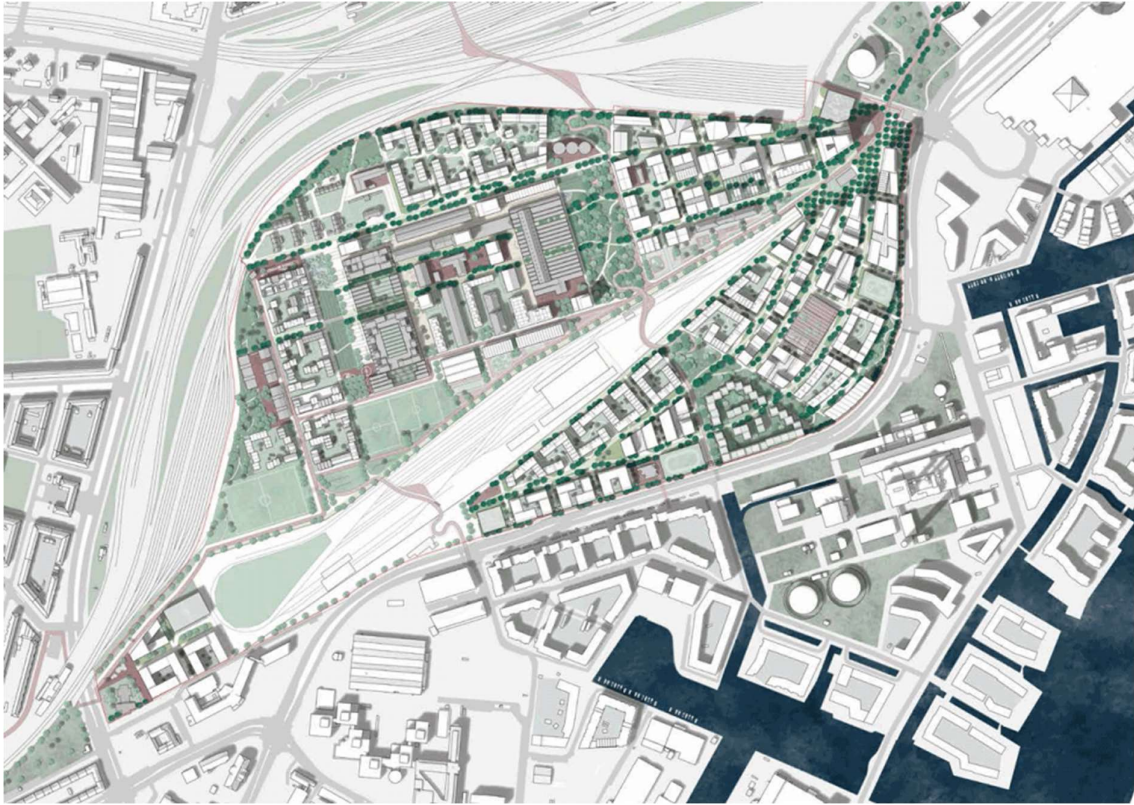
### *Vurdering af Jernbanebyen*

Ifølge Københavns Kommuneplan 2019 udgør Godsbaneterrænet i alt 55 ha. Heraf udgør det udpegede byggefelt 38 ha. Bebyggelsesprocenten er i udgangspunktet sat til 100 % i den nordlige del og 150-175 % i den sydlige del. Ud af de 38 ha skal 9-12 ha være grøn struktur, bestående af offentlig park, grønne byrum og friarealer. I figur 15 er vist et luftfoto af Godsbaneterrænet med byggefeltet tegnet ind.



*Figur 15: Eksisterende forhold. Godsbaneterrænet med markering af byggefeltet. Kopieret fra Københavns Kommunes hjemmeside for indsendelse af høringssvar (<https://blivhoert.kk.dk/hoering/godsbaneterrænet>).*

Kravene til grøn struktur ser ud til at blive honoreret i arkitektkonkurrencens vinderforslag, der har navnet Jernbanebyen og er udviklet af COBE og deres team. En illustration af Jernbanebyen er vist i figur 16.



Figur 16: "Jernbanebyen", som den er foreslået i COBEs vinderforslag. Kopieret fra Magasinet KBH (<https://www.magasinetkbh.dk/opinion/sig-nej-til-jernbanebyen-som-forstad>).

I udgangspunktet vurderes det, at den byfortætning Jernbanebyen uundgåeligt vil forværre Københavns luft-UHI alene på grund af den større bygningsmasse projektet uvægerligt medfører. Bygningsmassen vil akkumulere varme i løbet af dagen som frigives aften og nat. Det er derfor vigtigt at forsøge at begrænse denne risiko.

I forhold til overflade-UHI, der i forvejen er høj i området, kan den nye bydel næppe forværre situationen.

Ambitionen om 9-12 ha grønne områder vil kunne bidrage positivt til at begrænse begge varmeøffekter, men kun hvis det lykkes at etablere en vegetation, der trives og dermed er fordampningsaktiv og som er godt fordelt ud i området og når op i vis højde. Mere herom i afsnit 5 og 6.



## 5. Afbødningsstrategier

I et klima som det danske er for meget sol og varme om sommeren sjældent et problem. Ofte er den danske sommer kølig, regnfuld og blæsende, så strategier til afbødning af byens varmeø-effekter skal balanceres mod ønsket om sol og læ. Samtidig bør klimaforandringerne dog tages med i betragtning. Såvel den generelle temperaturstigning som den forventede hyppigere forekomst af hedebølger gør det fornuftigt at tænke buffer-mekanismer ind.

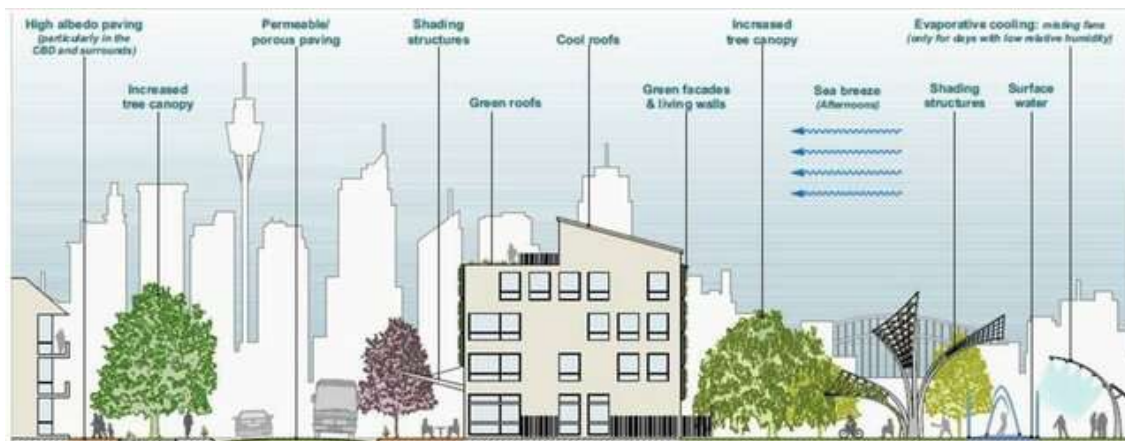
Det handler derfor om at arbejde med de kølende tiltag, der ikke begrænser solindstrålingen og som ikke er baseret på gennemluftningskorridorer.

Samtidig handler det om at vælge løsninger, der ikke bidrager til yderligere udledning af drivhusgasser, hvilket i praksis vil sige naturbaserede metoder.

Det efterlader tre metoder til begrænsning af varmeøeffekter, nemlig:

1. Begræns indstråling, varmeakkumulering og høje overfladetemperaturer
2. Maksimer fordampning fra vegetation og frie vandspejl  
Skab mulighed for gennemtræk på bygningsniveau. (Chillfaktoren er grundet vores blæsende klima vigtig om vinteren, og man skal derfor undgå vindtunneller og i stedet kun arbejde på bygningsniveau).

I figur 17 er nogle af de generelle metoder til dæmpning af UHI illustreret. For danske forhold vil skyggegivende konstruktioner, vandforstøvere, og beluftningskorridorer næppe være aktuelt.



Figur 17: Illustration af metoder til køling af byen og modvirkning af UHI: Høj albedo, især i høj, tæt by; flere træer; porøse belægninger; skyggegivende konstruktioner; grønne tage; kolde tage (cool roofs); grønne facader; havbrise eftermiddag og aften (beluftningskorridor); frie vandspejl; vandforstøvere (hvis luftfugtigheden er lav). Figuren er hentet her:

[https://www.researchgate.net/publication/372416908\\_Framework\\_for\\_assessing\\_the\\_impacts\\_of\\_urban\\_physical\\_characteristics\\_to\\_mitigate\\_urban\\_heat\\_island\\_effects/figures](https://www.researchgate.net/publication/372416908_Framework_for_assessing_the_impacts_of_urban_physical_characteristics_to_mitigate_urban_heat_island_effects/figures).

### 5.1 Begrænsning af indstråling og varmeakkumulering

#### Albedo – begrænsning af indstråling

Afsætningen af solens energi i byens materialer kan begrænses ved at benytte materialer med høj albedo, dvs. materialer, der reflekterer solens stråler. Det drejer sig i princippet om alle overflade-

konstruktioner, dvs. tagflader, facader og belægninger. En høj albedo afbøder både luft-UHI og overflade-UHI.

Tagfladen er den vigtigste overflade at arbejde med, for her reflekteres solens stråler direkte tilbage mod verdensrummet. Brugen af såkaldte kolde tage ("cool roofs") er blevet populært flere steder i udlandet, og flere danske firmaer markedsfører tagprodukter, der kan reflektere sollys (<https://www.protan.dk/tag-og-membraner/produkter-og-losninger/eksponerte-tak/protan-cool-roof/>; <https://www.elaproof.com/da/product/elaproof-cool-roof/>). Det kan enten være selve konstruktionsmaterialet, der har en lys/hvid farve, eller en form for maling eller membran der tilføres det eksisterende tag. Her er link til en video, hvor et sort tag i New York City males hvidt for at dæmpe varmeøeffekten og mindske behovet for køleanlæg i bygningen (air-conditioning): <https://www.elaproof.com/da/product/elaproof-cool-roof/>. For at kolde tage er en effektiv løsning, skal de forblive hvide i lang tid efter installation – her kan der være stor forskel på hvor meget støv, skidt og møg forskellige materialetyper tilbageholder og dermed hvor lang tid der går før et hvidt tag ikke længere er helt hvidt.

Også en lav sky-view faktor kan begrænse effektiviteten af kolde tage, fordi lys reflekteret fra en lavere bygning kan genoptages i en højere nabobygning.

Bygningsfacaden kan også bidrage, da facader med høj albedo reflekterer mere sollys end mørke facader. I og med at der er tale om lodrette flader, er effekten dog ikke lige så stor, fordi det reflekterede lys sendes mod jordoverfladen og evt. nabobygninger, frem for mod verdensrummet.

Terrænnets albedo betyder også noget. Lyse belægninger absorberer mindre af solens energi end mørke belægninger. En udfordring er her, at terrænoverflader let smudsas til og bliver mørkere. Men alt andet lige er grusveje og lyse belægningssten mindre varmeakkumulerende end asfalt og mørke belægningssten (se figur 6, 7 og 18).



*Figur 18: Valget af vejbelægning kan påvirke UHI. I Danmark er der tradition for asfaltveje (foto til venstre), men grusveje (foto til højre), der har en højere albedo, er et udmærket alternativ i områder med langsom kørsel og lav trafikbelastning.*

### *Varmeakkumulering – valg af materialer og tæthed*

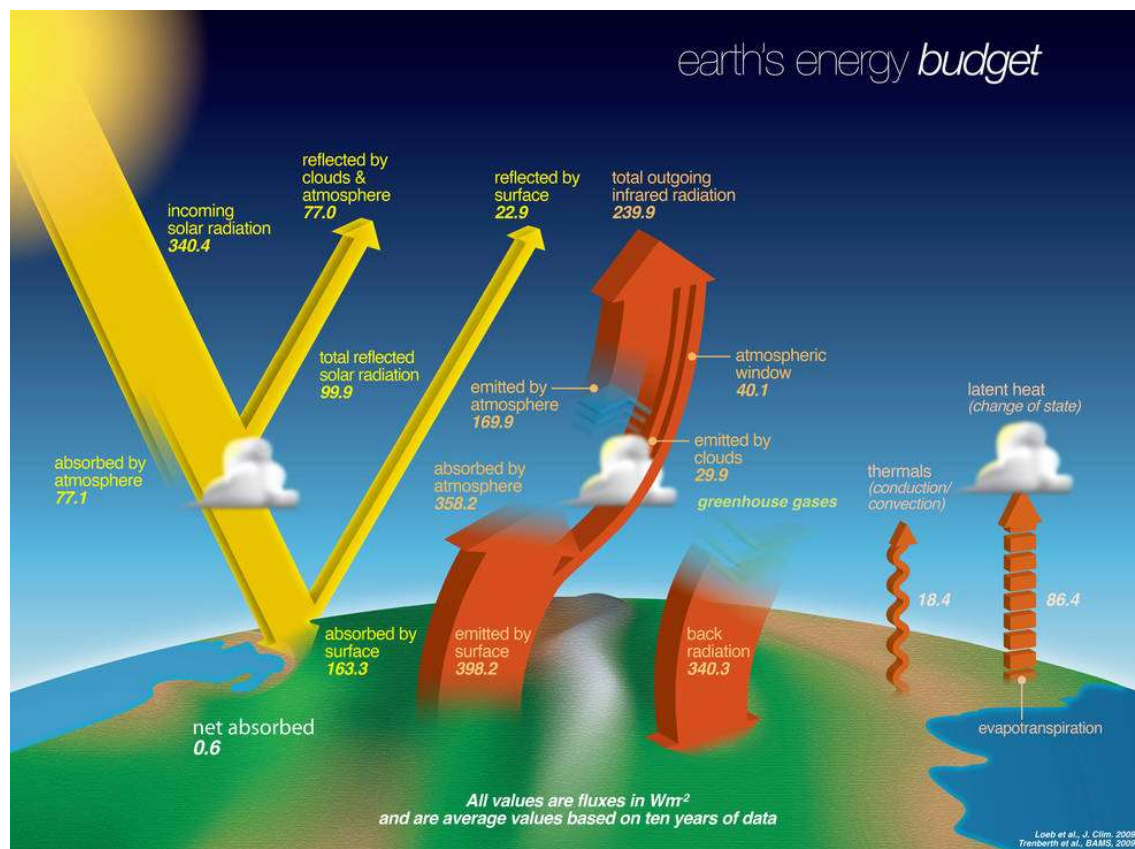
Helt overordnet er der en sammenhæng mellem mængden af bygningsmaterialer, der anvendes i et område og områdets bidrag til luft-UHI. Jo færre tons bygningsmateriale per kvadratmeter desto mindre varmeakkumulering. Dermed repræsenterer enhver byfortætning nærmest uundgåeligt et bidrag til luft-UHI. Ved at bygge i lette materialer med lav varmekapacitet som f.eks. træ kan bidraget mindskes.

I forhold til overflade-UHI gælder det først og fremmest om at undgå metal-overflader, der har meget høj varmeledende evne, men også beton og tegl kan blive meget varme. Det er især vigtigt tæt på hvor folk opholder sig, dvs. i gadeplan samt altaner og tagterrasser. Det er også en fordel med porøse og vegetationsdækkede overflader, fordi de tillader fordampning.

## 5.2 Maksimer fordampning med porøsitet, vand og planter

På samme måde som klodens øvrige overflader sker afkølingen af et byområde gennem 1) varmedstråling, 2) fra termisk konvektion, og 3) fordampning. Energibalancen for Jorden er vist i figur 19.

Varmedstrålingen vokser med overfladens temperatur, og er ikke en mekanisme vi kan styre. Det samme gælder den termiske konvektion, hvor varmere luft søger opad i atmosfæren på grund af den varme lufts lavere massefylde i forhold til den kolde luft. Det er den termiske konvektion vi mærker som luftens temperatur, og energien heri kaldes også mærkbar varme eller sensibel varme. Den tredje mekanisme, fordampning, er til gengæld en parameter vi ret effektivt kan påvirke. Det drejer sig om såvel direkte fordampning fra jorden og vandoverflader som fordampning via planterne, såkaldt transpiration.



Figur 19: Jordens energibalance, opgjort i  $W/m^2$ , som gennemsnit af 10 års data. Gule pile: Solens energi sendes mod Jorden som kortbølget stråling; en del reflekteres eller absorberes i atmosfæren, men omkring 50 % ( $163,3:340,4$ ) absorberes i jordoverfladen og varmer jorden op. Røde pile: Jordkloden undgår (stort set) at blive opvarmet, fordi den modtagne energi sendes tilbage til verdensrummet via varmestråling (langbølget), bortledning (termisk konvektion), og ved fordampning. Ved fordampning indbygges varme fra omgivelserne (mærkbar varme) i vanddampen, der derfor indeholder latent varme, der frigives igen hvis vanddampen fortættes til dråber. På grund af stigningen i drivhusgasserne sker der en nettoabsorption på  $0,6 W/m^2$ , som fører til global opvarmning. Kilde: <https://myasadata.larc.nasa.gov/basic-page/urban-heat-islands>.

I en by er fordampningsmekanismen typisk ret begrænset, fordi jordoverfladen er forseglet med bygninger og veje og vegetationen er begrænset. Ved at gøre byens overflader så porøse som muligt og ved at maksimere andelen af grønt i en by kan afkølingen af byen nærme sig det, der gør sig gældende i naturområder uden for byen.

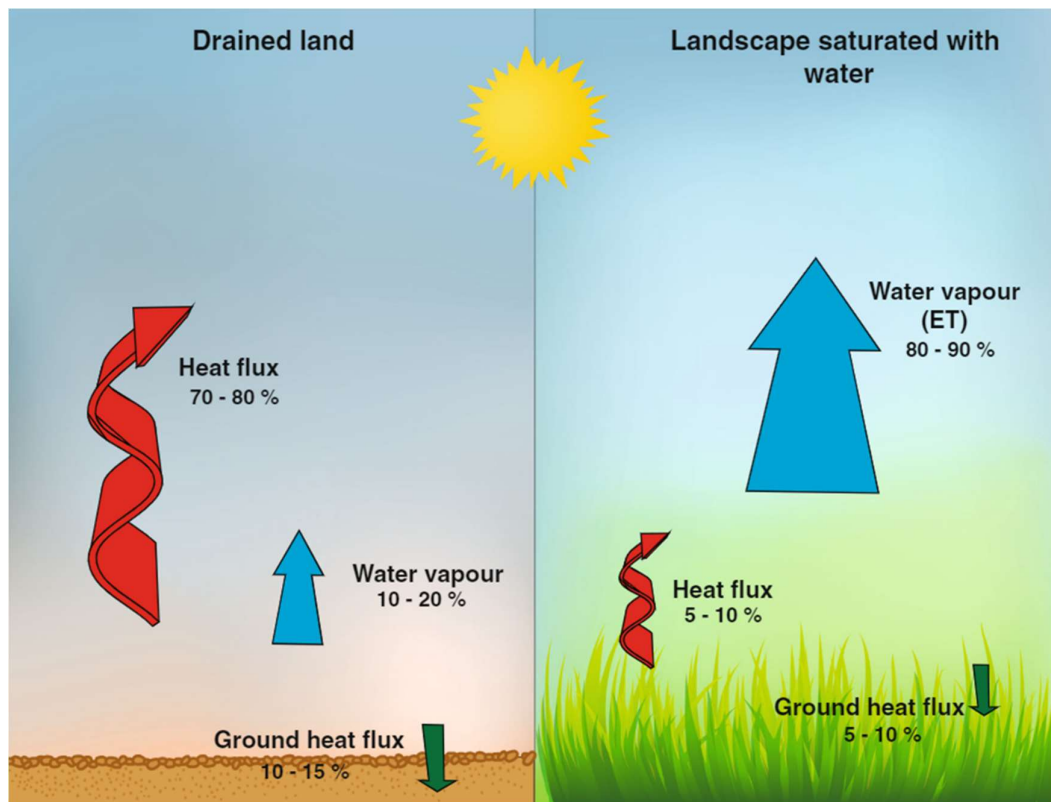
En porøs by er så lidt forseglet som muligt. Porøsiteten kan øges ved at have så få belægninger som muligt og ved at bruge permeable belægninger, som f.eks. grusmaterialer, græsarmeringer, permeabel asfalt, og permeable fliser og fuger (se figur 20). Jo mere vegetationsdækket belægningen er desto bedre, for da kan rødderne hjælpe med at suge vand op fra dybere jordlag.



*Figur 20: Eksempler på porøse overfladen, der bidrager med fordampning: Trædesten i græs; Naturstensbelægning med græsfuger, Græsarmering.*

For at vegetation kan bidrage til nedkøling er det ikke nok at der er mange planter. Der skal også være rigeligt med vand. For hvis rodzonen begynder at tørre ud, vil mange planter minimere deres vandforbrug for at øge chancen for at overleve en evt. tørke. Denne evne har græsser ikke - de vokser for fuld kraft indtil de tørrer ud (de overlever som art via frø) - men alle træer, buske og slyngplanter samt mange urter kan minimere deres fordampning ved aktivt at lukke bladenes spalteåbninger (stomata), dersom vandindholdet i rodzonen kommer ned på et kritisk lavt niveau. I den situation bidrager vegetationen ikke til nedkøling, hverken i by eller på land. Det er også det, der er forklaringen på at luft-UHI ikke er så tydelig, hvis der er tørke, for da er det åbne lands evne til at forhindre opvarmning og sikre afkøling ligeså ringe som byens (se eksempel i Figur 14). Det skal i parentes bemærkes, at set fra plantens side er lukkede stomata om dagen ikke en ønskværdig situation, fordi optag af luftens CO<sub>2</sub> og dermed plantens vækst da forhindres.

Et eksempel på hvor betydelig en andel af solens indkommende energi, der kan indbygges i vanddamp (latent varme), hvis de rette betingelser i form af rigeligt vand og rigelig biomasse er til stede, er vist i figur 21. Her sammenlignes energibalancen for henholdsvis en kornmark, dvs. en monokultur med lille biomasse – ikke ulig en by - med et fuldt udviklet naturområde, der ikke mangler vand.



Figur 21: Sammenligning af energibalancen for en tørt landskab (til venstre) og et vandmættet landskab med vegetation (til højre). Begge områder modtager samme mængde energi fra solen (100 %), men energien omsættes forskelligt i de to situationer, hvor hovedparten af energien indbygges i vanddamp (latent varme) i det vandmættede landskab, mens energien primært havner i luften som mærkbar varme (heat flux, termisk konvektion) i det tørre landskab. Situationen i byen er ikke ulig det tørre landskab til venstre. Kilde: Huruny og Pokorny, 2016, *The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review*, *Folia Geobot*, DOI 10.1007/s12224-016-9261-0.

### 5.3 Skab mulighed for gennemtræk på bygningsniveau

I blandt andet Zürich benyttes beluftningskorridorer til at bekæmpe varmeøeffekten. Her forsøger man at friholde nogle stræk gennem byen for byggeri, sådan at kølig luft fra omkringliggende bakker og skove kan strømme igennem (<https://www.swissinfo.ch/eng/sci-tech/how-swiss-cities-are-beating-the-heat/45965580>). På grund af behovet for læ kan beluftningskorridorer ikke anbefales i København, men til gengæld er det vigtigt, at der kan skabes gennemtræk i den enkelte bygning, og i den enkelte lejlighed, dvs. vinduer skal kunne åbnes i to forskellige retninger.

## 6. Anbefalinger til designtiltag i Jernbanebyen

Varmeøffekten gør byen varmere både nat (luft-UHI) og dag (overflade-UHI) året rundt, sammenlignet med områder uden for byen. Dette vil også være tilfældet for Godsbaneterrænet i forbindelse med at området omdannes til tæt by. Men der kan gøres en del for at begrænse effekten og dermed gøre bydelen så tryk og behagelig temperaturmæssigt at opholde sig i som muligt.

Vinderforslaget Jernbanebyen ser ud til at have en god konfiguration i forhold til at begrænse bydelens bidrag til varmeøffekt. Her er især den store andel af grønt (24-32 % af byggefeltets) positivt, ligesom den foreslåede mosaikagtige struktur med god fordeling af grønt mellem bygningerne og op ad facaderne tegner godt. Det er også positivt at terrænet mellem husene holdes stort set fri for trafik for dermed kan der laves porøse og delvist vegetationsholdige belægninger. Placeringen af højhusene tæt på havnen er fornuftigt, fordi lejlighederne her vil være mest udsatte for luft-UHI, men ved placering tæt på havnen er chancen for kølig havbrise størst.

Her følger nogle specifikke anbefalinger:

*Højhusene:* Stræb efter en høj albedo på højhusenes tagflader og facader. Det vil begrænse varmeakkumuleringen i bygningerne. Byg i lette materialer med lille varmekapacitet.

*Øvrige (lavere) bygninger:* Høj albedo kan stadig give mening, men grønne tage vil være et bedre alternativ, fordi de kan nedkøle luften i gadeplan, og samtidig forhindre opvarmning af bygningen på grund af planterens skyggevirkning. For at et grønt tag kan virke kølende skal planterne aktivt transpirere vand, hvorfor rødderne skal have adgang til vand. Det kan kun sikres 100 % med et vandingsanlæg, der kan slås til i tilfælde af tørke (og hedebløge), mens såkaldte green-blue-roofs, der er grønne tage udstyret med et vandingsmagasin under vækstlaget, kan bidrage. Læs mere om hvordan grønne tage kan virke kølende og skabe et godt mikroklima her:

[https://videntjenesten.ku.dk/park\\_og\\_landskab/etablering\\_park-og\\_landskabsbevoksning/facade\\_og\\_tagbevoksning/videnblad\\_04.04-09/](https://videntjenesten.ku.dk/park_og_landskab/etablering_park-og_landskabsbevoksning/facade_og_tagbevoksning/videnblad_04.04-09/)

Byg i lette materialer med lille varmekapacitet.

*Facader:* Høj albedo kan give mening, men begrønning af facader er en bedre ide, fordi planterne aktivt kan bidrage til kølingen. Sørg for at benytte rodfaste lianer, dvs. klatre- og slyngplanter med rodnettet etableret i jorden, altså ingen krukker, planterkasser eller lignende. Med rødderne etableret i jorden får planten de bedste vilkår for en god og dyb rodudvikling, og dermed størst robusthed over for udsving i vind og vejr (tørke, frost), og i sidste ende chance for fuld udvikling og lang levetid. Det er vigtigst at sørge for facadebegrønning i gadeplan og op til og med første sal, dvs. fra 0-15 m over terræn. Højere oppe betyder begrønningen ikke så meget fordi den varmere luft da er opblandet med køligere luft højere oppe.

*Terræn:* Grus og andre lyse og porøse belægningstyper anbefales. Slået græs på stier m.v. er også godt fordi de tillader fordampning. Herudover handler det om at etablere så meget grønt som muligt. Træer, buske og slyngplanter bidrager mere til kølingen end græs og urter og bør derfor prioriteres. Sørg for god rodetablering. Jo flere træer der kan plantes, desto bedre, for dels resulterer træer i den største biomasse, dels kommer de op i højden, og kan dermed køle de nederste etager. En anden fordel ved træer med god udvikling er at de giver mulighed for skygge. Der kan vælges enkelte nåltræer for at få noget vintergrønt, men generelt anbefales løvfældende arter, da de typisk transpirerer mest vand. Sørg for at give træerne plads så de kan blive fuldkronede.



*Frie vandspejl:* Kan der skabes frie vandspejl er det en fordel. Det er vigtigt at vandelementet ikke løber tørt, så adgang til en permanent og rigelig vandkilde er vigtig.

*Kobling til håndtering af regnafstrømning (LAR):* Lokal afledning af regnafstrømningen (LAR) fra bydelen anbefales, fordi det kan forbedre området's tørkeresiliens og vegetationens trivsel, og dermed sikre maksimalt bidrag fra vegetationen til begrænsning af varmeøffekter. Både almindelig og lodret LAR anbefales.

- Almindelig LAR: Ved almindelig LAR skal strømning fra bygninger ledes til rodzonen omkring bygning og mellem bygninger. Overskydende vand drænes til nedsivningselement, f.eks. en faskine med overløb til kloak eller havn, eller hvis nedsivning ikke kan lade sig gøre, da ledes vandet via forsinkelselement til kloak eller havn. Det er vigtigt først at tilbyde vandet til rodzonen og først derefter bortdræne det overskydende vand, dvs. at vandet skal til jordoverfladen før det overskydende havner i nedsivningselementet.
- Lodret LAR, også kaldet tryksat LAR. Denne form for LAR er en ny metode, der indtil videre kun er i brug ved Folehaven i Valby. I lodret LAR udnyttes tagvands potentielle energi til at trykke vandet væk fra bygningen og op over terræn til et lodretstående element, hvorfra vandet fordampes. Regner det mere end fordampningen kan følge med til, kan det overskydende vand nedsives, alternativt blot forsinkes for udledning til kloak eller havn. I og med at lodret LAR har fordampning som primær mekanisme, kan metoden bidrage direkte til dæmpning af luft-UHI. Lodret LAR kan udformes på mange måder. I eksemplet fra Valby er der tale om en tre meter høj kombineret støj- og vandhåndteringskærm, hvilket måske også kan være aktuelt i Jernbanebyen. Lodret LAR kan også designes som et lavere skærm-element eller helt simpelt som et lavt jorddige. En stor fordel ved lodret LAR er at der ikke skal laves en udgravning til vandet, som eksempelvis faskiner og regnbæde kræver. Vandet parkeres lodret i skærmen og overskydende vand kan enten nedsives eller parkeres på et naboterræn for efterfølgende langsom nedsivning eller bortledning. Se evt. video her: [Video: Design af grøn Klimaskærm i Valby - video fra COMSOL.](#)