



CLIMATE
ANALYTICS



CLIMATE CHANGE CENTER
Berlin Brandenburg

Hitzestress und Anpassungsmaß- nahmen in Berlin/Brandenburg

November 2023

Studie im Auftrag des Climate Change Center Berlin Brandenburg, gefördert durch die Senatsverwaltung Wissenschaft, Forschung und Pflege

AUTHOR:INNEN

Dalia Kellou, Raluca Davidel, Miechel De Paep, Niels Souverijns, Florian König, Theresa Rauch, Inga Menke

ZITIERUNG UND ANERKENNUNG

Diese Publikation kann ganz oder teilweise für Bildungszwecke oder gemeinnützige Zwecke vervielfältigt werden, ohne dass eine besondere Genehmigung von Climate Analytics erforderlich ist, vorausgesetzt, die Quelle wird anerkannt und/oder ordnungsgemäß angegeben.

Diese Publikation darf ohne vorherige schriftliche Genehmigung von Climate Analytics nicht weiterverkauft oder für kommerzielle Zwecke verwendet werden.

Wir bitten um Entschuldigung für alle Fehler oder Auslassungen, die versehentlich gemacht wurden.

Dieses Dokument kann wie folgt zitiert werden:

Climate Analytics (2023). Hitzestress und Anpassungsmaßnahmen in Berlin/Brandenburg

Studie im Auftrag des Climate Change Center Berlin Brandenburg, gefördert durch die Senatsverwaltung Wissenschaft, Forschung und Pflege



Supporting science based policy to prevent dangerous climate change enabling sustainable development

www.climateanalytics.org

Zusammenfassung

Der menschengemachte Klimawandel hat weltweit zu einer beispiellosen Veränderung des Klimas geführt. Städte sind dabei besonders anfällig für Hitzestress aufgrund des Hitzeinseleffekts, welcher durch Faktoren wie die Versiegelung von Flächen, den Mangel an Vegetation und städtische Aktivitäten verstärkt wird. Deshalb betrachten wir in diesem Bericht die Folgen des Klimawandels auf die Metropolregion Berlin-Brandenburg, mit einem speziellen Fokus auf die Auswirkungen von Hitzestress und die Entwicklung von Anpassungsstrategien. Er nutzt detaillierte Hitzestressmodellierungen, um die Auswirkungen von Nachverdichtung und Stadtplanung auf die regionale Hitzebelastung zu analysieren und zu visualisieren.

Eine Modellierung von Temperatur- und Hitzestress-Indikatoren bietet detaillierte, hochaufgelöste Informationen für Berlin-Brandenburg. Die Ergebnisse zeigen besonders hitzestressanfällige Gegenden und heben die Wichtigkeit großer, alter Bäume, sowie eines zusammenhängenden Blätterdachs für deren kühlende Wirkung hervor. Versiegelte Flächen wie Parkplätze, aber auch Schulhöfe und Spielplätze ohne schattenspendende Bäume heizen sich dagegen besonders auf.

In der Analyse werden drei Zukunftsszenarien betrachtet: Die Fortführung der aktuellen Politik, ein verzögertes Handeln und die Begrenzung der Erwärmung auf 1,5 °C. Jedes dieser Szenarien wird hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die Region untersucht, wobei deutlich wird, dass schnelle und entschlossene Maßnahmen zur Dekarbonisierung und Anpassung unabdingbar sind.

Am Beispiel der Greifswalder Straße wurden verschiedene Bebauungsoptionen für die Nachverdichtung erstellt und auf ihre Resilienz gegen Hitzestress analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass eine Kombination aus reduzierter Grundflächenversiegelung und der Schaffung großer, zusammenhängender Grünflächen (Biotopverbunde) mit Bäumen die effektivste Strategie zur Reduzierung der Hitzebelastung darstellt. Die vorgeschlagenen Bebauungsszenarien wurden zudem unter Verwendung des Sweco Sustainability Compass hinsichtlich verschiedener Nachhaltigkeitskriterien bewertet. Dabei schneidet das Szenario, welches sowohl den bebauten als auch den offenen Raum optimiert, am besten ab.

Zusammenfassend betont der Bericht die Wichtigkeit von Grünflächen und einer nachhaltigen Stadtplanung zur Reduzierung der Auswirkungen des Klimawandels, insbesondere des Hitzestresses, in städtischen Gebieten. Er bietet wertvolle Erkenntnisse und Empfehlungen für Politik und Stadtplanung, um die Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels zu erhöhen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Beschreibung des Projektes	1
Modellierung von Hitzestress in Berlin/Brandenburg	3
Vorstellung der Anpassungsoptionen am Beispiel Greifswalderstraße	13
Referenzen	25
Annex	27

Abbildungen

Abbildung 1 Faktoren die zum Hitzeinseleffekt beitragen.	2
Abbildung 2 Städtischer Wärmeinseleffekt bei Nacht (links) und bei Tag (rechts).	5
Abbildung 3 Zusammenhang zwischen Bodenversiegelung/mangelnder Vegetationsdichte	5
Abbildung 4 Der Ausschnitt zeigt das Gebiet um den Alexanderplatz.	6
Abbildung 5 Der Ausschnitt zeigt das Gebiet um Schmargendorf.	7
Abbildung 6 Das Gebiet um den Greifswalder Güterbahnhof an dem heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.	8
Abbildung 7 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.	9
Abbildung 8 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.	9
Abbildung 9 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.	10
Abbildung 10 Die drei zukünftigen Emissionsszenarien	11
Abbildung 11 Durchschnittliche Anzahl der Nächte pro Jahr, in denen die Temperaturen nicht unter 20°C fallen (d.h. tropische Nächte).	12
Abbildung 12 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Anzahl von Nächten mit Temperaturen über 20°C im Durchschnitt des Berliner Stadtgebiets.	13
Abbildung 13 Lage der Untersuchungsgegend an der Greifswalderstraße	14
Abbildung 14 Visualisierung der gegenwärtigen Hitzebelastung für den Analysebereich	15
Abbildung 15 Szenario 1 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße	16
Abbildung 16 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die erste vorgeschlagene Konstruktion	16
Abbildung 17 Szenario 2 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße	17
Abbildung 18 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die zweite vorgeschlagene Konstruktion	18
Abbildung 19 Szenario 3 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße	19

Abbildung 20 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die dritte vorgeschlagene Konstruktion	19
Abbildung 21 Der Sweco Sustainability Compass	21

Tabellen

Tabelle 1 Vergleich der Szenarien anhand der Sweco Nachhaltigkeits Indikatoren	24
--	----

Beschreibung des Projektes

Die letzten Jahre haben eindrücklich gezeigt, dass die Folgen des Klimawandels ein Teil unseres Alltags geworden sind. Wir sehen zunehmende Extremwetterereignisse und neue Hitzerekorde an Land und in den Meeren. Städte gelten als besonders vulnerabel in Bezug auf Hitzeextreme und stehen deshalb im Fokus unseres Projekts. Durch hochaufgelöste Modellierung von Klimawandelfolgen und Anpassungsmöglichkeiten, wollen wir politikrelevante Schlussfolgerungen für die Stadtentwicklung im Hinblick auf Nachverdichtung aufzeigen. Als Beispiel wird ein aktuelles Nachverdichtungsprojekt in der Greifswalder Straße analysiert und verschiedene stadtplanerische Optionen modelliert.

Hintergrund

Die Menschheit erlebt gegenwärtig eine beispiellose Veränderung des Klimas. Der Anstieg der globalen Mitteltemperatur seit Beginn der Industrialisierung ist nahezu vollständig auf die Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Öl und Gas, sowie die intensive Land- und Viehwirtschaft zurückzuführen.

Die Folgen beschränken sich nicht nur auf unmittelbare physische Auswirkungen wie den Anstieg des Meeresspiegels, vermehrte Extremwetterereignisse und Hitzewellen. Sie stellen zunehmend eine bedeutende Herausforderung für das Fortbestehen der menschlichen Zivilisation dar.

Klimawandel in Städten

Das Klima erhitzt sich global, aber in Städten ganz besonders. Der sogenannte Hitzeinsel-Effekt sorgt dafür, dass sich Städte durch verschiedene Faktoren besonders aufheizen und Hitze langsamer wieder abgeben. Zu diesen Faktoren gehören zum Beispiel die Hitzespeicherung von Baustoffen wie Beton, die im Vergleich zu ländlichen Gebieten enge Bebauung mit hohen Gebäuden, welche zu eingeschränkter Ventilation und Hitzefallen führt, und zusätzliche Hitze, die durch menschliche Aktivitäten (Energieverbrauch, Hitzeemissionen durch Verkehr und Industrie, Hitzeerzeugung durch den menschlichen Metabolismus) generiert wird. Dieser Effekt wird zudem durch fehlende Grünflächen und Gewässer verstärkt. Dieser Einfluss wird in Abbildung XX visualisiert. Die Städtegeometrie kann demnach zu einer lokalen Erwärmung von bis zu 2°C führen, während Vegetation einen Kühleffekt von bis zu -3°C beisteuern kann.

Klimawandel in Städten

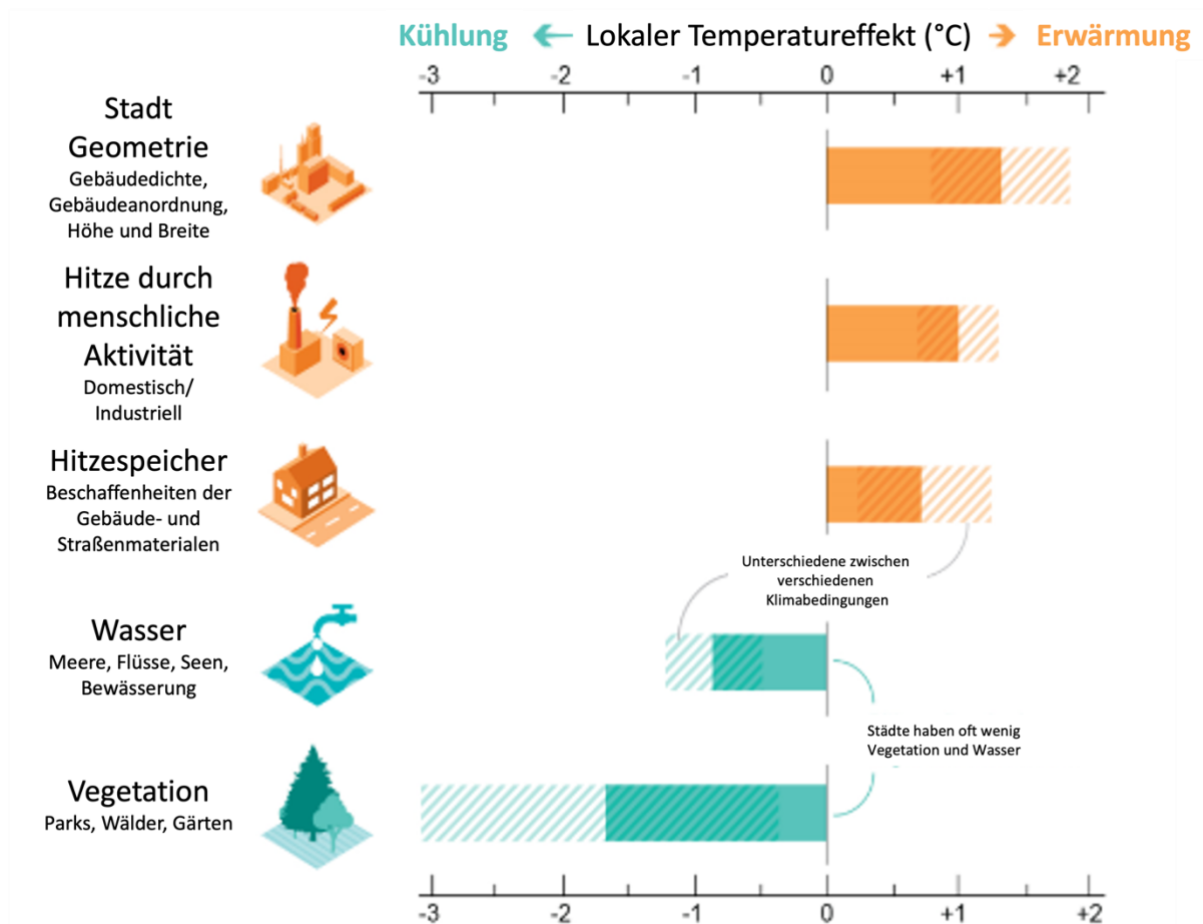


Abbildung 1 Faktoren die zum Hitzeinseleffekt beitragen. Aus (Gutiérrez et al., 2021)

Eine Zunahme an Hitzeextremen, auch während der Nacht, kann in Städten bereits heute beobachtet werden, was es für den menschlichen Körper schwer macht sich zu regenerieren. Durch die Kombination von zunehmender Urbanisierung und Klimaextremen wird der Hitzestress in Städten weiter zunehmen. Dies führt zu mehr Hitzewellen, heißen Tagen und Tropennächten. Selbst ohne weitere Erderwärmung würde sich dieser Trend durch Städtewachstum fortsetzen.

Hitzestress hat viele negative Auswirkungen, wie zunehmende Gesundheitsrisiken, erhöhter Energieverbrauch und reduzierte ökonomische Produktivität. Die Risiken, denen Menschen und Wirtschaftsgüter in Städten aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels ausgesetzt sind, haben in allen Städten und urbanen Gegenden zugenommen. Diese Auswirkungen belasten bereits vulnerable Bevölkerungsgruppen besonders, wie Menschen, die in Armut leben, ältere Generationen und Menschen mit chronischen Krankheiten und Behinderungen. Damit Städte langfristig lebenswert bleiben, sowie im Interesse der Inklusion, Nachhaltigkeit und ökonomischer Produktivität, sollten Aktivitäten zur Minderung des Klimawandels und zur Anpassung urbaner Räume im Mittelpunkt der Politik stehen.

Gesundheitliche Auswirkungen von Hitzestress zeigen sich, wenn der Körper Schwierigkeiten bekommt, die interne Temperatur zu regulieren. Hierauf haben neben der Lufttemperatur, auch Faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und das Ausüben physischer Aktivitäten einen großen Einfluss. Heiße Temperaturen zusammen mit hoher Luftfeuchtigkeit können zu Kreislaufkollaps führen und sogar tödlich sein. Der Indikator der gefühlten Temperatur kombiniert Lufttemperatur und -feuchtigkeit und dient damit der Einschätzung von Hitzestress auf den menschlichen Körper.

Hitzewellen mit hohen gefühlten Temperaturen führen zu erhöhten Krankenhauseinweisungen, verringerter Arbeitssicherheit und Produktivität, z.B. von Beschäftigten im Außenbereich. Kommen Tropennächte hinzu, kann sich der Körper nicht mehr erholen. Anhaltende Hitze ist besonders gefährlich für Altersgruppen ab 65. Extreme Hitze erhöht zudem die Risiken von Asthma, Atemwegserkrankungen und durch die Luft übertragenen Allergenen, wie Pollen.

Wachsende Städte

Eine Zunahme an Hitzestress beeinflusst dabei in Städten zusätzlich eine besonders große Anzahl an Menschen. Weltweit lebt die Mehrzahl der Bevölkerung in Städten, insgesamt zirka 4,2 Billionen. Die Kombination aus Klimawandel und Bevölkerungswachstum in bereits überdurchschnittlich warmen Zentren sorgt für eine zunehmende Hitzeexposition. Die Großzahl der Menschen, die in Zukunft Hitzewellen ausgesetzt sein wird, wird in Großstädten leben.

In Berlin wird ein Bevölkerungswachstum von etwa 5% bis 2040 prognostiziert. Dabei nimmt vor allem die Altersgruppe der 65- bis 80-Jährigen zu. Das Durchschnittsalter wird von 42,9 im Jahr 2021 auf 43,2 im Jahr 2040 steigen. Diese Entwicklung ist im Hinblick auf die Zunahme von Hitzetagen durch den Klimawandel besonders besorgniserregend, da besonders ältere Bevölkerungsgruppen von Hitzestress betroffen sind.

Das städtische Bevölkerungswachstum führt zu einer steigenden Nachfrage nach Wohn- und Nutzraum. Um dieser Nachfrage gerecht zu werden, muss entweder neuer Wohnraum erschlossen oder nachverdichtet werden. Nachverdichtung beschreibt die Nutzung freistehender Flächen, um vorhandene Baulücken zu schließen. Techniken der Nachverdichtung sind zum Beispiel die Aufstockung von Häusern, das Schließen von Baulücken oder auch die Hinterhofbebauung. Dieser Bericht widmet sich der Frage, wie eine Nachverdichtung unter verschiedenen Nachhaltigkeitsfaktoren bewertet werden kann und inwieweit man bei der Planung Fragen der Klimawandelanpassung mit einbeziehen kann.

Modellierung von Hitzestress in Berlin/Brandenburg

Wir haben die UrbClim (De Ridder et al., 2015) und HiREx (Souverijns et al., 2023) Modelle genutzt, um aktuelle und zukünftige Entwicklungen verschiedener Indikatoren im Bereich

Berlin/Brandenburg darzustellen. Eine Liste aller Indikatoren kann im Anhang eingesehen werden. Die Ergebnisse können nach dem nächsten Update auch über das PROVIDE Climate Risk Dashboard abgerufen werden. Die beiden Modelle wurden dafür entwickelt, schnelle und akkurate, hoch-aufgelöste, meteorologische und klimatologische Informationen auf Stadtniveau zu erhalten. Dabei berufen sie sich auf detaillierte Flächennutzungsinformationen von Stadtverwaltungen und deren GIS-Portalen, um die Flächennutzung Berlins zu beschreiben.

Das UrbClim Model wurde benutzt, um klimatologische Informationen zu einer Reihe von Temperatur- und Hitzestress-Indikatoren für eine 50x50km große Fläche der Region Berlin/Brandenburg mit einer Auflösung von 30x30 Metern zu erhalten. Mit dem HiREx Modell können detaillierte Informationen mit einer Auflösung von 1x1 Metern erstellt werden. Diese hochaufgelösten Informationen wurden für Hitzestress an typischen wolkenlosen Sommertagen für das Stadtzentrum Berlins sowie für die Gegend um die Greifswalder Straße erstellt. Die Greifswalder Straße ist ein aktuelles Nachverdichtungsprojekt des Bezirks Pankow. Detaillierte Nachverdichtungsoptionen wurden für den alten Güterbahnhof an der Greifswalder Straße entwickelt und die Anpassungskapazitäten an Hitzestress der verschiedenen Optionen untersucht.

Aktuelle Situation von Hitzestress in Berlin/Brandenburg an Sommertagen

Die Verwandlung von natürlicher Vegetation in urbane Strukturen und versiegelte Oberflächen führt zu höheren gefühlten Temperaturen und Hitzespeicherung. Sonneneinstrahlung wird von menschengemachten Strukturen besser absorbiert und führt zu einer zusätzlichen Hitzequelle in Städten. Dies ist gut zu erkennen, wenn man die Hitzeinsel-Intensität (Urban heat island intensity, UHI) aufzeichnet, wie in Abbildung 2 für Berlin gezeigt. Die Hitzeinsel-Intensität ist der Temperaturunterschied zwischen einem Stadtgebiet und einer umliegenden ländlichen Gegend. Im Stadtgebiet werden im Vergleich zum Umland höhere Temperaturen aufgezeichnet, sowohl tagsüber als auch nachts. Dabei ist der Unterschied nachts besonders deutlich, da dann die gespeicherte Sonnenenergie wieder freigegeben wird. Auch innerhalb der Stadt lassen sich Unterschiede in der UHI erkennen. Bereiche mit höheren Vegetationsanteilen und Parks bieten Wärmeschutz und erhitzen sich um einige Grad weniger als umliegende versiegelte Flächen.

Städtischer Wärmeinseleffekt in Berlin

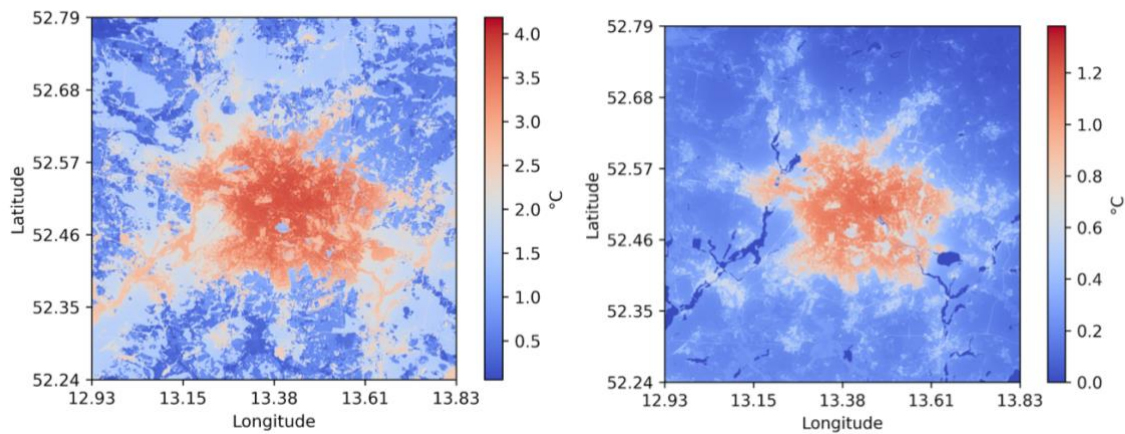


Abbildung 2 Städtischer Wärmeinseleffekt bei Nacht (links) und bei Tag (rechts). Sowohl tagsüber als auch nachts sind die Temperaturen in der Stadt höher als in der ländlichen Umgebung. Nachts ist der Temperaturunterschied am größten, da die ländliche Vegetation während der Nacht effizienter abkühlt als versiegelte Flächen in der Stadt.

Der starke Zusammenhang zwischen der Bodenversiegelung (und dem damit verbundenen Mangel an Vegetation) und der Hitzeinsel-Intensität zeigt sich auch, wenn die Beziehung zwischen den beiden Parametern dargestellt wird (Abbildung 3). Dabei wird klar, dass in Gebieten, in denen keine oder nur sehr wenig Vegetation vorhanden ist, die höchsten Temperaturen herrschen.

Bodenversiegelung un Wärmeinsel-Intensität

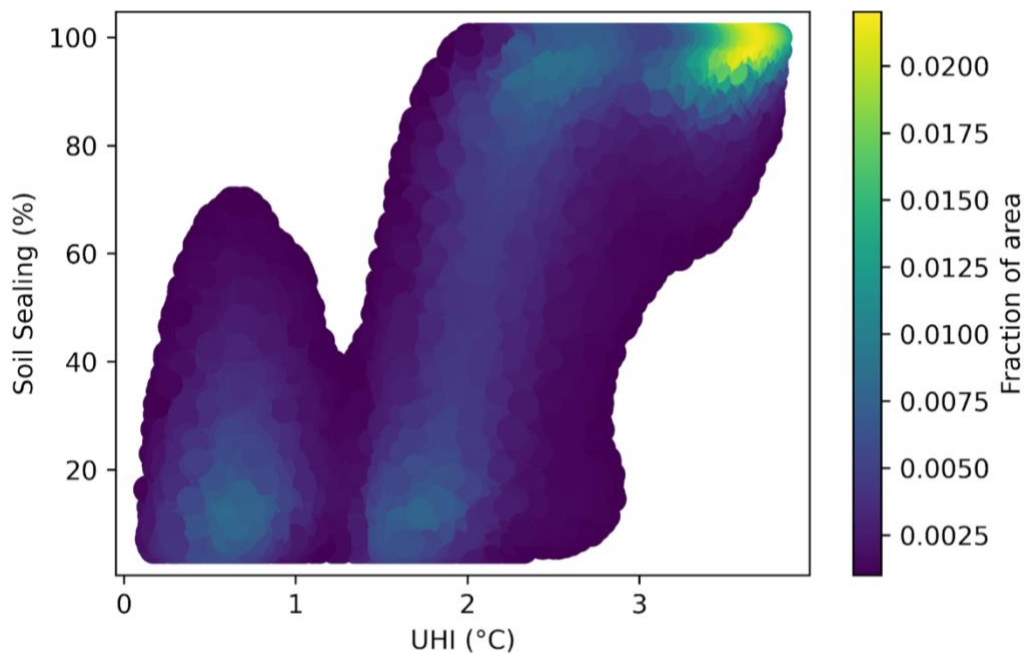


Abbildung 3 Zusammenhang zwischen Bodenversiegelung/mangelnder Vegetationsdichte in Prozent und der Intensität der nächtlichen Wärmeinsel in Berlin. Die Farben geben den Anteil

der Flächen innerhalb der Stadt dar, die dem Versiegelungs-UHI Zusammenhang entsprechen.

Betrachtet man die detaillierten 1-m-Ergebnisse des HiREx-Modells, die sich auf Hitzestress konzentrieren, lassen sich ähnliche Schlussfolgerungen ziehen. Einzelne Straßen, Gebäude und sogar Bäume werden in dieser hohen räumlichen Auflösung berücksichtigt. Es wurden zwei kontrastierende Gebiete ausgewählt. Zum einen der Alexanderplatz (Abbildung 4), ein Gebiet mit geringer Vegetation und einem hohen Anteil an versiegelten Flächen. Zum anderen Schmargendorf (Abbildung 5), ein Wohngebiet am Stadtrand von Berlin, mit einem hohen Anteil an zusammenhängender Vegetation. Die positiven Auswirkungen von Vegetation, insbesondere von Bäumen, auf die Reduktion von Hitzestress sind deutlich zu erkennen. Bäume haben eine große kühlende Wirkung, deren Effektivität stark von der Größe der Baumkrone, ihrer Höhe und dem Vorhandensein anderer Bäume in der Umgebung abhängt. Größere, ältere Bäume mit zusammenhängenden Baumkronen haben ein größeres Kühlpotenzial als einzelne kleinere Bäume. Dieser Effekt ist in Schmargendorf deutlich zu beobachten, wo der westliche Teil mehr zusammenhängende Bäume aufweist, die den Hitzestress effizienter verringern als der östliche Teil, wo die Bäume kleiner sind. Große offene versiegelte Flächen sind besonders anfällig für Hitzestress, da der Mensch nicht nur direkt von der Sonneneinstrahlung, sondern auch von der Streustrahlung oder der von Straßen, Gebäuden und anderen versiegelten Flächen ausgehenden Strahlung betroffen ist. Auf diesen Flächen kommt es zu hohem Hitzestress. Dies lässt sich am Alexanderplatz deutlich beobachten.

Hitzestress in der Metropolregion Berlin

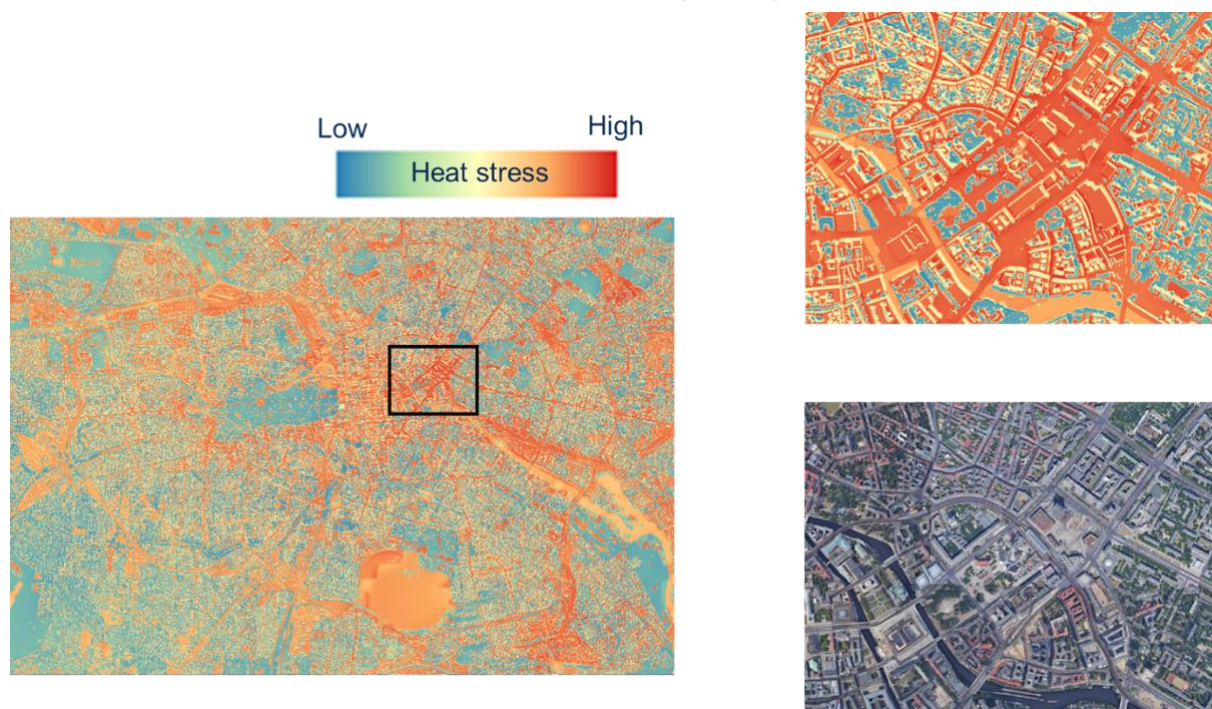


Abbildung 4 Der Ausschnitt zeigt das Gebiet um den Alexanderplatz. Das Gebiet besteht aus einer hohen Dichte an Gebäuden und versiegelten Freiflächen.

Hitzestress in der Metropolregion Berlin

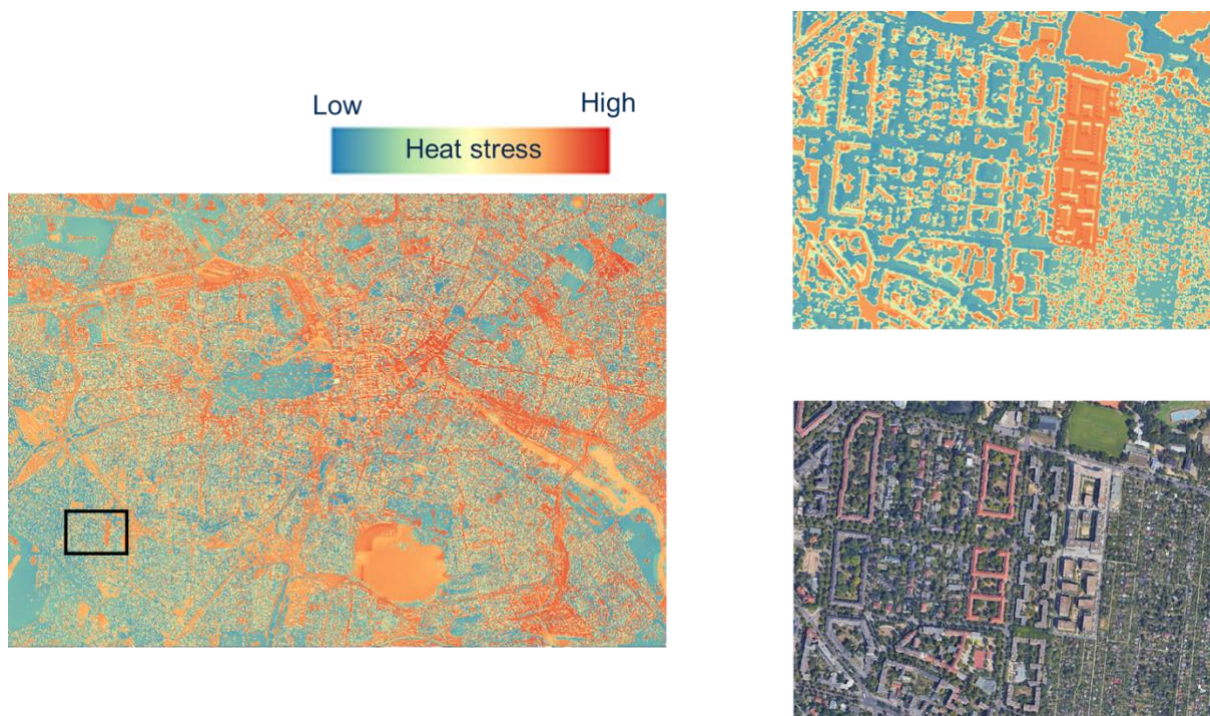


Abbildung 5 Der Ausschnitt zeigt das Gebiet um Schmargendorf. Das ländliche Gebiet weist eine hohe Dichte an großen und hohen Bäumen auf, die Verdunstungskälte und Schatten spenden, was zu einem starken Rückgang der Hitzebelastung führt. Die wenigen offenen Flächen mit geringer Vegetation treten als Hotspots für Hitzestress auf.

Des Weiteren haben wir uns die Gegend um den Greifswalder Güterbahnhof in hoher Auflösung angeschaut. In der Umgebung sind viele der historischen Bebauungsarten Berlins zu finden. Somit erlaubt ein detaillierter Blick auf die Gegend Rückschlüsse auf die Hitzeresistenz der verschiedenen Bebauungsarten zu schließen.

Abbildung 6 zeigt das untersuchte Gebiet. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass sich versiegelte Oberflächen am stärksten erhitzen (1) und das Grünflächen mit viele Bäumen Kühlung bieten (2). Grasflächen (3) erhitzen sich ebenfalls. Zuletzt lässt diese Darstellung gut erkennen, dass eher Ost-West ausgerichtete Straßen deutlich mehr erhitzen als Nord-Süd ausgerichtete Straßen (4). Dies lässt sich auf die ganztägige Sonneneinstrahlung zurückführen, da hier zu keinem Zeitpunkt schattenspendende Gebäude die Einstrahlung unterbrechen.

Hitzestress in Berlin



Abbildung 6 Das Gebiet um den Greifswalder Güterbahnhof an dem heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.

Bezeichnende Bebauungsformen für Berlin

Die typische Blockbebauung aus der Gründerzeit mit Hinterhofbebauung zeigt eine geringe Hitzeentwicklung. Die hohe Bebauungsdichte und Versiegelung wird ausgeglichen durch ein hohes Vorkommen von Bäumen und dem Schatten, der durch die dichte Bebauung gespendet wird. In dieser Abbildung können Hitze-Hotspots an Straßen und offenen Geländen ohne Bäume gefunden werden. Diese offenen Gelände sind hauptsächlich Spielplätze und Schulhöfe.

Dicht bebaute historische Häuserblöcke



Abbildung 7 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.

Moderne rationale Bebauungsformen wie in Abbildung 8 profitieren von Bäumen in den großen Innenhöfen. Allerdings weniger an den Süd- und Westseiten der Gebäude. Generell profitiert diese Bebauung von einer Nord-Süd Ausrichtung. Offene Flächen ohne Schatten sowie versiegelte Flächen sind auch hier Hitze-Hotspots.

Moderne rationale Bebauung



Abbildung 8 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.

Abbildung 9 zeigt ein Gebiet mit großen Wohnanlagen. In diesem Fall haben die vielen Bäume einen Kühlungseffekt, wodurch das Gebiet geringer Hitzebelastung ausgesetzt ist. Fassaden und Dächer die in Richtung Süden oder Westen ausgerichtet sind haben

eine höhere Hitzebelastung. Grünflächen ohne Bäume schneiden sehr schlecht ab und stellen gemeinsam mit Straßen und Parkplätzen einen Hitze-Hotspot dar.

Große Wohnanlagen

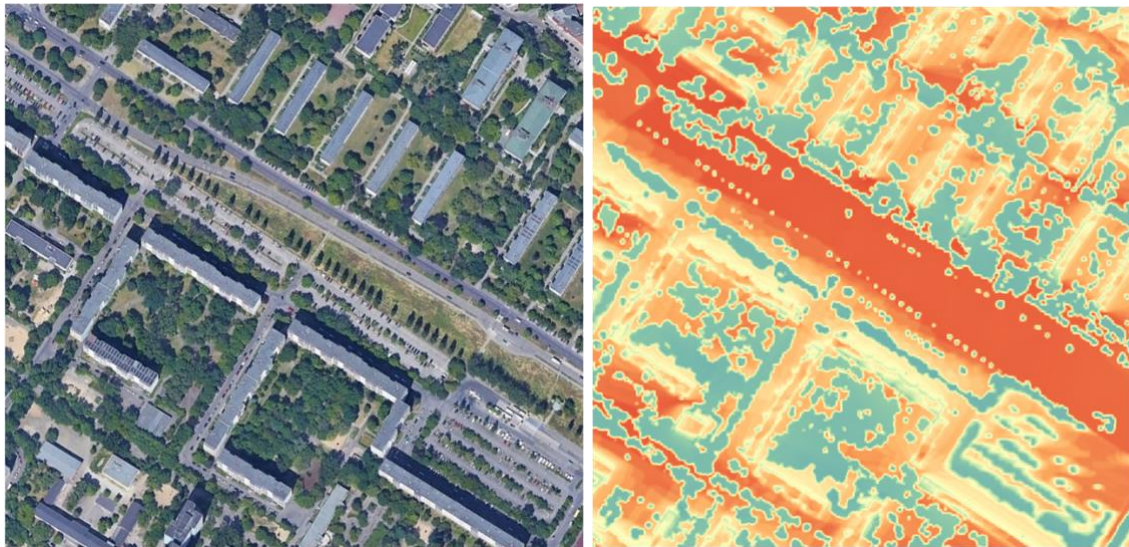


Abbildung 9 Satellitenabbildung (links), Hitzebelastung am heißesten Moment eines exemplarischen Sommertages.

Vorstellung der Modellresultate für drei Zukunftsszenarien

In dieser Studie haben wir neben der Analyse der gegenwärtigen Situation mehrere Simulationen durchgeführt. Eine Reihe von Indikatoren wurden bei einer räumlichen Auflösung von 30 Metern für ein 50x50km großes Gebiet in Berlin und Brandenburg berechnet, die Informationen über die gegenwärtige und künftige Temperaturentwicklung (z. B. die jährliche Anzahl der Tage mit Temperaturen über 30 °C), den Energieverbrauch (z. B. die für die Kühlung benötigte Energiemenge), die Gesundheitsrisiken (z. B. die Anzahl der Tage mit hoher Hitzebelastung) und die wirtschaftlichen Verluste (z. B. die Anzahl der durch Hitzestress verlorenen Arbeitsstunden) liefern (eine detaillierte Liste der Indikatoren ist im Anhang zu finden). Die Entwicklung dieser Indikatoren wird bis zum Ende dieses Jahrhunderts für drei verschiedene Zukunftsszenarien berechnet (Abbildung 10):

- Aktuelle Politiken (Current Policy): Dieser Pfad untersucht die Folgen einer Fortsetzung der 2020 eingeführten Klimapolitik, die bis zum Jahr 2100 nur geringfügig verstärkt wird.
- Verzögertes Handeln: Die Dekarbonisierung wird ernsthaft auf die 2030er Jahre verschoben, wenn die Energienachfrage reduziert und der Übergang zu erneuerbaren Energien beschleunigt wird. Erneuerbare Energien verdrängen niemals die gesamte Nutzung fossiler Brennstoffe - Kohlendioxid wird stattdessen aus der Luft gefangen und gespeichert.
- 1,5°C Erwärmung: Die globale Erwärmung wird auf 1,5 °C begrenzt und erreicht ihren Höhepunkt im Jahr 2040, wie auf der Klimakonferenz in Paris vereinbart, wonach ein stetiger Temperaturrückgang vorgesehen ist.

Zukunftsszenarien

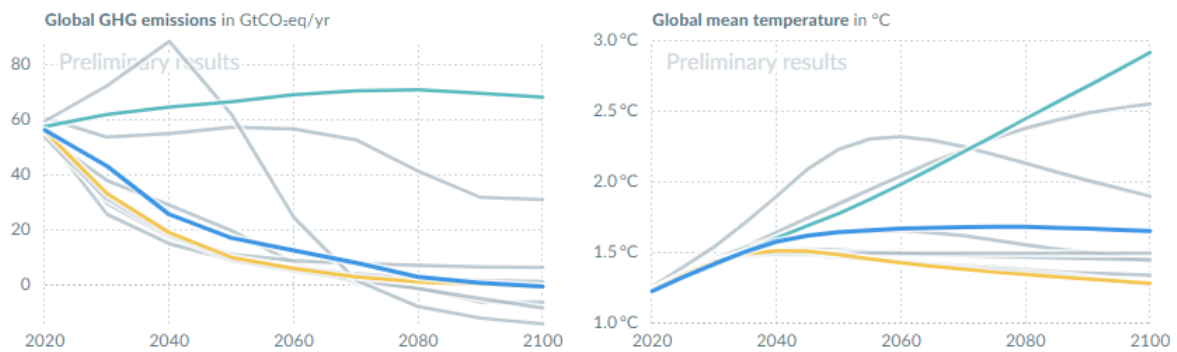


Abbildung 10 Die drei zukünftigen Emissionsszenarien, die in dieser Studie bearbeitet werden. Grün: Aktuelle Politiken; Blau: Verzögertes Handeln; Gelb: 1,5°C Erwärmung

Für jeden der Indikatoren werden Karten mit einer Auflösung von 30 Metern zur Verfügung gestellt, die den derzeitigen Zustand, definiert als den Mittelwert des letzten Jahrzehnts (2011-2020) zeigt, zusammen mit einer grafischen Darstellung der zeitlichen Entwicklung in der Zukunft für die verschiedenen Szenarien. Abbildung 11 zeigt die Anzahl der Tage pro Jahr, an denen tropische Nächte auftreten (Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 20°C fällt). Während die Zahl der Tropennächte in der Berliner Innenstadt derzeit auf etwa 15 pro Jahr begrenzt ist, könnte diese Zahl bis Mitte des Jahrhunderts im Szenario "Aktuelle Politik" auf mehr als 30 Nächte ansteigen. Die größten Auswirkungen werden für das Ende des Jahrhunderts erwartet, wo starke Abweichungen zwischen den verschiedenen Szenarien festzustellen sind. Diese Zahlen zeigen, wie wichtig eine rasche Dekarbonisierung bei gleichzeitiger Anpassung ist, um die schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels auf die Berliner Bevölkerung zu vermeiden.

Tropennächte in Berlin/Brandenburg

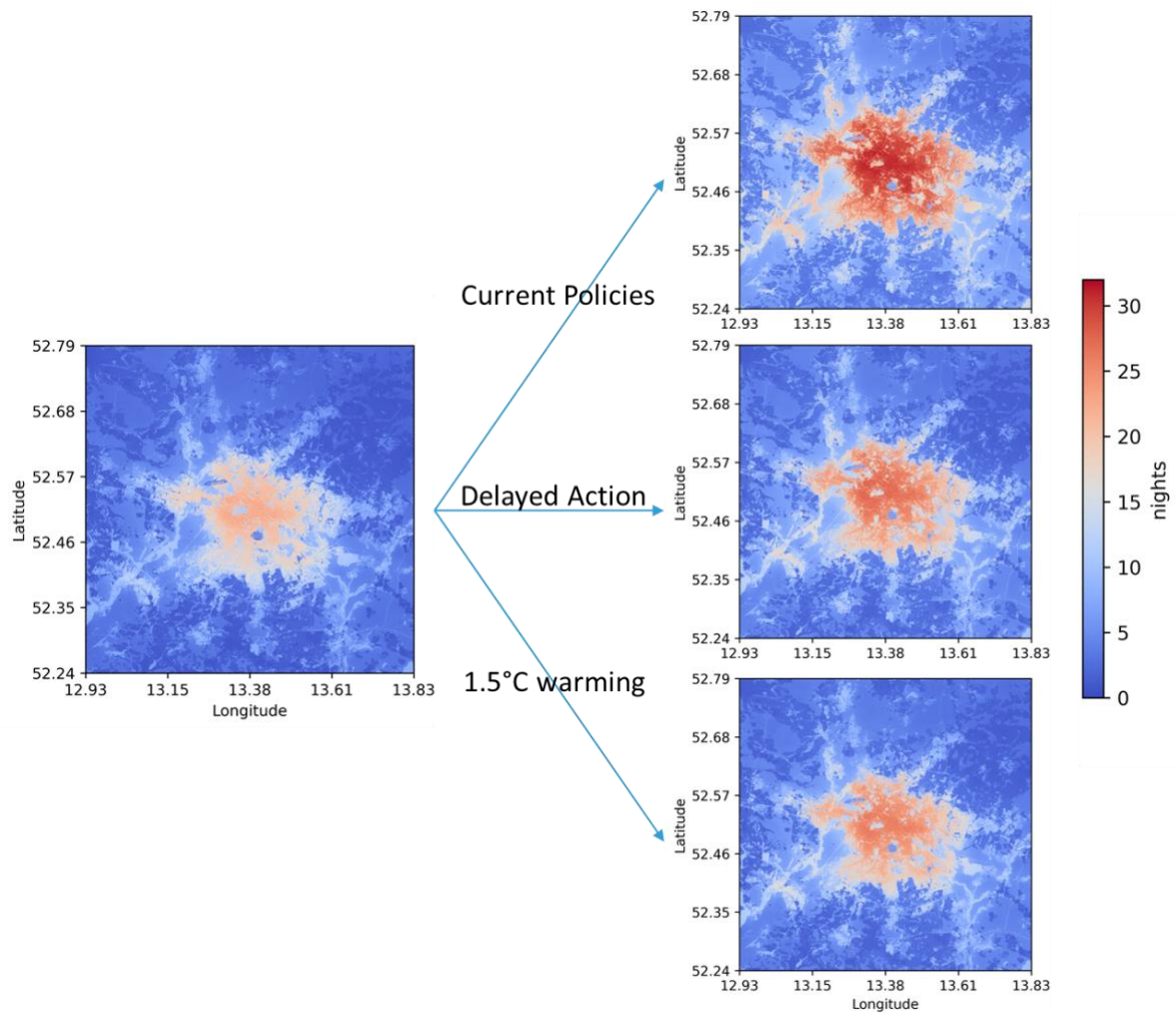


Abbildung 11 Durchschnittliche Anzahl der Nächte pro Jahr, in denen die Temperaturen nicht unter 20°C fallen (d.h. tropische Nächte). (links) Gegenwart, (rechts) Mitte des Jahrhunderts (2050) für drei verschiedene Szenarien (siehe oben). Die Stadt erweist sich aufgrund des hohen Anteils an bebauten und versiegelten Flächen als ein Hotspot für tropische Nächte. Gebiete mit einem hohen Anteil an Vegetation sind im Allgemeinen kühler.

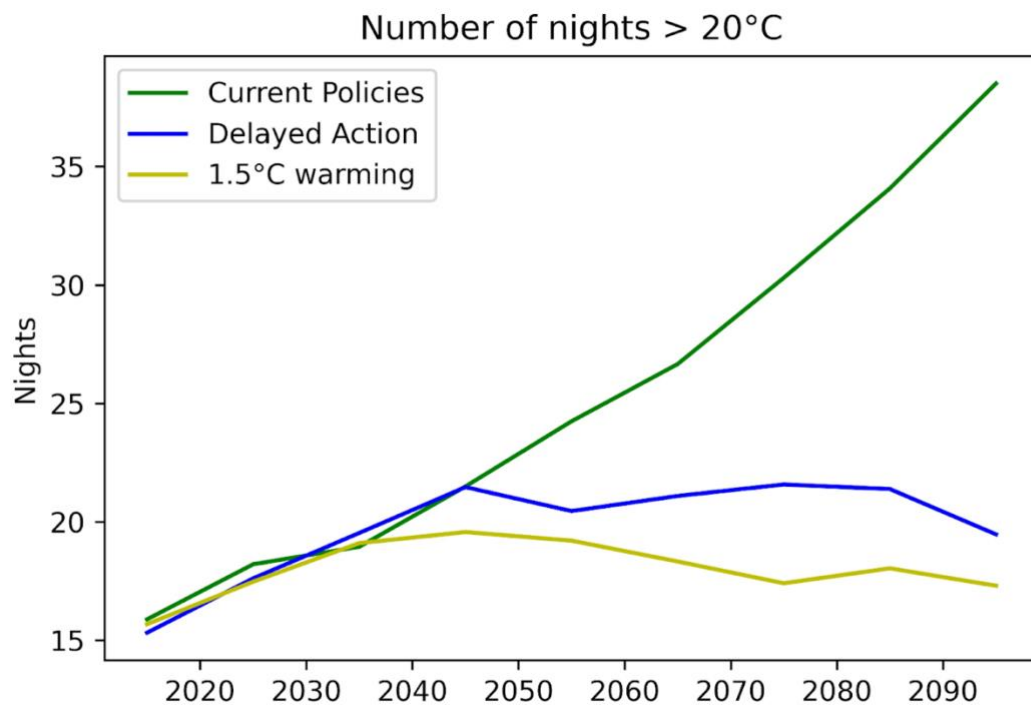


Abbildung 12 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Anzahl von Nächten mit Temperaturen über 20°C im Durchschnitt des Berliner Stadtgebiets.

Die Ergebnisse für alle Indikatoren (im Anhang aufgelistet), ihre dekadischen Karten und die zeitliche Entwicklung im Laufe der Zeit, wie oben dargestellt, können auf Nachfrage zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus wird das PROVIDE-Dashboard all diese Ergebnisse in einer benutzerfreundlichen und einfachen Art und Weise visualisieren, so dass sie von den Nutzern verwendet, angepasst und frei zugänglich heruntergeladen werden können.

Vorstellung der Anpassungsoptionen am Beispiel Greifswalder Straße

Für ein konkretes Stadtentwicklungsprojekt an der Greifswalder Straße wurden verschiedene Bausoptionen erstellt und diese auf ihre Resilienz gegen zunehmenden Hitzestress analysiert.

Denn die Planung von Siedlungen und Infrastruktur, sowie deren Gestaltung und Instandhaltung sind entscheidend für Vulnerabilität und Resilienz gegenüber Klimawandelauswirkungen. Energieintensive und profitorientierte Urbanisierung können Städte besonders anfällig für die Auswirkungen der Klimakrise machen und schaffen eine hohe Kohlenstoffabhängigkeit. Die Anpassungsfähigkeit von Städten kann dagegen durch integrierte Planungsstrategien gesteigert werden, die Innovationen mit Investitionen in sozial-ökologische Projekte und physikalische Infrastruktur kombinieren. Diese Form der Stadtplanung ist wichtig für eine klimaresiliente

Entwicklung und setzt neben den derzeit vorherrschenden physischen Infrastrukturansätzen auch naturbasierte Lösungen und soziale Interventionen ein.

Am alten Güterbahnhof der Greifswalder Straße sollen neue Wohn- und Nutzräume, sowie eine Schule, Sportplätze und ein öffentlicher Platz entstehen. Vorläufige Pläne des Stadtentwicklungsamtes sehen eine Entstehung von neuen Gebäudeflächen von 40-45000 Quadratmetern, mit einer Gebäudehöhe von maximal 19 Stockwerken vor. Für die Schule wird von einem Flächenbedarf von 1,5 bis 1,7 ha Flächenbedarf nach dem Musterfreiflächenprogramm der Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie ausgegangen. Die Lage des untersuchten Gebietes wird in Abbildung 13 gezeigt.

Untersuchungsgebiet



Abbildung 13 Lage der Untersuchungsgegend an der Greifswalderstraße

Die Analyse mit einer räumlichen Auflösung von 1 m unter Verwendung des HiREX-Modells für das Berliner Stadtzentrum ermöglicht eine detaillierte Betrachtung der gegenwärtigen Hitzestress-Situation für den in dieser Studie betrachteten Bereich. Das Gebiet ist derzeit durch hohe Hitzestresswerte in der Nähe der Bahngleise und aufgrund des hohen Anteils an versiegelte Freiflächen wie den Parkplatzflächen im südwestlichen Teil der Untersuchungsgegend gekennzeichnet (Abbildung 14). Zwischen den Gebäuden gibt es einige größere Vegetationsflächen, die sich als Gebiete mit geringer Hitzebelastung erweisen. Außerdem spenden hohe Gebäude Schatten, der für eine gewisse Abkühlung sorgt. Dennoch ist das betrachtete Gebiet derzeit nicht bebaut, und die Mischung aus versiegelten Freiflächen und Baumbeständen führt zu Gebieten mit sehr hohem bzw. niedrigem Hitzestress.

Hitzebelastung im Untersuchungsgebiet

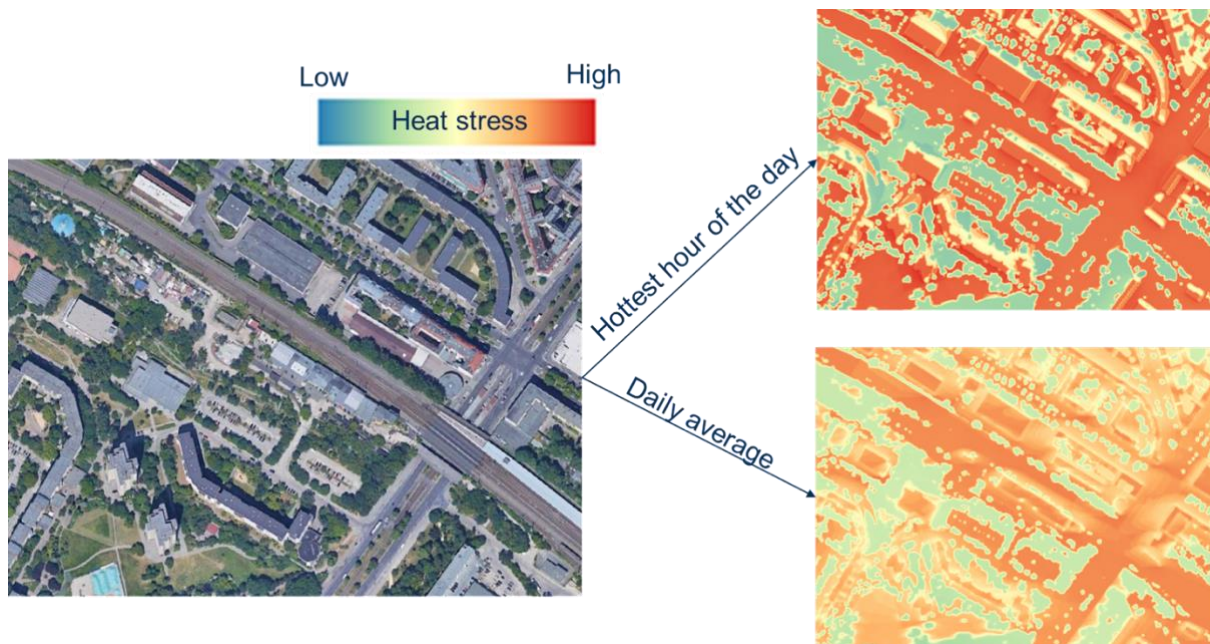


Abbildung 14 Visualisierung der gegenwärtigen Hitzebelastung für den Analysebereich an einem typischen Sommertag mit klarem Himmel. Dargestellt sind die Hitzebelastung während der heißesten Stunden des Tages (oben) und der 24-Stunden-Tagesdurchschnitt (unten).

Szenario 1

Das erste Szenario basiert auf den Vorschlägen, die von den bisher am Prozess beteiligten Akteuren bereits gemacht wurden. Der Hauptgedanke ist, so kompakt wie möglich zu bauen und die Entwicklung auf zwei offene Hauptblöcke zu konzentrieren: der südwestliche umfasst die neue Schule (vier- und fünfgeschossige Gebäude), während der südöstliche die gemischte Bebauung mit einer Bruttogeschossfläche zwischen 40.000 und 45.000 Quadratmetern (9- bis 16-geschossige Gebäude) darstellt. Zur Greifswalder Straße hin umrahmen die neuen Gebäude einen öffentlichen Raum mit Süd-Ost-Ausrichtung.

In diesem Szenario kann der Veranstaltungsort "Von Greifswald" (langgestreckter Baukörper zur Bahn hin) beibehalten werden, was für die Stärkung der historischen Identität sorgt. Die Verbindung zur Greifswalder Straße bleibt jedoch im Wesentlichen eine schmale Passage, die einen Biotopverbundqualitative Grünverbindung vermutlich nicht gewährleisten kann.¹ Zudem sind die Abstände zwischen den Gebäuden nicht sehr groß, so dass nur wenig Platz für Grünflächen und Bäume bleibt.

¹ Eine detaillierte Prüfung der ökologischen Auswirkungen war nicht Teil dieser Studie. Für die abschließende Klärung, ob die Passage den Biotopverbund ermöglicht, müssten entsprechende Daten ausgewertet werden.

Szenario 1



Abbildung 15 Szenario 1 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße

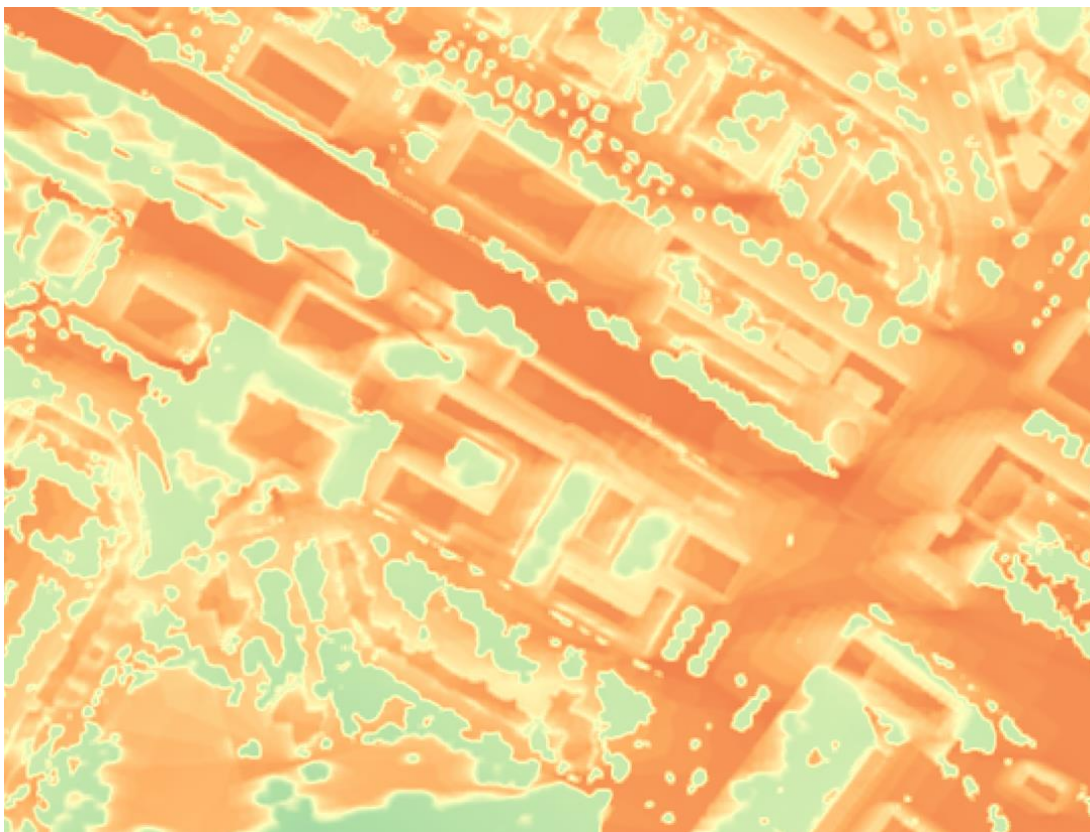


Abbildung 16 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die erste vorgeschlagene Konstruktion

In diesem Szenario sind die Gebäude in offener Bauweise errichtet, mit Platz zwischen den Gebäuden für Gras, Wege und einige Baumgruppen. Die erste Beobachtung, die wir machen können, ist, dass die südwestlichen Teile der Gebäude den größten Hitzestress erfahren (Abbildung 16). Diese Bereiche erhalten die stärkste Sonneneinstrahlung und heizen sich nachmittags am stärksten auf, so dass auch hier der Hitzestress am größten ist. Eine gute Maßnahme zur Anpassung an die Hitze ist die Platzierung großer Bäume im Südwesten dieser Gebäude, da sie Schatten spenden und für Verdunstungskälte

sorgen. Dies ist im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets tatsächlich der Fall. Darüber hinaus bieten einzelne Bäume nur eine begrenzte Kühlung. Daher ist es wichtig, große Flächen mit ausgewachsenen Bäumen zu schaffen (in unserer Simulation wird eine Mindestbaumhöhe von 12 m verwendet), um eine wirksame Kühlung zu gewährleisten. Trotzdem ist ein großer Teil des Untersuchungsgebiets immer noch relativ starkem Hitzestress ausgesetzt, was vor allem auf die großen noch vorhandenen Freiflächen zurückzuführen ist.

Szenario 2

Dieses Szenario zielt darauf ab, die Grünverbindungen zu verbessern und gleichzeitig innerhalb der vorgegebenen Parameter zu arbeiten. Zu diesem Zweck wurden die Schulgebäude nach Nordosten ausgerichtet und mit dem Grünkorridor verbunden. Darüber hinaus wurde die Grundfläche der gemischt genutzten Bebauung durch eine Erhöhung der Gebäude (17- bis 19-stöckige Gebäude) verringert. Obwohl in diesem Szenario die Kohärenz des bebauten Raums weniger sichtbar ist, wird die Qualität des Freiraums erheblich gesteigert.

Szenario 2



Abbildung 17 Szenario 2 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße

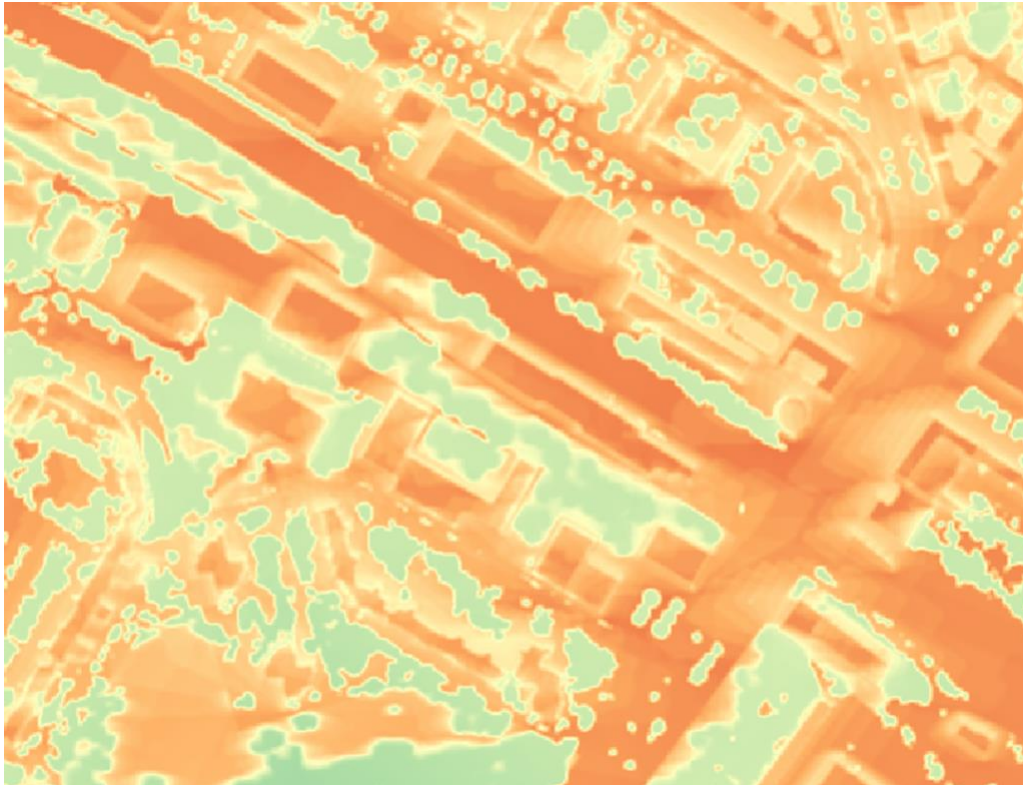


Abbildung 18 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die zweite vorgeschlagene Konstruktion

In diesem zweiten Entwurf ist ein großer zusammenhängender Bereich mit Bäumen zwischen den Gebäuden im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets vorhanden. Dadurch wird der Hitzestress in der Nachbarschaft und in den umliegenden Gebäuden deutlich verringert. Außerdem ist die Grundfläche der Gebäude bei diesem Entwurf kleiner, da die Gebäude mit einer höheren Anzahl von Stockwerken gebaut werden. Höhere Gebäude werfen größere Schatten, was zu einer zusätzlichen Kühlung führt. Wenn sie zudem von einer großen Anzahl von Bäumen umgeben sind (wie im östlichen Teil des betreffenden Gebiets), kann eine effiziente Kühlung erreicht werden.

Szenario 3

Das dritte Szenario zielt darauf ab, sowohl den bebauten als auch den offenen Raum zu optimieren und eine ausgewogene und gut integrierte Entwicklung zu erreichen. Um dies zu erreichen, wurde der Veranstaltungsort "Von Greifswald" durch zwei langgestreckte Gebäude ersetzt, die zur Bahn hin auch die Rolle einer Lärmschutzwand einnehmen. Die Sporthalle sowie ein dritter langgestreckter Baukörper vervollständigen die Kohärenz des linearen Ensembles. Während die Schulform gegenüber Szenario 2 unverändert bleibt, nimmt das Gebäudeensemble zur Greifswalder Straße hin in der Höhe ab (7- bis 9-geschossige Gebäude) und ist nun mit der Höhe der umgebenden Bebauung vergleichbar. Ein großzügiger Grünzug durchzieht das Areal und bietet ausreichend Platz für großflächige Baumbestände, die sowohl die Artenvielfalt als auch

die ökologische Durchgängigkeit gewährleisten (Richtung Park am Planetarium und Ernst-Thälmann-Park).²

Szenario 3



Abbildung 19 Szenario 3 der vorgeschlagenen Umgestaltung der Greifswalderstraße

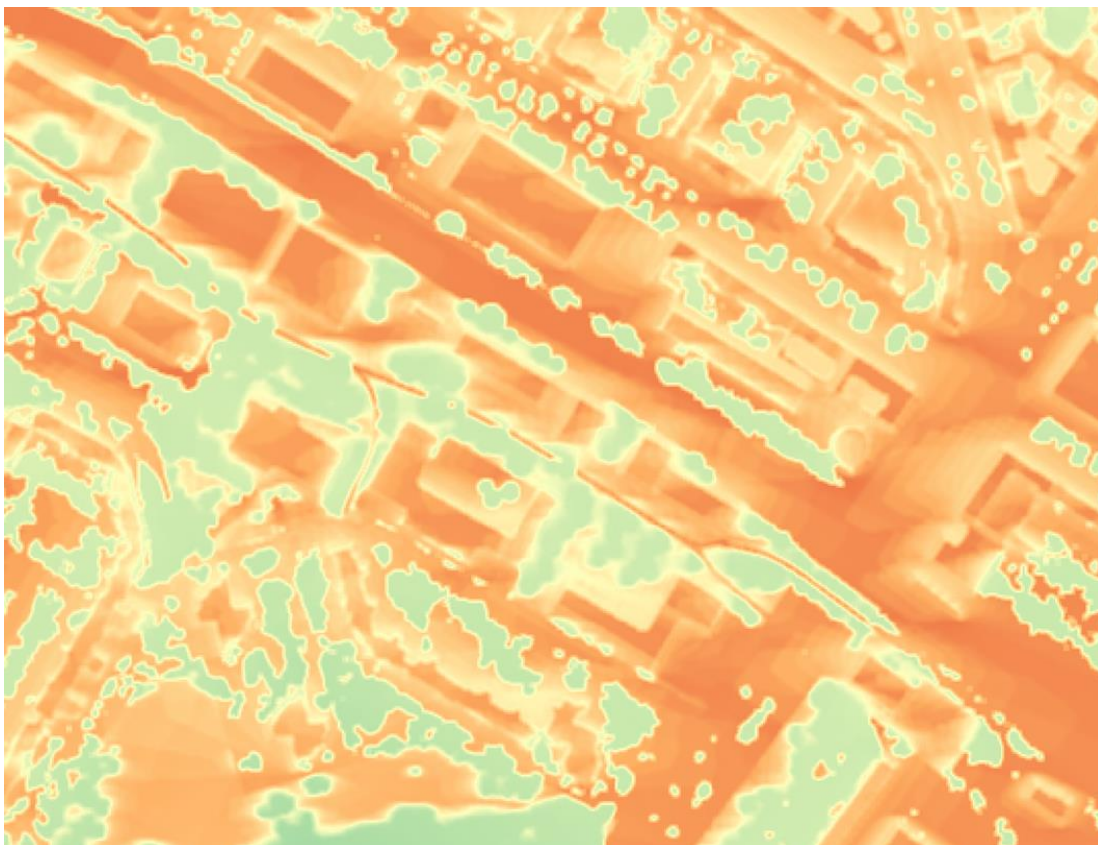


Abbildung 20 Durchschnittliche Wärmebelastung auf die dritte vorgeschlagene Konstruktion

² Siehe Fußnote 1: Eine detaillierte Prüfung der ökologischen Auswirkungen müsste noch erfolgen.

Der letzte Entwurf bietet die effizienteste Kühlung. In diesem Szenario gibt es eine große Anzahl von Freiflächen zwischen den Gebäuden, die jedoch dazu genutzt werden, einen grünen Korridor zwischen den Gebäuden zu schaffen, der es den Menschen ermöglicht, von einem Teil des Untersuchungsgebiets zum anderen zu gehen, ohne einer großen Menge an direktem Sonnenlicht ausgesetzt zu sein. Die vielen großen Baumflächen wirken sich positiv auf die Verringerung der Hitzebelastung aus. Es muss noch einmal betont werden, dass es wichtig ist, dass die Bäume eine ausreichende Höhe haben und die Baumkronen groß genug und miteinander verbunden sind, um genügend Schatten zu spenden und Verdunstungskälte zu erzeugen.

Vergleich der Szenarien mit Blick auf Nachhaltigkeitskriterien

In dieser Studie untersuchen wir den Einfluss von drei verschiedenen Gebäudeausrichtungen auf die lokale Wärmebelastung, als Input für die neue Entwicklung des Greifswalder Güterbahnhofsgeländes. Wie oben beschrieben, lässt sich aus der Modellierung ableiten, dass durchgehende Grünflächen mit großen Baumgruppen in Kombination mit einer reduzierten Grundfläche der Gebäude selbst die geringste Wärmebelastung gewährleisten. Dies ist in den beiden Szenarien 2 und 3 deutlich zu erkennen.

Zum Abschluss dieser Untersuchung wollen wir jedoch auch einen Schritt zurückgehen und das Gesamtbild betrachten. Hitzestress ist ein wichtiges Thema in unseren Städten und wird in Zukunft immer wichtiger werden, aber es ist nicht der einzige Aspekt, der betrachtet werden muss, wenn wir bewerten wollen, wie nachhaltig ein Bebauungsvorschlag ist. Es gibt noch viele andere Kriterien, die über die Wohnqualität, die Machbarkeit und die Attraktivität eines neuen Wohnumfeldes entscheiden. Einige dieser Kriterien möchten wir abschließend aufzählen.

Wir stützen uns auf den Sweco Sustainability Compass (Abbildung 21), ein Bewertungsinstrument für die Nachhaltigkeit von technischen und räumlichen Veränderungsprozessen, das sich an ähnlichen Instrumenten wie der DGNB-Zertifizierung in Deutschland oder dem BREEAM-Standard orientiert. Der Nachhaltigkeitskompass beschreibt die Auswirkungen eines Projekts auf den Planeten, die Menschen und den Wohlstand und bewertet gleichzeitig die technische, räumliche und prozessbezogene Qualität dieses Projekts. Im Rahmen und Budget dieser Untersuchung war es nicht möglich, eine vollständige Analyse durchzuführen, aber es wurde beschlossen, eine Reihe von Schlüsselaspekten qualitativ zu bewerten.

Sweco Nachhaltigkeits-Kompass

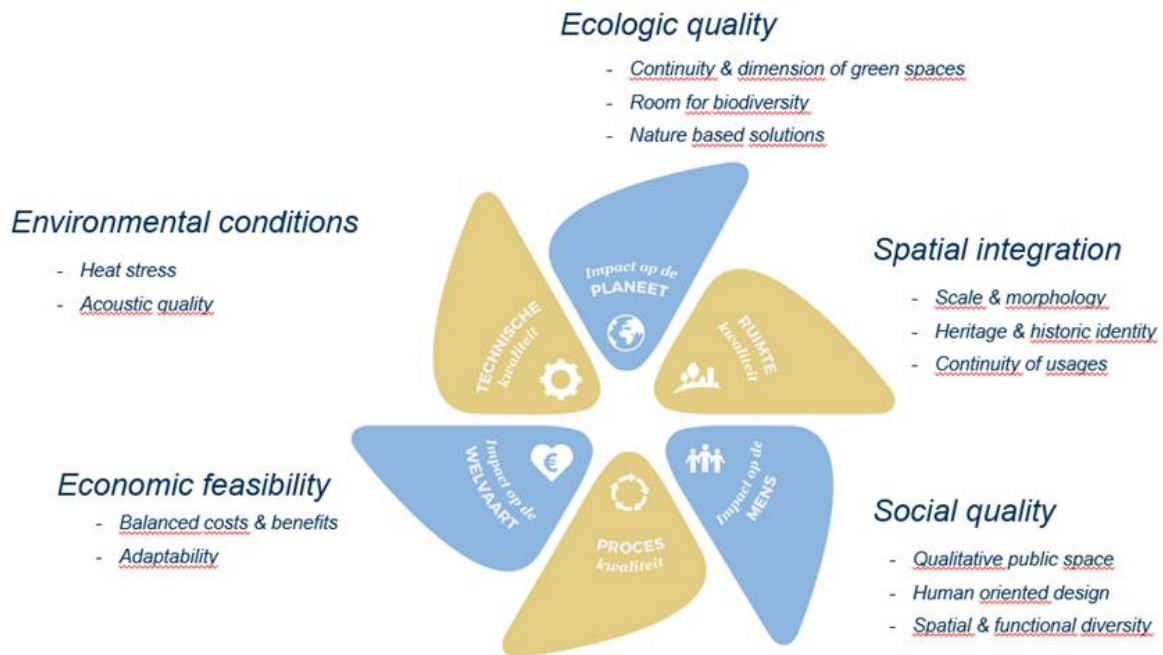


Abbildung 21 Der Sweco Sustainability Compass, ein Bewertungsinstrument für die Nachhaltigkeit von technischen und räumlichen Veränderungsprozessen. Zur Bewertung werden verschiedene Indikatoren der Kategorien Umweltbedingungen (Environmental conditions), Ökologische Qualität (Ecological quality), Räumliche Integration (Spatial integration), Soziale Qualität (Social quality), und Wirtschaftliche Machbarkeit (Economic feasibility) in Betracht gezogen.

Diese Schlüsselemente sind:

Umweltbedingungen

Die Umweltmerkmale, die die Qualität des Projekts bestimmen. Hitzestress ist hier ein wichtiger Aspekt, aber auch die akustische Qualität aufgrund der Lage des Projekts in der Nähe der Bahnlinie und in einer relativ lärmintensiven, städtischen Umgebung sollte hier miteinbezogen werden.

In Bezug auf Hitzestress zeigt die Modellierung deutlich, dass die Situation in Szenario 1 ziemlich schlecht ist: Es gibt viele Hitzeinseln und nur sehr punktuelle Abkühlungsmöglichkeiten. In den Szenarien 2 und 3 ist eine deutliche Verbesserung festzustellen, mit einer viel größeren, durch Bäume gekühlten Fläche und einer stärker gebündelten Zone für Gebäude. Szenario 1 schneidet hier schlecht ab, Szenario 2 und 3 gut. Aufgrund der Tatsache, dass in jedem der Szenarien (zwangsläufig) viel befestigte, bebaute Fläche hinzu kommt, erhält kein Szenario die Note "sehr gut".

Für die akustische Qualität ist vor allem die Bahntrasse eine wichtige Quelle der Lärmbelastung. Hier schneidet Szenario 2 besonders negativ ab: viele Neubauten werden in der Nähe der Bahn realisiert, ohne jegliche Form von Puffer. Szenario 1 ist etwas besser, weil hier die Gebäude so angeordnet sind, dass die vordere Reihe eine

Abschirmung für die dahinter liegenden Gebäude bildet. Szenario 3 trägt dem noch besser Rechnung, indem ein echter Lärmpuffer entlang der Bahnlinie geschaffen wird, der dafür sorgt, dass der Rest des Projektgebiets, aber auch der bestehende Stadtteil im Süden, deutlich weniger von der Lärmbelastung durch die Bahnlinie betroffen sein wird. Szenario 2 schneidet hier schlecht, Szenario 1 gut und Szenario 3 sehr gut ab.

Ökologische Qualität

Das Ausmaß, in dem das Projekt eine grüne Umgebung mit hohem ökologischem Wert, einschließlich biologischer Vielfalt und ökologischer Kontinuität, gewährleistet. Dies bedeutet unter anderem eine ausreichende Größe und Kontinuität der Grünflächen, einen ausreichend hohen Biodiversitätsfaktor und die Bevorzugung von naturnahen Lösungen gegenüber technischen Lösungen.

Die ökologische Qualität der Projektvorschläge lässt sich in dieser Phase des Entwurfs vor allem an der Größe und Kontinuität der vorgeschlagenen Grünflächen messen. Hier zeigt sich, dass Szenario 1 mit einer stark fragmentierten Grünstruktur am schlechtesten abschneidet. In Szenario 2 bildet die Grünstruktur ein zusammenhängendes Ganzes, ist aber nur bedingt mit den Grünflächen in der Umgebung verbunden. Szenario 3 berücksichtigt dies ausdrücklich und schafft eine ähnlich zusammenhängende Grünstruktur, die sich jedoch als echter Grünkorridor in Richtung des großen Parks auf der Westseite fortsetzt. Szenario 1 schneidet hier schlecht, Szenario 2 gut und Szenario 3 sehr gut ab.

Soziale Qualität

Das Ausmaß, in dem das Projekt ein Lebensumfeld schafft, das den sozialen Zusammenhalt, die Aufenthaltsqualität und andere soziale Qualitäten fördert. Dazu gehören das Vorhandensein von hochwertigem öffentlichem Raum, die Verwendung von menschengerechtem Design, welches die Bedürfnisse, Einschränkungen und Verhaltensweisen der Nutzer:innen berücksichtigt und die räumliche und funktionale Vielfalt der Umgebung.

Alle Projektvorschläge enthalten einen beträchtlichen Anteil an öffentlichem Raum, und die Entwürfe sind nicht detailliert genug, um ihre konkrete Ausstattung beurteilen zu können. Aber wir können das Potenzial dieser Räume erkunden. In Szenario 1 ist der Freiraum relativ zersplittert, was ein Vorteil sein kann, um Orte mit eigenem Charakter und einer klaren Zielgruppe zu schaffen. Der öffentliche Charakter dieser Räume ist jedoch nur unzureichend gewährleistet: Es handelt sich um Orte, die aufgrund ihres privaten Charakters bald von den Nutzer:innen/Bewohner:innen der angrenzenden Gebäude in Beschlag genommen und somit bis zu einem gewissen Grad "privatisiert" werden. In den Szenarien 2 und 3 ist diese Gefahr viel geringer, weil der Freiraum hier ein Ganzes bildet und wirklich zu einem öffentlichen Park werden kann. Da dieser Raum in Szenario 3 auch perfekt in die umliegenden Parkräume hineinreicht, ist das soziale Potenzial hier noch größer. Szenario 1 schneidet hier also schlecht ab, Szenario 2 gut und Szenario 3 sehr gut.

Räumliche Integration

Die räumliche Integration des Projekts in sein morphologisches und soziokulturelles Umfeld. Dies bedeutet, dass sich das Projekt an den Maßstab und die morphologischen Merkmale der umliegenden Gebäude anpasst, dass das Erbe und die historische Identität eines Ortes berücksichtigt werden und dass das Projekt auch funktional gut integriert ist.

Szenario 1 fügt sich am besten in die Umgebung ein, mit Gebäuden, die den Hochhauscharakter dieses Viertels fortsetzen, ohne die unmittelbar angrenzenden Gebäudehöhen zu überschreiten. Szenario 2 geht mit Gebäudehöhen von bis zu 19 Stockwerken deutlich darüber hinaus, so dass die Integration hier deutlich schwächer ausfällt. Szenario 3 fügt sich in Bezug auf Maßstab und Morphologie recht gut in Szenario 1 ein, aber durch den Abriss des Bestandsgebäudes entlang der Gleise geht hier ein Teil der historischen Identität verloren. Szenario 1 schneidet hier sehr gut, Szenario 2 schlecht und Szenario 3 gut ab.

Wirtschaftliche Machbarkeit

Das Ausmaß, in dem das Projekt die finanzielle Rentabilität berücksichtigt und hinreichend durchführbar ist, um realisiert zu werden. Im Optimalfall bedeutet dies, dass die erwarteten (finanziellen und sozialen) Erträge für alle Beteiligten die Investitionen im Lebenszyklus ausgleichen. Ein weiterer Aspekt ist die Anpassungsfähigkeit des Projekts, so dass es ausreichend belastbar ist, um auf veränderte Rahmenbedingungen reagieren zu können, ohne die Rentabilität zu beeinträchtigen.

Im Rahmen dieser Designstudie war es nicht möglich, eine echte Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen, daher haben wir die Designvorschläge hauptsächlich auf ihre Machbarkeit anhand der Daten, die auf Darstellungen des Stadtentwicklungsamtes basieren, bewertet. Alle Szenarien enthalten den gleichen Umfang an bebauter Fläche und die gleichen Funktionen. Die Szenarien 1 und 2 orientieren sich jedoch strikt an den derzeitigen Eigentumsverhältnissen und sind daher in dieser Hinsicht relativ leicht umsetzbar. In Szenario 3 wird die Grenze des Gebietes, das uns als Projektgebiet übergeben wurde, überschritten. Das bedeutet, dass zunächst weitere Verhandlungen notwendig sind, um sicherzustellen, dass dies auch realisierbar ist. Eine erste Reaktion des Bezirks hat gezeigt, dass dies für machbar gehalten wird. Wir schlagen vor, die Szenarien 1 und 2 mit "sehr gut" und das Szenario 3 mit "gut" zu bewerten.

Tabelle 1 Vergleich der Szenarien anhand der Sweco Nachhaltigkeits Indikatoren

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Hitzestress	-	+	+
Akustische Qualität	+	-	++
Ökologische Qualität	-	+	++
Wirtschaftliche Machbarkeit	++	++	+
Räumliche Integration	++	-	+
Soziale Qualität	-	+	++

In der obigen Tabelle sind die Ergebnisse des qualitativen Vergleichs zusammengefasst. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass Szenario 3 am besten abschneidet, ohne negative Bewertung und mit einem sehr guten Ergebnis in Bezug auf die ökologische, soziale und akustische Qualität. Die Szenarien 1 und 2 schneiden recht ähnlich ab, allerdings mit sehr unterschiedlichen Schwerpunkten: Während Szenario 1 eine bessere räumliche Integration und eine bessere akustische Qualität aufweist, ist Szenario 2 aus Sicht der sozialen und ökologischen Qualität und wegen der deutlich geringeren Wärmebelastung vorzuziehen. Die

Tabelle 1 dient hier dem besseren Vergleich der verschiedenen Szenarien bei der Bewertung des Hitzestresses.

Referenzen

- Bevölkerungsprognose für Berlin und die Bezirke 2021 – 2040. Gesamtbericht.* (o. J.).
- De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 12, 21–48.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001>
- Doblas-Reyes, F. J., Sörensson, A. A., Almazroui, M., & A. Dosio, W.J. Gutowski, R. Haarsma, R. Hamdi, B. Hewitson, W.-T. Kwon, B.L. Lamptey, D. Maraun, T.S. Stephenson, I. Takayabu, L. Terray, A. Turner, and Z. Zuo. (2021). Linking Global to Regional Climate Change. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1363–1512). Cambridge University Press.
- Dodman, D., Hayward, B., Pelling, M., & V. Castan Broto, W. Chow, E. Chu, R. Dawson, L. Khirfan, T. McPhearson, A. Prakash, Y. Zheng, and G. Ziervogel. (2022). Cities, Settlements and Key Infrastructure. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 907–1040). Cambridge University Press.
- Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., & L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon. (2021). Atlas. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1927–2058). Cambridge University Press.
- Jay, O., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., De Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., & Ebi, K. L. (2021). Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: From personal cooling strategies to green cities. *The Lancet*, 398(10301), 709–724.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01209-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01209-5)

- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., Counsell, C. W. W., Dietrich, B. S., Johnston, E. T., Louis, L. V., Lucas, M. P., McKenzie, M. M., Shea, A. G., Tseng, H., Giambelluca, T. W., Leon, L. R., Hawkins, E., & Trauernicht, C. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501–506. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., & N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, and R. Zaaboul. (2021). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1767–1926). Cambridge University Press.
- Souverijns, N., De Ridder, K., Takacs, S., Veldeman, N., Michielsen, M., Crols, T., Foamouhoue, A. K., Nshimirimana, G., Dan Dijé, I., & Tidjani, H. (2023). High resolution heat stress over a Sahelian city: Present and future impact assessment and urban green effectiveness. *International Journal of Climatology*, joc.8268. <https://doi.org/10.1002/joc.8268>
- Winklmayr, C., Muthers, S., Niemann, H., Mücke, H.-G., & An Der Heiden, M. (2022). Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Deutsches Ärzteblatt international*. <https://doi.org/10.3238/arztebl.m2022.0202>

Annex

Liste der verfügbaren Indikatoren

Generelle Temperatur Indikatoren

- T2M_daily_mean_max:
 - Titel: Durchschnittliche Tageshöchsttemperatur
 - Beschreibung: Durchschnittliche Tageshöchsttemperatur über den gesamten betrachteten Zeitraum

- T2M_daily_mean_max_topography:
 - Titel: Städtische Wärmeinsel tagsüber
 - Beschreibung: Städtische Wärmeinsel am Tag, berechnet als die durchschnittliche Differenz der Tageshöchsttemperaturen zwischen jedem Pixel und einem ländlichen Pixel außerhalb der Stadt. Sie erfasst den Temperaturunterschied, der auf menschliche Aktivitäten und die Veränderung von Landoberflächen zurückzuführen ist. Eine Korrektur für topografische Unterschiede zwischen den Pixeln wird durch Anwendung der Stornorate berücksichtigt.

- T2M_daily_mean_min:
 - Titel: Durchschnittliche tägliche Mindesttemperatur
 - Beschreibung: Durchschnittliche Tagesminimaltemperatur über den gesamten betrachteten Zeitraum

- T2M_daily_mean_min_topography:
 - Titel: Nächtliche städtische Wärmeinsel
 - Beschreibung: Nächtliche städtische Wärmeinsel, berechnet als durchschnittliche Differenz der täglichen Mindesttemperaturen zwischen jedem Pixel und einem ländlichen Pixel außerhalb der Stadt. Sie erfasst den Temperaturunterschied, der auf menschliche Aktivitäten und die Veränderung von Landoberflächen zurückzuführen ist. Eine Korrektur für topografische Unterschiede zwischen den Pixeln wird durch Anwendung der Stornorate berücksichtigt.

- T2M_mean:
 - Titel: Durchschnittliche Tagestemperatur
 - Beschreibung: Durchschnittliche Tagestemperatur über alle Zeitschritte im betrachteten Zeitrahmen

- MTWM:

- Titel: Höchsttemperatur des wärmsten Monats
- Beschreibung: Die durchschnittliche monatliche Höchsttemperatur des wärmsten Monats im Jahresverlauf (bioklimatischer Indikator 5). Basierend auf O'Donnel und Ignizio (2012): Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States
- MTCM:
 - Titel: Mindesttemperatur des kältesten Monats
 - Beschreibung: Die durchschnittliche monatliche Mindesttemperatur des kältesten Monats im Jahresverlauf (bioklimatischer Indikator 6). Basierend auf O'Donnel und Ignizio (2012): Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States
- WBGT_daily_mean_max:
 - Titel: Durchschnittlicher Tageshöchstwert der Feuchtkugeltemperatur(Wet Bulb Globe)
 - Beschreibung: Die Feuchtkugeltemperatur (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für Menschen und wird in Anlehnung an die ISO-Norm 7243 berechnet. Die Grenzwerte für Hitzestress werden auf der Grundlage dieser Veröffentlichung und der Empfehlungen der US-Armee festgelegt. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung findet sich in Lauwaet et al. (2020): doi:10.3390/cli8010006.

Energie Indikatoren

- Cooling degree hours:
 - Titel: Jährliche durchschnittliche Anzahl von Kühlungsgradstunden
 - Beschreibung: Die Kühlungsgradstunden sind ein internationaler Standard zur Schätzung des Energieverbrauchs für die Kühlung von Wohnungen mit Klimaanlage (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2021). Sie wird berechnet als die Anzahl der Stunden, in denen die Temperatur über 25°C steigt, multipliziert mit der Anzahl der Grad, um die die Temperatur über 25°C steigt. Es wird der jährliche Durchschnittswert angegeben.

Gesundheitsindikatoren

- Heatwave days:
 - Titel: Anzahl der Hitzewellentage pro Jahr
 - Beschreibung: Eine Hitzewelle ist definiert als mindestens drei Tage, an denen sowohl die Tages- als auch die Nachttemperatur den 90-Perzentil-Schwellenwert eines Basiszeitraums (angenommen als Zeitraum 2011-2020) überschreiten. Der Indikator wird als die durchschnittliche Anzahl der Hitzewellentage pro Jahr dargestellt.

- HWMI:
 - Titel: Index des Ausmaßes der Hitzewelle (HWMId)
 - Beschreibung: Der Heat-wave magnitude index daily (HWMId) ist definiert als das maximale Ausmaß der Hitzewellen in einem Jahr. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Russo et al. (2015): doi:10.1088/1748-9326/10/12/124003.

- T2M_dayover25:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen $T_{max} > 25 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Höchsttemperatur 25 °C überschreitet.

- T2M_dayover30:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen $T_{max} > 30 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Höchsttemperatur 30 °C überschreitet.

- T2M_dayover35:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen $T_{max} > 35 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Höchsttemperatur 35 °C überschreitet.

- T2M_nightover20:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Nächten $T_{min} > 20 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Nächte, in denen die Mindesttemperatur nicht unter 20 °C fällt. Dieser Grenzwert wird von mehreren europäischen Wetterdiensten als "tropische Nacht" angesehen.

- T2M_nightover25:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Nächten $T_{min} > 25 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Nächte, in denen die Mindesttemperatur nicht unter 25 °C fällt. Dieser Grenzwert wird von mehreren südeuropäischen Wetterdiensten als "tropische Nacht" angesehen.

- WBGT_dayover25:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen mit $WBGT > 25 \text{ °C}$
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBGT) 25 °C überschreitet. Die WBGT liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für den Menschen und wird in Anlehnung an die ISO 7243-Normen berechnet. 25 °C gilt als Grenzwert für mäßige durchschnittliche Hitzestressbelastung und schränkt höchste körperliche Aktivitäten im Freien ein, um Gesundheitsrisiken zu vermeiden.

- WBG_T_dayover28:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen mit WBG_T > 28 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBG_T) 28 °C überschreitet. Die WBG_T liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für den Menschen und wird in Anlehnung an die ISO 7243-Normen berechnet. 28 °C gilt als Grenzwert für starke durchschnittliche Hitzebelastung und schränkt körperliche Aktivitäten im Freien ein, um Gesundheitsrisiken zu vermeiden.

- WBG_T_dayover29.5:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen mit WBG_T > 29,5 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Wet-Bulb-Globe-Temperaturen (WBG_T) 29,5 °C überschreiten. Die WBG_T liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für den Menschen und wird in Anlehnung an die ISO 7243-Normen berechnet. 29,5 °C gilt als Grenzwert für eine sehr starke durchschnittliche Hitzebelastung und schränkt die meisten körperlichen Aktivitäten im Freien auf ein Minimum ein, um ein Gesundheitsrisiko zu vermeiden.

- WBG_T_dayover31:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Tagen mit WBG_T > 31 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Tage, an denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBG_T) 31 °C überschreitet. Die WBG_T liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 31 °C gilt als Grenzwert für extreme durchschnittliche Hitzestressbelastung und schränkt alle Aktivitäten im Freien auf ein Minimum ein, um ein Gesundheitsrisiko zu vermeiden.

- WBG_T_hourover25:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Stunden WBG_T > 25 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Stunden, in denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBG_T) 25 °C übersteigt. Die WBG_T liefert eine Schätzung der Hitzebelastung für den Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 25 °C gilt als Grenzwert für eine mäßige durchschnittliche Hitzebelastung und schränkt höchste körperliche Aktivitäten im Freien ein, um ein Gesundheitsrisiko zu vermeiden.

- WBG_T_hourover28:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Stunden WBG_T > 28 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Stunden, in denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBG_T) 28 °C übersteigt. Die WBG_T liefert eine Schätzung der Hitzebelastung für den Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 28 °C gilt als Grenzwert für starke durchschnittliche

Hitzebelastung und schränkt körperliche Aktivitäten im Freien ein, um Gesundheitsrisiken zu vermeiden.

- WBGH_houover295:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Stunden WBGH > 29,5 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Stunden, in denen die Wet-Bulb-Globe-Temperaturen (WBGH) 29,5 °C überschreiten. Die WBGH liefert eine Schätzung der Hitzebelastung für den Menschen und wird in Anlehnung an die ISO-Norm 7243 berechnet. 29,5 °C gilt als Grenzwert für eine sehr starke durchschnittliche Hitzebelastung und schränkt die meisten körperlichen Aktivitäten im Freien auf ein Minimum ein, um ein Gesundheitsrisiko zu vermeiden.
- WBGH_houover31:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Stunden WBGH > 31 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Stunden, in denen die Wet Bulb Globe Temperatures (WBGH) 31 °C übersteigt. Die WBGH liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 31 °C gilt als Grenzwert für extreme durchschnittliche Hitzestressbelastung und schränkt alle Aktivitäten im Freien auf ein Minimum ein, um ein Gesundheitsrisiko zu vermeiden.
- WBGH_nightover25:
 - Titel: Jährliche Anzahl der Nächte mit WBGH > 25 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl von Nächten, in denen die Wet Bulb Globe Temperature (WBGH) nicht unter 25 °C fällt. Die WBGH liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 25 °C gilt als Grenzwert für eine mäßige durchschnittliche Hitzestressbelastung.
- WBGH_nightover28:
 - Titel: Jährliche Anzahl von Nächten mit WBGH > 28 °C
 - Beschreibung: Jährliche Anzahl der Nächte, in denen die Wet Bulb Globe Temperature (WBGH) nicht unter 28 °C fällt. Die WBGH liefert eine Schätzung der Hitzestressbelastung für Menschen und wird nach den Normen der ISO 7243 berechnet. 28 °C gilt als Grenzwert für starke durchschnittliche Hitzestressbelastung.

Ökonomische Indikatoren

- LWH_int:
 - Titel: Jährlicher Arbeitsausfall für intensive Tätigkeiten
 - Beschreibung: Die Grenzwerte für sichere Arbeitsbedingungen unter Hitzestressbedingungen sind in den Normen ISO 7243 und Hooyberghs et al. (2017) definiert: doi:10.1007/s10584-017-2058-1. Für intensive Tätigkeiten (415 W) wird der jährliche Arbeitsausfall wie folgt berechnet (die Formel ist hier abgebildet)

- LWH_mod:
 - Titel: Jährliche verlorene Arbeitsstunden für moderate Tätigkeiten
 - Beschreibung: Die Grenzwerte für sichere Arbeitsbedingungen unter Hitzestressbedingungen sind in den Normen ISO 7243 und Hooyberghs et al. (2017) definiert: doi:10.1007/s10584-017-2058-1. Für mäßige Tätigkeiten (300 W) wird der jährliche Arbeitsausfall wie folgt berechnet (die Formel ist hier abgebildet)

- LWH_light:
 - Titel: Jährlicher Arbeitsausfall für leichte Tätigkeiten
 - Beschreibung: Die Grenzwerte für sichere Arbeitsbedingungen unter Hitzestressbedingungen sind in den Normen ISO 7243 und Hooyberghs et al. (2017) definiert: doi:10.1007/s10584-017-2058-1. Für leichte Tätigkeiten (180 W) wird der jährliche Arbeitsausfall wie folgt berechnet (die Formel ist hier abgebildet)

CLIMATE
ANALYTICS 