



**1 / ENTWICKLUNGS-
KONZEPT**



**2 / HOCHHAUS-
STECKBRIEFE**



**3 / VORPLANUNGS-
PROZESS**



**A / STANDORT-
BETRACHTUNG**



**B / DAS HOCHHAUS
UND DIE STADT**



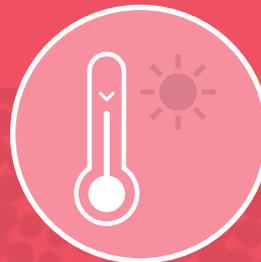
C / LOKALES UMFELD



D / NACHHALTIGKEIT



E / MOBILITÄT



F / STADTKLIMA

F /

STADTKLIMA

Mit der fortschreitenden Klimaerwärmung rückt der Einfluss neuer und bestehender Hochhäuser auf das städtische Klima zunehmend in den Fokus der öffentlichen Betrachtung. Die bestehenden Hochhaus-Cluster beeinflussen bereits heute lokale Windsysteme der Stadt Frankfurt am Main sowie ihres Umlandes. Neue Standorte müssen daher kritisch geprüft werden, um ihren Einfluss auf lokale Windsysteme und Kaltluftströme zu minimieren. Zudem spielt der Schattenwurf von Hochhäusern eine wichtige Rolle in der Diskussion um die Aufenthaltsqualität von öffentlichen Räumen. Im Winter unerwünschte, lange Schatten der Hochhaustürme, müssen in Zeiten sich aufheizender Städte in den Sommermonaten von einem neuen Standpunkt aus betrachtet werden.

Auf den folgenden Seiten werden die Einflüsse der Frankfurter Skyline auf die Wind- und Verschattungssituation der Betrachtungsgebiete untersucht.

WINDKOMFORT

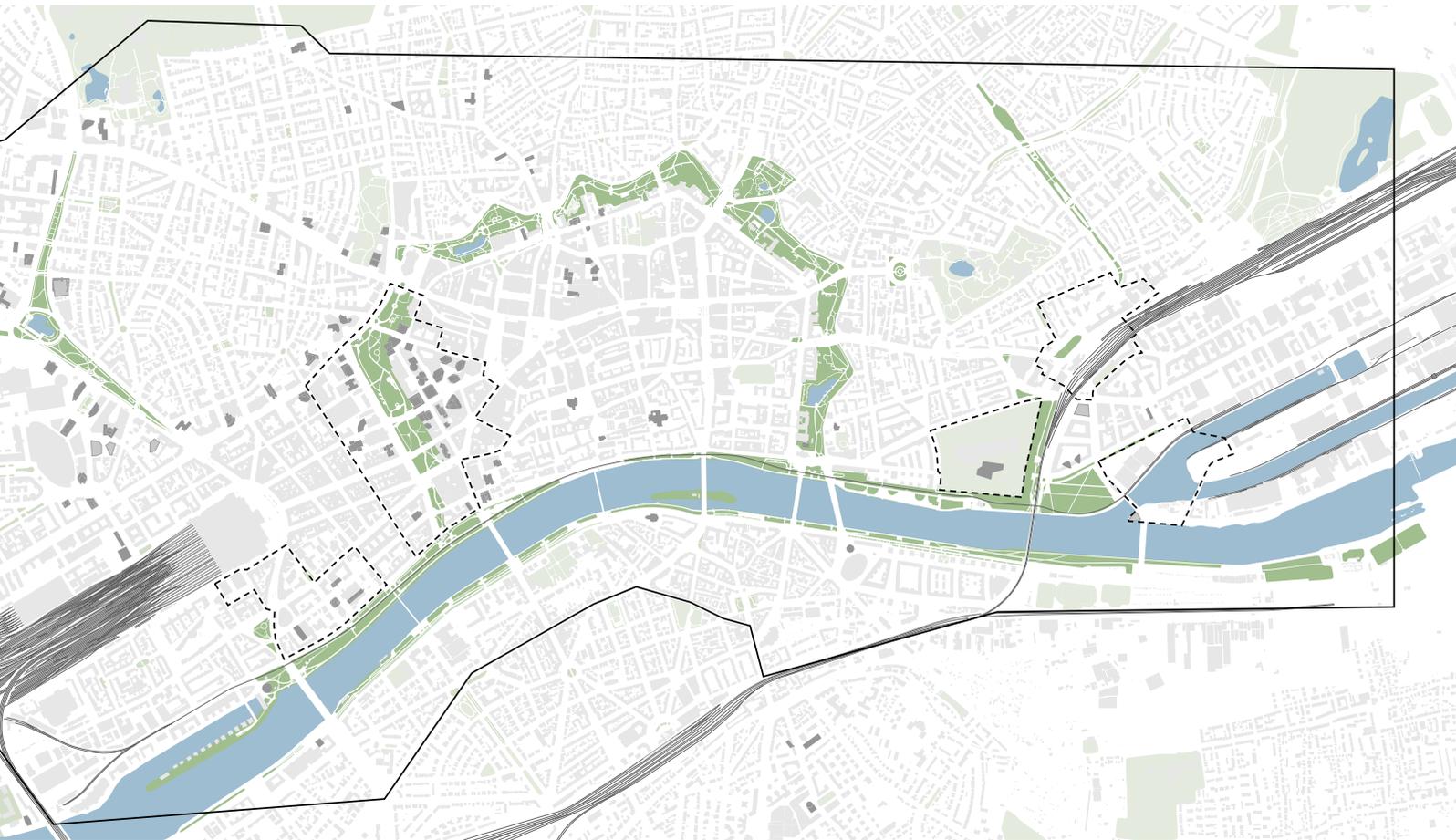
Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Auswirkungen neuer Hochhausstandorte im Hochhausentwicklungsplan 2024 (HEP2024) auf das Windfeld in der Stadt Frankfurt am Main. Dafür wurden Strömungssimulationen für den Ist-Zustand der Bebauung im Jahr 2023 und für ein Szenario, das die geplanten Hochhausstandorte inklusive eines Neubau-Entwurfs der Oper am Willy-Brand-Platz enthält, durchgeführt. Durch diesen Vorher-Nachher-Vergleich wird gezeigt, in welcher Weise die neuen Standorte das Windfeld in der Stadt verändern. Der Begriff Windfeld steht hier stellvertretend für drei Windsituationen, die eine besondere biometeorologische Bedeutung für die Bewohner*innen der Stadt Frankfurt am Main haben:

- > Szenario „Südwest“: Die häufigste Windrichtung und -geschwindigkeit aus der langjährigen Windklimatologie
- > Szenario „Wetterauwind“: Strahlungsnächte mit aktivem Wetterauwind
- > Szenario „Schwachwind“: Strahlungsnächte mit Schwachwind

„Wetterauwind“ und „Schwachwind“ spielen eine wichtige Rolle für die nächtliche Zufuhr von Frisch- und Kaltluft in das Stadtgebiet. Der Südwestwind stellt als häufigste Windrichtung ebenfalls einen wichtigen Beitrag zum Luftaustausch mit dem Umland dar. Vor dem Hintergrund immer häufiger auftretenden Hitzewellen wurde diese Untersuchung im Bestreben durchgeführt, eine maßgebliche Beeinträchtigung der Frisch- und Kaltluftsysteme zu vermeiden. Diese drei meteorologischen Szenarien wurden mit Hilfe der lokalen Expertise des Instituts für Klima- und Energiekonzepte (INKEK) definiert.

Das Werkzeug für die Windsimulationen ist ein Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell, ein strömungsmechanisches Computermodell, mit dem Wind- und Temperaturfelder berechnet wurden. Die Temperaturfelder sind dabei eine Hilfsgröße zur Berechnung der Strömungsfelder im Szenario „Schwachwind“. Nach der Analyse der Strömungssituationen für die drei Szenarien erfolgte ein Vergleich mit dem Szenario „neue Hochhäuser“ und eine Beschreibung der Veränderungen der Strömungsfelder.





Die nebenstehende Grafik zeigt den Ausschnitt der Frankfurter Innenstadt, der im Strömungsmodell berücksichtigt wurde. Er ergibt sich aus der Lage der im HEP2024 betrachteten Teilbereiche sowie der neuen Hochhausstandorte inklusive ausreichend großer Randbereiche. Ziel war, genügend Rand um die geplanten Standorte zu behalten, damit das Windfeld am konkreten Standort realistisch dargestellt und nicht von unerwünschten Randeffekten beeinflusst wird.

METEOROLOGISCHE GRUNDLAGEN

FÜR EINE ERSTE ERFASSUNG STADTKLIMATISCHER BESONDERHEITEN FÜR DEN INNENSTADTBEREICH DER STADT FRANKFURT AM MAIN KANN AUF DEN KLIMAPLANATLAS DER STADT FRANKFURT AM MAIN, AUF REGIONALE KLIMAANALYSEN FÜR DEN SÜDEN DES LANDES HESSEN, AUF MESSDATEN SOWIE AUF EINEN MESSBERICHT ZU VERTIKALEN WINDPROFILEN IM STADTGEBIET VON FRANKFURT AM MAIN ZURÜCKGEGRIFFEN WERDEN.

KLIMAANALYSEKARTE KLIMAPLAN FRANKFURT AM MAIN

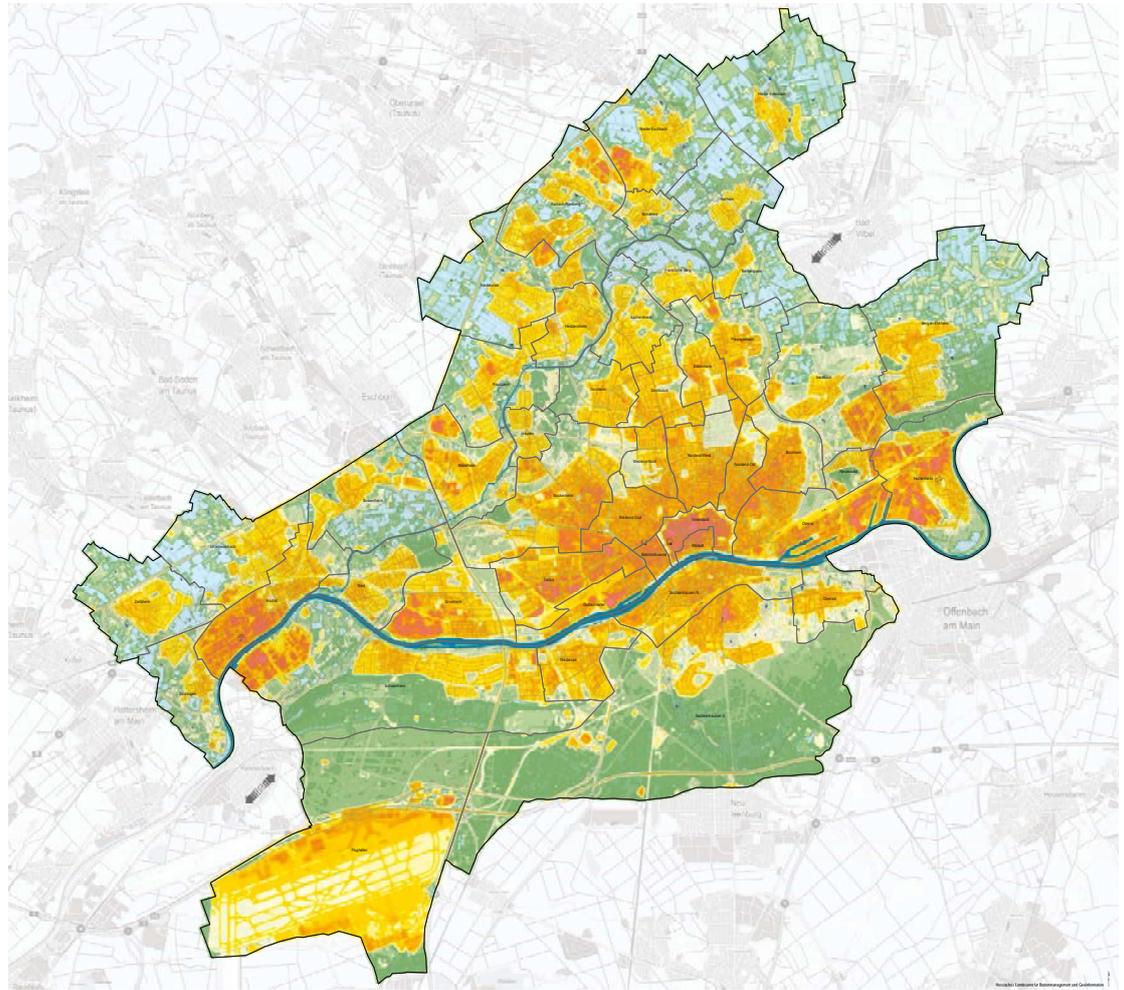
Die Klimaanalysekarte (vormals Klimafunktionskarte) liefert eine Zusammenschau der thermischen und dynamischen Komponenten des Stadtklimas in Form von Klimatopen (Gebiete ähnlicher mikroklimatischer Ausprägung). Es können Wechselwirkungen der Klimatope sowie lokale und regionale dynamische Prozesse (z. B. Luftleitbahnen, Kalt- und Frischluftabflüsse) abgelesen werden.

Auf der folgenden Doppelseite wird die Klimaanalysekarte aus dem Klimaplanatlas der Stadt Frankfurt am Main sowie ein Detailausschnitt rund um die Frankfurter Innenstadt dargestellt.

Bezüglich der Belüftung der Stadt fällt zunächst der mit einem extra Symbol ausgewiesene Wetterauwind auf. Im Nordosten der Stadt zeigt ein Doppelpfeil an, dass die Strömungsachse des Wetterauwindes von Nordost-Südwest verläuft. Diese Hervorhebung unterstreicht die Bedeutung dieses Windsystems für die Belüftung der Stadt Frankfurt am Main. Der Wetterauwind ist ein Regionalwindsystem, das in Fließgeschwindigkeit und Höhe der strömenden Luftmasse

einem lokalen Kaltluftsystem überlegen ist. Er wird wegen seiner Bedeutung für die Stadt in vorliegender Untersuchung der Windverhältnisse bezüglich des HEP2024 als eigenes meteorologisches Szenario definiert, simuliert und ausgewertet.

Der Detailausschnitt deutet die Lage und Ausrichtung von lokalen Windsystemen an. Sie sind an den schraffierten Flächen erkennbar. Für den Innenstadtbereich sind demnach das Lokalwindsystem im Ostend und die vom südlichen Mainufer nach Norden drängende Luft aus Oberrad relevant. Auch die Gleisanlagen des Hauptbahnhofs sind durch den Doppelpfeil als (schwaches) lokales Windsystem bezeichnet.



- + KLIMAÖKOLOGISCHE WERTIGKEIT
- FRISCHLUFT- UND KALTLUFT-ENTSTEHUNGSGEBIET**
 - FRISCHLUFT-ENTSTEHUNGSGEBIET**
 - MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMATE**
 - ÜBERWÄRMUNGSPOTENZIAL**
 - MODERATE ÜBERWÄRMUNG**
 - STARKE ÜBERWÄRMUNG**
- KLIMAÖKOLOGISCHE WERTIGKEIT

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Freilandklima. Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung.

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Waldklima. Flächen ohne Emissionsquellen; hauptsächlich mit dichtem Baumbestand und hoher Filterwirkung.

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Klima innerstädtischer Grünflächen. Flächen mit sehr hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Vorstadtklima. Baulich geprägte Bereiche mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen; größtenteils ausreichende Belüftung.

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Stadtklima. Dichte Bebauung, hoher Versiegelungsgrad und wenig Vegetation in den Freiräumen; Belüftungsdefizite.

Orientierung nach VDI Klimateigenschaft: Innenstadtklima. Stark verdichtete Innenstadtbereiche/City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung.

- GROSSRÄUMIG
-  **WETTERAUWIND**
 -  **LUFTLEITBAHN**
 -  **WIRKRICHTUNG LUFTLEITBAHN**
 -  **KALTLUFTBAHN / KALTLUFTABFLUSSRICHTUNG**
 -  **DURCHLÜFTUNG / DURCHLÜFTUNGSBAHN**
 -  **WINDFELDRICHTUNG**
- KLEINRÄUMIG

Der Wetterauwind ist eine bis zu 300 m mächtige nächtliche Regionalströmung aus Nordost. Sie überströmt das zentrale Stadtgebiet Frankfurts und greift als wichtige Ausgleichsströmung östlich und westlich des Stadtkerns bis in die bodennahen Bereiche durch. Tagsüber kehrt sich die Windrichtung entsprechend der Leitwirkung des Taunuskamms auf südwest.

Durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport. Luftleitbahnen sind durch geringe Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzeln stehende Bäume) gekennzeichnet.

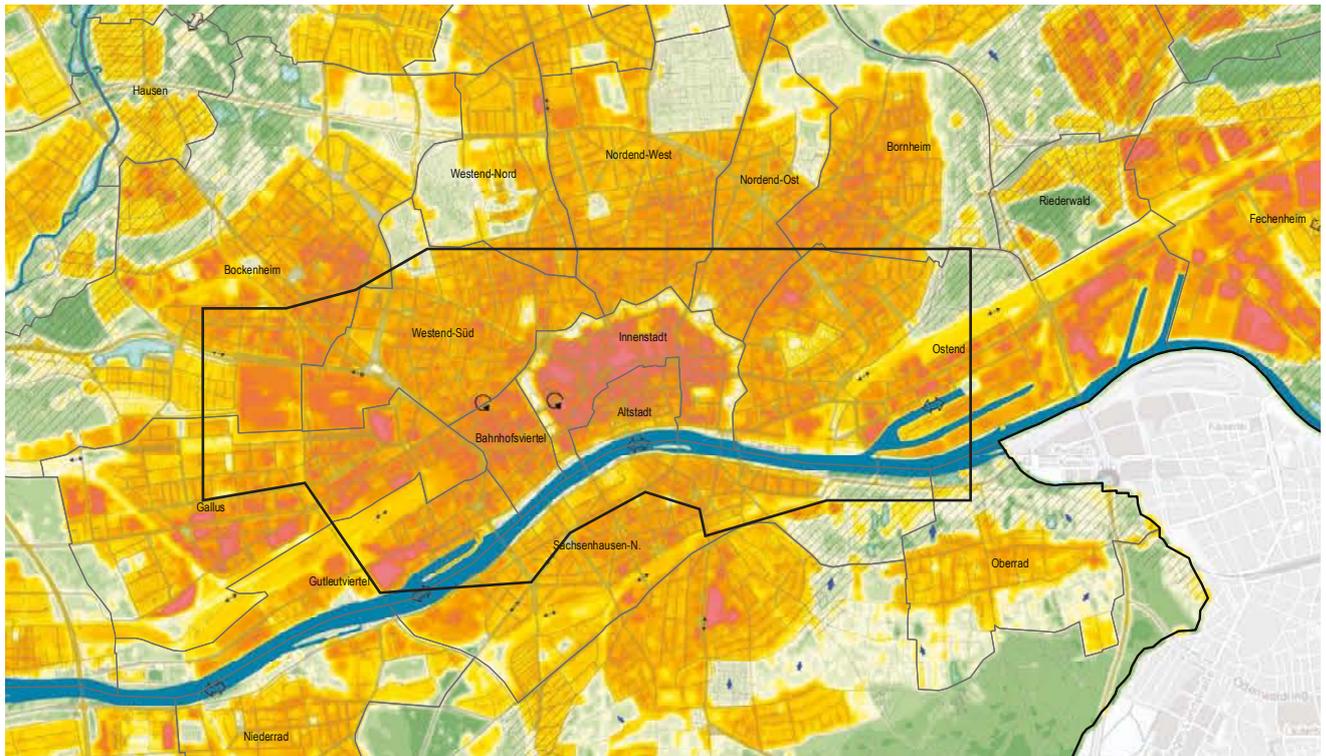
Sie ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Die Wirksamkeit hängt von der Windverteilung ab. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung sein.

Thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind). Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Das Pfeilsymbol entspricht der Abflussrichtung.

Neben Luftleitbahnen auch Gleisanlagen, breite Straßen, Flussläufe etc. die als zusätzliche Bahnen belüftend wirken. Kanalisierung von Luftströmungen.

Durch hohe Bebauung hervorgerufene Störung des Windfeldes. Hinweis auf erhöhte turbulente Windgeschwindigkeitsänderungen (Böigkeit) und drastische Windrichtungsänderungen (Wirbelbildung, Umströmung).





Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass das gesamte Untersuchungsgebiet in Bereiche moderater bis starker Überwärmung fällt (dichte bis stark verdichtete Bebauung, hoher Versiegelungsgrad, wenig Vegetationsanteil im Freiraum und defizitäre bzw. fehlende Durchlüftung). Für zukünftige Entwicklungen bedeutet das, dass Maßnahmen zur Verbesserung der mikroklimatischen Bedingungen bei jeder Entwicklung mitgedacht werden müssen. Als Ausnahme deutlich erkennbar sind Parkanlagen, die je nach Größe und Ausgestaltung deutlich bessere thermische Bedingungen aufweisen und in die Kategorien „Überwärmungspotenzial“ oder „Misch- und Übergangsklima“ fallen.

KALTLUFTANALYSEN FRANKFURT AM MAIN UND UMGEBUNG

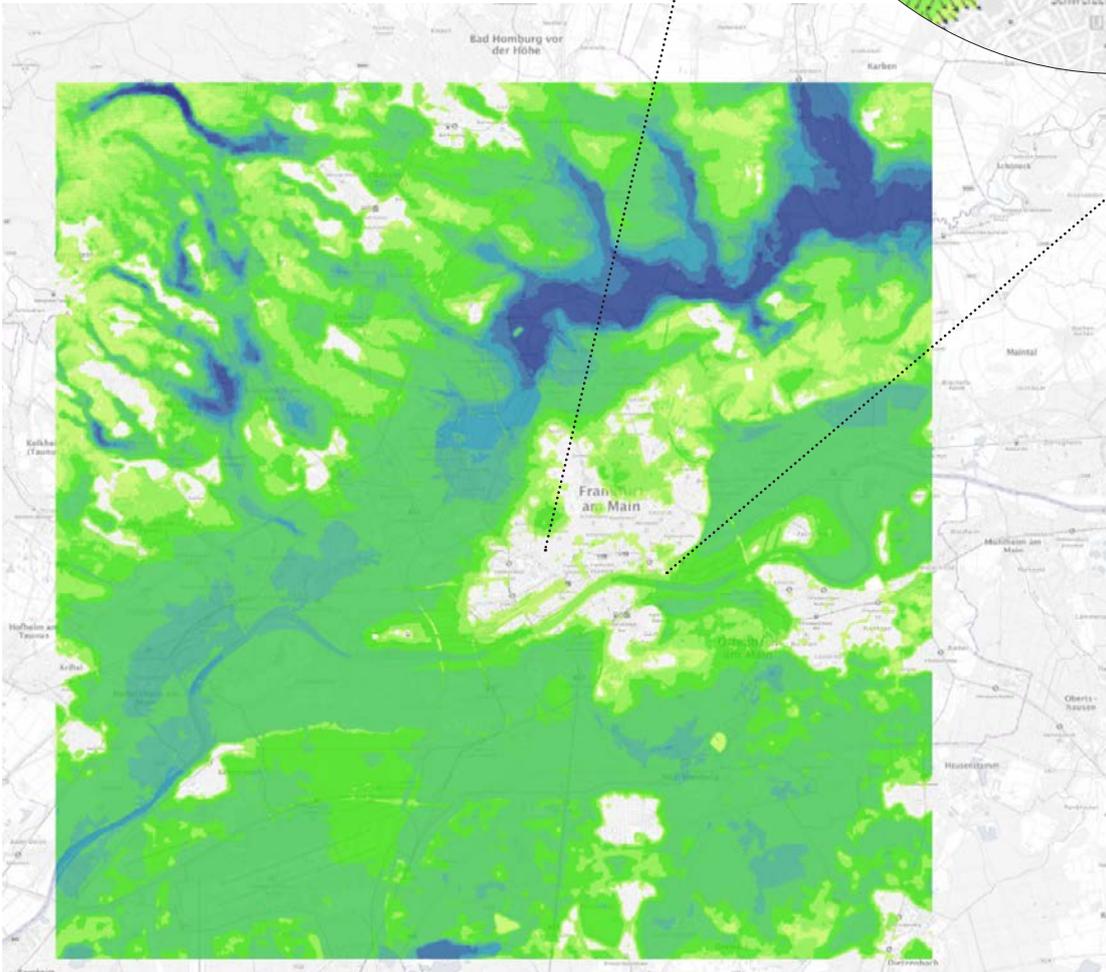
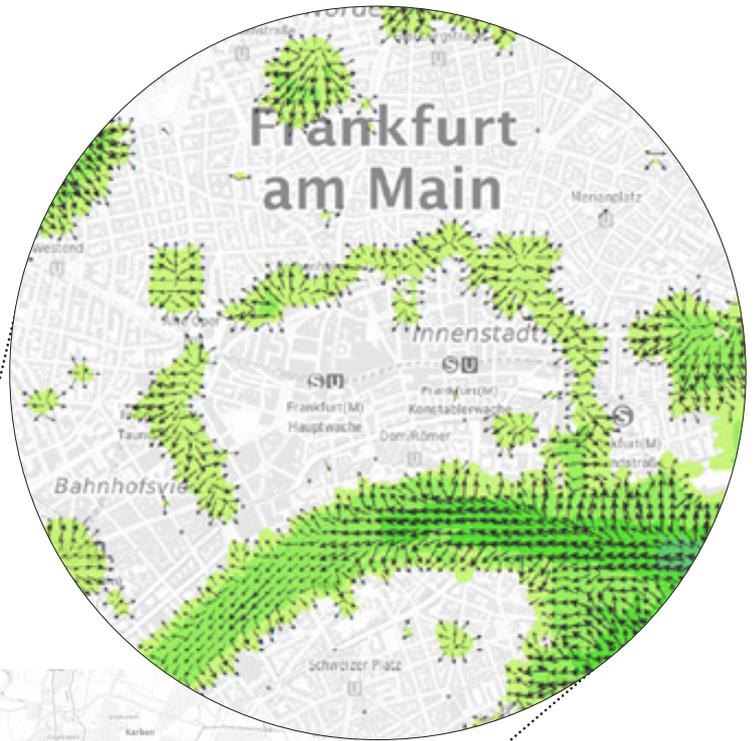
Die Berücksichtigung von lokalen Kaltluftsystemen in der Stadtplanung ist insofern relevant, als dass Kaltluft bei windschwachen (austauscharmen), wolkenarmen Wetterlagen potenziell zu lufthygienischen Verbesserungen führen und zur nächtlichen Abkühlung von bebauten Gebieten und damit zur Erholung der Bevölkerung vor allem während Hitzeperioden beitragen kann. Menschen, die im Einflussbereich dieser Kaltluftströme wohnen, profitieren von niedrigeren nächtlichen Minimaltemperaturen im Vergleich zu Bereichen ohne Kaltluftsystemen. So besteht die Chance bzw. die Notwendigkeit, die positive Wirkung der Kaltluft bei Bautätigkeiten aufrechtzuerhalten bzw. negative Auswirkungen auf das Kaltluftsystem zu minimieren.

Die Klimawandelanpassungsstrategie Frankfurt am Main formuliert dazu folgendes Ziel:

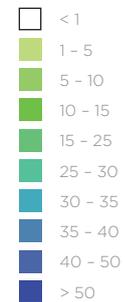
„die künftige Stadtentwicklung ist daher noch wesentlich stärker als bisher auf die Begrenzung der lokalen Überwärmungstendenzen und auf den Schutz der städtischen Infrastrukturen auszurichten. Dazu sind die für das Frankfurter Stadtklima relevanten Kalt- und Frischluftsysteme detailliert zu erkunden und wirkungsbezogen zu gewichten, zu berücksichtigen sowie gegebenenfalls wiederherzustellen, wenn heute bereits Strömungshindernisse in bedeutsamen Ventilationsbahnen liegen sollten. Hierbei dürfen die regionalen Dimensionen der verschiedenen Windsysteme nicht außer Acht gelassen werden, da zum Beispiel viele Kaltluftentstehungsgebiete ihren Ursprung jenseits der Stadtgrenze haben“ (S.11)

Mit der Themenkarte Kaltluft aus dem Klimaplanatlas der Stadt Frankfurt am Main (2016, Rasterauflösung 10 m) und der Analyse der Kaltluftvolumenströme für die Region Südhessen (2022, Rasterauflösung 40 m) sowie für das gesamte Bundesland Hessen (2016, Rasterauflösung 200 m) stehen Informationen zum Kaltluftgeschehen auf verschiedenen räumlichen Ebenen und mit unterschiedlicher Genauigkeit zur Verfügung. Die nebenstehende „Themenkarte Nächtliche Kaltluft“ des Klimaplanatlas der Stadt Frankfurt am Main zeigt die Kaltluflhöhe in Metern, sowie die Fließrichtung und Wirksamkeit der lokalen Kaltluftbahnen ca. 3 Stunden nach Sonnenuntergang.

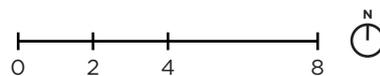
Im Unterschied zum Wetterauwind, der als Regionalwindssystem wesentlich größer und schneller ist, beschränken sich die Kaltluftsysteme auf ihre orographiebedingten Strömungsbahnen. Das bedeutet, dass sie immer „bergab“ fließen, entweder einen Hang hinab oder einem Tal entlang.



KALTLUFTHÖHE IN M



Klimaplanatlas Frankfurt am Main: Themenkarte Nächtliche Kaltluft: Kaltluflhöhe (Farbflächen) und Vektoren (schwarze Pfeile) 3 h nach Sonnenuntergang (INKEK, 2016)

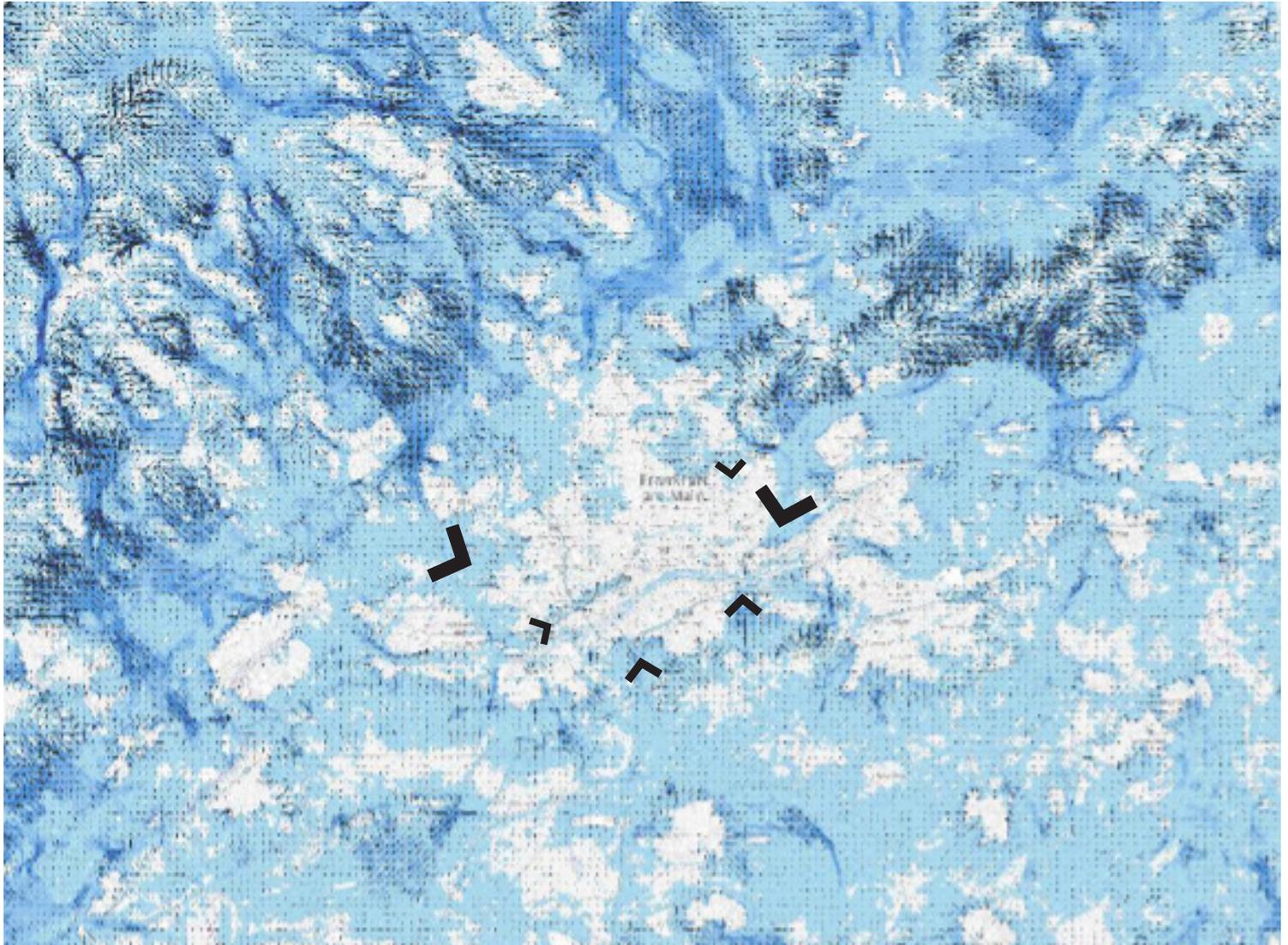


Kaltluft entsteht nach Sonnenuntergang bevorzugt auf offenen, unversiegelten Freiflächen, wie Wiesen und Feldern, aber auch Parks und Gartenlandschaften, vorzugsweise mit niedrigem Bewuchs. Auf der Karte der vorherigen Seite ist die Kaltluftproduktion auf den Grün- und Freiflächen im Frankfurter Umland erkennbar. Die Kaltluft, die im Norden der Stadt an den Hangkuppen und Hangzonen des Taunus entsteht, kann sich topographiebedingt nicht halten, kanalisiert und sammelt sich in den Tälern und strömt dann weiter Richtung Stadtgebiet. Gebäude und die dadurch zunehmende Bodenrauigkeit bremsen den Kaltluftfluss. Die Frankfurter Innenstadt wird nicht mehr großflächig von Kaltluft aus den umliegenden Grün- und Freiflächen versorgt. Lokale Kaltluftproduktion ist in Parkanlagen vorhanden. Klar erkennbar ist auch die Wirkung von Main und Nidda als Kaltluftleitbahnen.

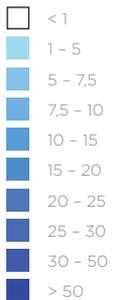
Dieses Bild zeigt sich ebenso in der Interpretation des Kaltluftvolumenstroms, hier vorliegend für die Region Südhessen. Der Kaltluftvolumenstrom ist das Produkt aus Geschwindigkeit und Schichtdicke und gibt an, wie viel Kaltluft pro Zeiteinheit (s) durch einen 1 m breiten Querschnitt (normal zur Flussrichtung, von der Erdoberfläche bis zur Kaltluftobergrenze) strömt (VDI RL 3787/5). Die bebaute Innenstadt ist weitgehend strömungsfrei.

Der Kaltluftvolumenstrom wird in der nebenstehenden Abbildung inklusive der Markierung jener wichtigsten Strömungen (blaue Pfeile) dargestellt, die für das Schwachwindszenario der CFD-Simulationen relevant sind. Betrachtet man dazu die Ausschnitte der fünf Zielgebiete für zukünftige Hochhausentwicklung aus dem HEP2024, so bleiben drei Kaltluftsysteme über, die als Input für die Simulation des Schwachwindszenarios dienen. Es sind dies das Kaltluftsystem im Ostend, die Strömung von der südlichen Mainseite aus Oberrad und die Kaltluftleitbahn der Gleisanlagen beim Hauptbahnhof.

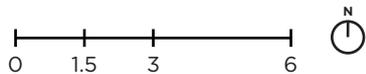
Die Häufigkeit von windschwachen Strahlungsnächten (unter 2,6 m/s Mittelwind und weniger als 4/8 Bedeckungsgrad) in Frankfurt am Main, die eine Ausprägung ebendieses Kaltluftsystems zur Folge haben, liegt laut DWD (Auswertung 1981–2010) bei 21,7 % der Nächte. In den Sommermonaten Juni, Juli und August sind es 33,3 % der Nächte. Aus diesen Zahlen geht also hervor, dass in einem Drittel der Sommernächte Kaltluftsysteme potenziell wichtig für die Kühlung der Stadt sind.



KALTLUFTVOLUMENSTROM (M³/M²S)



WINDFELD IN 2 M ÜBER GRUND

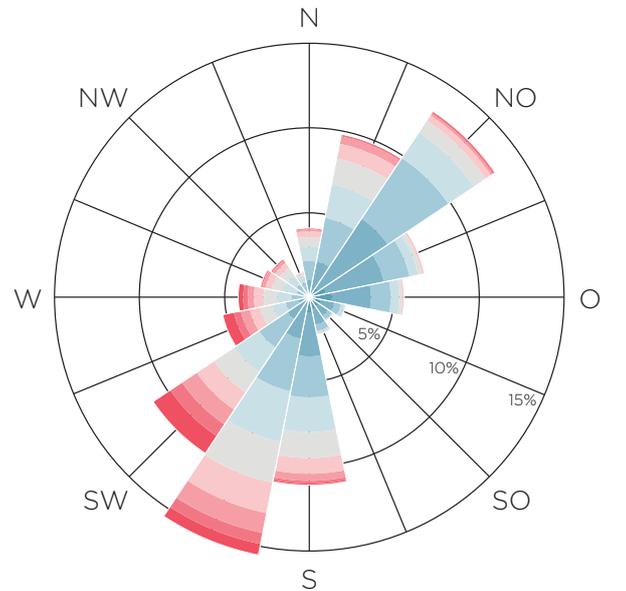


Kaltluftvolumenstrom (Farbflächen) und Vektoren (Peile) 3 h nach Sonnenuntergang, inkl. Markierung jener Strömungen (Pfeile), die für das Schwachwindszenario der CFD-Simulationen als Eingangsannahmen dienen.

AUSWERTUNGEN VON WINDMESSSTATIONEN

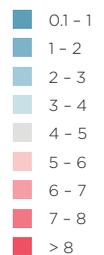
Die Windrose der meteorologischen Messstation von Frankfurt am Main Flughafen zeigt das vorherrschende Windregime am Standort. Es fällt auf, dass die stärksten und häufigsten Winde aus der Richtung Südsüdwest (SSW) und den beiden benachbarten Richtungen SW und S kommen (in Summe zu 38 % des Jahres). Die häufigsten mittleren Geschwindigkeiten liegen dabei zwischen 3 und 6 m/s. Dieses Maximum ist auf die Lage Frankfurts im Westwindssystem der mittleren Breiten zurückzuführen. Es handelt sich dabei um synoptische, also sehr großräumige Windsysteme, die mit der Verteilung der Hoch- und Tiefdrucksysteme über Europa zusammenhängen. Diese Windrichtungen treten häufig zusammen mit Frontdurchgängen und den damit verbundenen unbeständigen Tiefdruckwetterlagen auf.

Ein zweites Maximum liegt bei den Windrichtungen Nordost (NO) und Nordnordost (NNO). Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind hier geringer, häufig zwischen 2 und 4 m/s. Diese Richtungen treten häufig bei ruhigem, stabilem Hochdruckwetter auf. Das damit verbundene Windsystem ist typischerweise regional angetrieben. Es entsteht aus einem Druckunterschied zwischen dem Rhein-Main-Tiefland und dem Niddatal bzw. dem Berger Rücken. In Frankfurt am Main wird diese Strömung als Wetterauwind bezeichnet.



Windrose der meteorologischen Messstation Frankfurt am Main Flughafen auf Basis der Auswertung von Winddaten von 1993-2022 (Datenquelle: DWD)

MITTELWIND IN M/S



MESSUNGEN VON VERTIKALEN WINDPROFILEN

In der Studie „Erfassung lokaler / regionaler Windfelder mit Hilfe von Vertikalsondierungen an ausgewählten Standorten im Stadtgebiet von Frankfurt am Main“ von ÖKAPLANA von 2020 werden vertikale Verteilungen von Windgeschwindigkeiten und -richtungen („Windprofile“) beschrieben, die als Eingangsgrößen für einige der in diesem Bericht beschriebenen Windsimulationen verwendet wurden.

Die Messungen, die zu den vorliegenden Windprofilen führten, wurden in zwei Nächten von warmen, störungsfreien Sommertagen durchgeführt. Die vertikalen Verteilungen wurden mit Fesselballonaufstiegen zwischen 1 und 100 m über dem Boden erfasst. Außerdem kamen Rauchbomben zum Einsatz.

Im zitierten Bericht werden für zwei Nächte im September 2020 synoptische Betrachtungen von Wind- und Temperaturwerten von fünf Messstationen im Raum Frankfurt am Main angestellt. Aus diesen geht hervor, dass in Nachtstunden (von etwa 20 Uhr bis 8 Uhr) im Stadtgebiet ein ausgeprägtes Regionalwindsystem aus Nordosten besteht. Die Windgeschwindigkeiten erreichen in diesen Nächten 3 m/s. Oberhalb dieses Windsystems (gemessen an der Station „Kleiner Feldberg“) herrscht deutlich stärkerer Südsüdost-Wind. Das nordöstliche Regionalwindsystem ist an den Stationen Flughafen, Höchst und Frankfurt Ost in unterschiedlich starken Ausprägungen zu beobachten. Diese Messungen repräsentieren laut dem vorliegenden Bericht den Wetterauwind.

Zusätzlich zu den Messstationen sind in den zwei genannten Nächten die Fesselballon- und Rauchbeobachtungen ausgewertet worden, die an allen fünf Messstandorten einen ausgeprägten Wetterauwind zeigen. An manchen Standorten war unterhalb noch ein räumlich stark begrenztes Lokalwindsystem zu sehen. Die Geschwindigkeiten des Wetterauwindes in den ersten 100 m über dem Erdboden liegen dabei zwischen 2 und 4 m/s. Die Temperatur der Strömung liegt in der ersten Nachthälfte zwischen 18 und 22 °C, in der zweiten Nachthälfte zwischen 16 und 19 °C, in innerstädtischen Lagen auch darüber. Leider liegen oberhalb von 100 m keine Informationen zum weiteren Verlauf des Windprofils vor. An der Station „Kleiner Feldberg“ in 825 m Seehöhe herrscht jedenfalls Südostwind und somit ein anderes – vermutlich großräumiges – Windsystem. Es ist demnach anzunehmen, dass das Windsystem eine Jetform aufweist, also ein Maximum in einer gewissen Höhe, über der die Geschwindigkeit wieder zurückgeht. Die Seehöhe Frankfurts beträgt 112 m. Das bedeutet, dass spätestens in rund 700 m über dem Boden der Wetterauwind vom großräumigen Windfeld abgelöst wird. Die Höhe der Computerdomäne beträgt 500 m. Daher wird ein Maximum der Strömungsgeschwindigkeit in 300 m angenommen, darüber nimmt die Geschwindigkeit wieder leicht ab.

Aus den Vertikalprofilen wurden die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Eingangsdaten des Strömungsszenarios „Regionalwindsystem Wetterauwind“ erstellt.

CFD COMPUTERSIMULATIONEN DER WINDFELDER

ZUR QUANTIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNGEN DER NEUEN HOCHHAUSSTANDORTE AUF DIE WINDFELDER BEI TYPISCHEN WETTERLAGEN IN FRANKFURT AM MAIN WERDEN STRÖMUNGSSIMULATIONEN MIT DEM CFD-COMPUTERMODELL (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELL) DURCHGEFÜHRT. DAS MODELL SELBST UND DIE AUSWERTUNGSMETHODE WERDEN NACHFOLGEND BESCHRIEBEN.

DAS STRÖMUNGSMECHANISCHE COMPUTERMODELL

Zunächst wurde der Ist-Zustand im strömungsmechanischen Computermodell STAR-CCM+ nachgebildet. Die nebenstehende Abbildung zeigt das Untersuchungsgebiet (Teilbereiche 1A,B sowie 2A,B,C) und seine Umgebung im Ist-Zustand. Die in der Abbildung blaugrau dargestellten Gebäude sind planungsrechtlich zulässige Gebäude. Sie werden dem Ist-Zustand der Bebauung zugerechnet. Für den Planstand wurden die neuen Hochhausstandorte des HEP2024 ins Modell übernommen. Falls auf den betreffenden Standorten bereits Gebäude waren, wurden diese gelöscht und mit den Kubaturen der neuen Hochhausstandorte ersetzt.

Es ist unerlässlich, genügend Umgebung im Modell zu berücksichtigen, da das lokale Windfeld immer ein Produkt aus den Einflüssen aller Gebäude und der Topographie ist. Vegetation wird bei den Simulationen nicht berücksichtigt, da dies bei der Größe des Untersuchungsgebiets die vorhandenen Ressourcen der Modellierung sprengen würde. Vegetation wird daher nur bei kleineren Untersuchungsgebieten, zum Beispiel bei Detailuntersuchungen, berücksichtigt.

Der Luftraum um die Objekte wurde mit einem dreidimensionalen Gitter mit variabler Größe der Gitterzellen versehen. Das Modell wird mit einem so genannten „Löser“ für das Strömungsfeld und die Turbulenzgrößen sowie teilweise für die Energie (Temperatur) betrieben. Das bedeutet, dass an jedem Gitterpunkt Werte von Temperatur (nur für die Berechnung der lokalen Schwachwindssysteme), Turbulenzgrößen, Massefluss, Windgeschwindigkeit und Windrichtung berechnet werden. All diese Ergebnisse fließen in die Auswertungen der Windfelder mit ein. Das Modellgebiet ist rund 7.500 m x 3.900 m x 500 m groß. Es besitzt einen rund 100 – 500 m breiten Rand ohne explizite Bebauung, damit die Berechnungen im Untersuchungsgebiet nicht durch numerische Randeffekte beeinflusst werden. Die engste Maschenweite des Gitters besteht nahe an Gebäuden und nahe dem Boden und beträgt 2 m, diese nimmt zum Rand des Modellgebiets hin zu. Der Gitterabstand vergrößert sich dabei schrittweise auf bis zu 30 m. Die Gitter umfassen rund 28 Mio. Zellen.

Die Vorgaben für Windrichtung und -geschwindigkeit der Grundströmung erfolgen an den Einlassflächen. Diese befinden sich im Falle der großräumigen SW-Strömung an den südlichen und westlichen Rändern des Simulationsgebiets, im Falle des Regionalwindsystems Wetterauwind im Norden und im Osten. Bei der lokalen Schwachwindssysteme strömt das jeweilige Windsystem an den aufgezeigten Stellen ein.

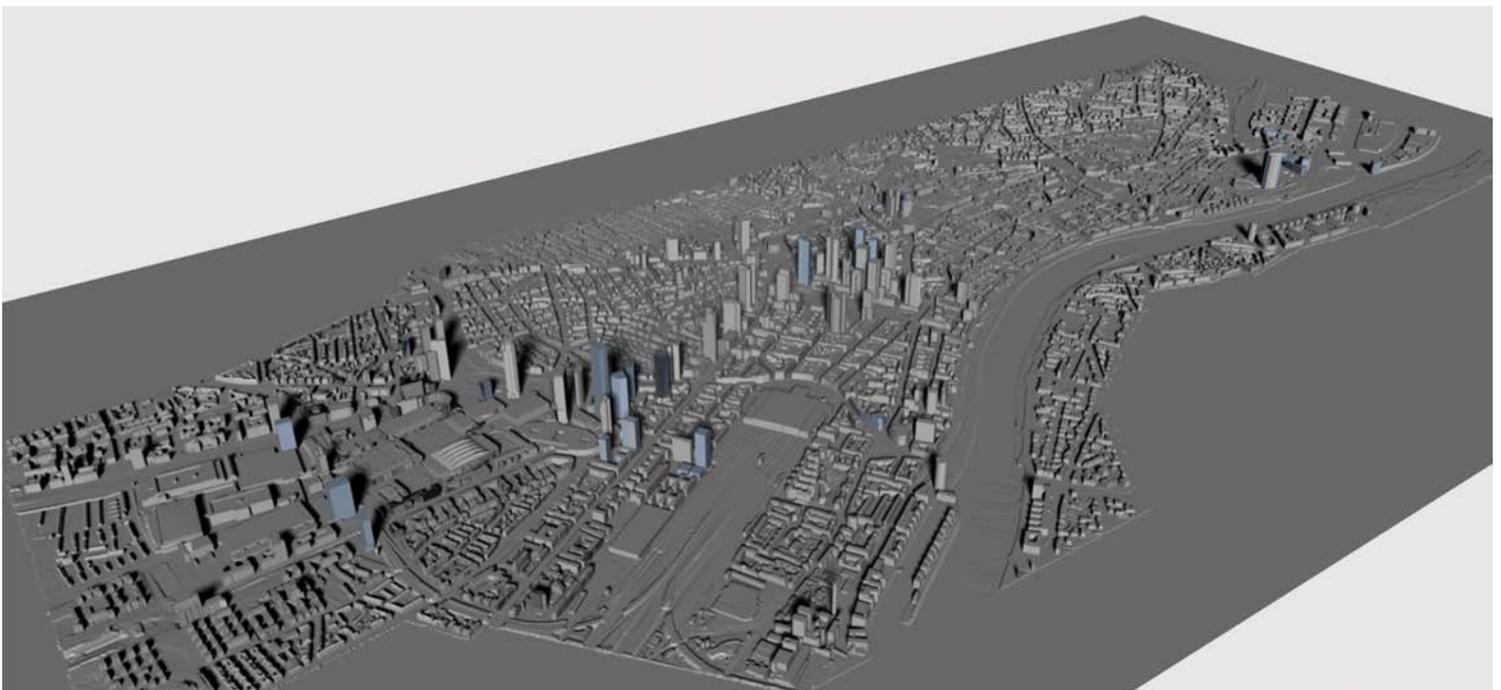
Für das Szenario „Lokale Schwachwindssysteme“ ist der Temperaturunterschied zwischen den Kaltluftströmungen und der unter Tags erwärmten Stadtluft relevant. Daher werden dem CFD-Modell in diesem Szenario an den Einlassflächen und an den Oberflächen der Gebäude und des Bodens unterschiedliche Temperaturen vorgegeben. Das Modell rechnet prinzipiell mit konstanter Dichte. Um Luftbewegungen berücksichtigen zu können, die von Temperaturunterschieden angetrieben werden, wird die Boussinesq-Näherung verwendet. Diese besagt, dass die einzigen Dichteunterschiede im Modell durch eben jene Temperaturunterschiede verursacht werden dürfen. In der Folge führen die Dichteunterschiede zu Bewegung der Luft.

METHODE DER AUSWERTUNG

Analyse und Bewertung basieren auf der Simulation der drei definierten typischen Wetterlagen einmal mit und einmal ohne die geplanten neuen Hochhausstandorte. Ein direkter Vergleich ermöglicht Angaben über die Beeinflussung der betrachteten Windsituationen durch die neuen Standorte des HEP2024.

ERKLÄRUNG DER ABBILDUNGEN: KARTEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT

Das Windfeld wird auf einem horizontalen Schnitt durch das dreidimensionale Ergebnisfeld in Form von Linien dargestellt, die den Weg der Luft zeigen. Die Windgeschwindigkeit ist anhand der Farben zu erkennen, wobei nicht die absolute Geschwindigkeit gezeigt wird, sondern eine relative Angabe in Bezug zum unbeeinflussten Windfeld in der gezeigten Auswertehöhe („Verstärkungsfaktoren“). Faktor 1,0 bedeutet dabei, dass der Wind durch die Gebäude weder verstärkt noch abgeschwächt wird. Faktoren größer als 1,0 stehen für Verstärkung. Faktoren kleiner als 1,0 stehen für Abschwächung. Diese Darstellungen gelten für eine in der Abbildung angegebene Windrichtung. Der zweidimensionale Schnitt mit den Vektoren befindet sich in unterschiedlichen Höhen (20 m, 50 m und 100 m) über dem Main.



DEFINITION DER STRÖMUNGSSZENARIEN

DIE STRÖMUNGSSZENARIEN REPRÄSENTIEREN METEOROLOGISCHE SITUATIONEN, DIE EINERSEITS HÄUFIG IM FRANKFURTER STADTGEBIET AUFTRETEN, UND ANDERERSEITS VON RELEVANZ FÜR POSITIVE BIOMETEOROLOGISCHE VERHÄLTNISSE IM STADTGEBIET SIND.

SZENARIO 01

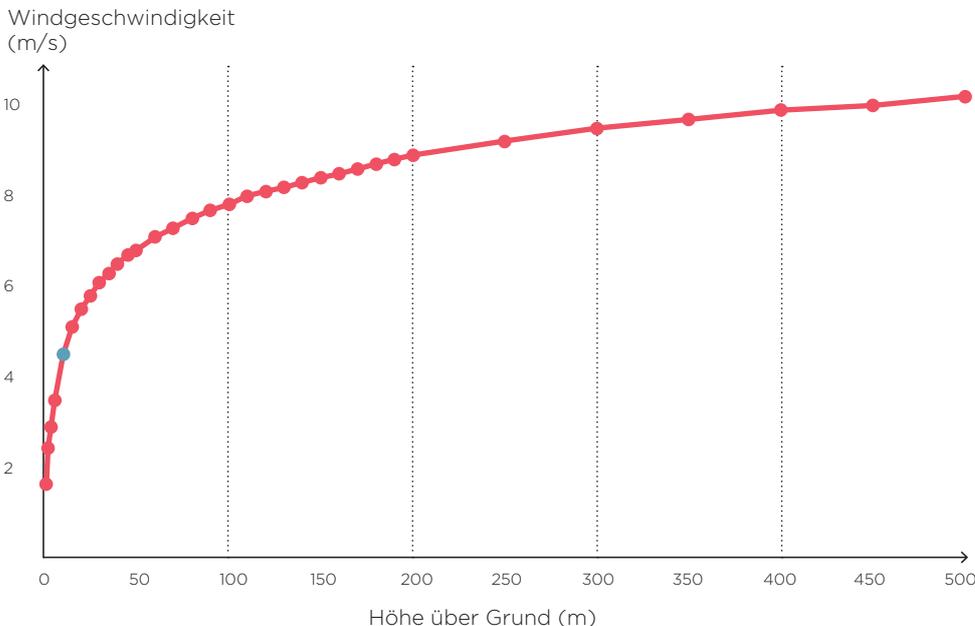
GROSSRÄUMIGE STRÖMUNG SÜDWEST

Der Windrose vom Frankfurter Flughafen folgend wird das erste meteorologische Szenario basierend auf den häufigsten Windverhältnissen in Frankfurt am Main festgelegt: SSW-Wind mit 4,5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit. Ein Blick auf die Windrose verrät, dass dies einerseits die häufigste Windrichtung ist, andererseits diese Geschwindigkeit innerhalb dieser Richtung in der häufigsten Klasse liegt. Es kann also in diesem Zusammenhang von typischen Frankfurter Windverhältnissen gesprochen werden.

Für die Windsimulationen dieses Szenarios werden dem CFD-Computermodell an dessen südlichen und westlichen Rand die Richtungs- und Geschwindigkeitswerte vorgegeben. Die Richtung ist in allen Höhen SSW, und die Geschwindigkeit ist ein vertikales Windprofil. Das bedeutet, dass am Boden die Geschwindigkeit reibungsbedingt geringer ist und mit der Höhe logarithmisch ansteigt. Die oben erwähnte mittlere Windgeschwindigkeit wird in 10 m Höhe erreicht. Das ist die meteorologische Standardmesshöhe für Windmessungen.

Die Bedeutung für die Durchlüftung der Stadt ist, dass bei diesen Wetterlagen mit guter Luftqualität und gemäßigten Temperaturen zu rechnen ist. Das Szenario enthält aus diesem Grund keine Festlegungen der Luft- oder Oberflächentemperaturen im Computermodell. Die mit diesen Windverhältnissen zusammenhängenden Wetterlagen, also unbeständiges Tiefdruckwetter, treten – abgesehen von leichten Variabilitäten – im Wesentlichen zu jeder Tages- und Jahreszeit gleich häufig auf. Der positive Durchlüftungseffekt tritt also sowohl unter Tags als auch in der Nacht auf.

Zur Absicherung der Ergebnisse werden auch die benachbarten Windrichtungen S und SW simuliert und ausgewertet. Falls diese Variationen der Hauptwindrichtung, die laut Windrose zu insgesamt 22 % des Jahres auftreten, maßgebliche Auswirkungen auf das resultierende Windfeld in der Stadt haben sollten, wird dies dokumentiert und beschrieben.



Vertikales Windprofil des einströmenden Windes am westlichen und südlichen Rand der Computerdomäne. Die Referenzgeschwindigkeit von 4,5 m/s aus der Windrose wird in 10 m Höhe erreicht (blauer Punkt).

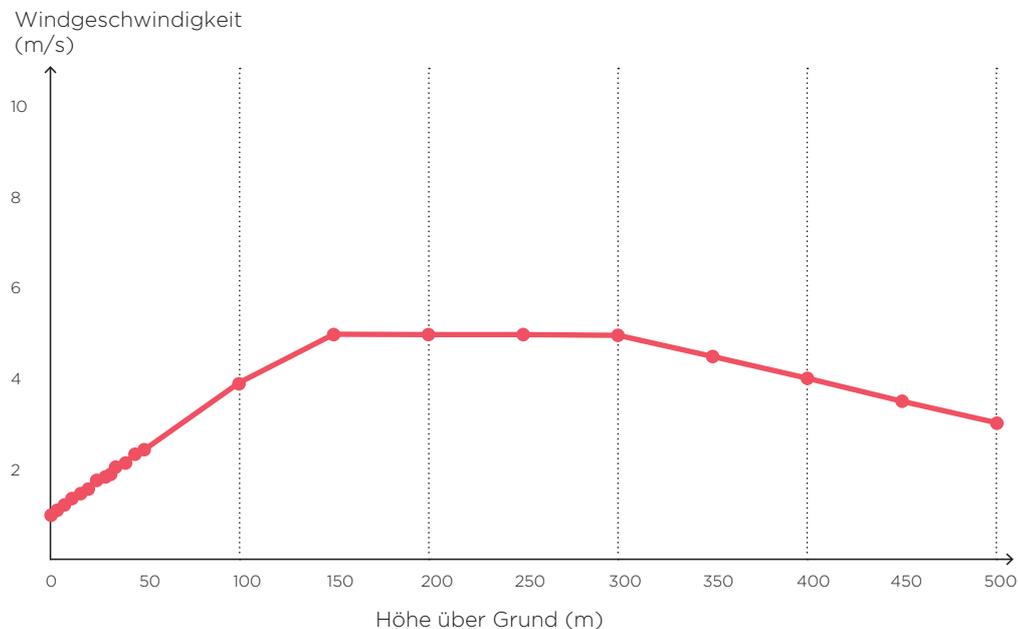
SZENARIO 02

REGIONALWINDSYSTEM WETTERAUWIND

In warmen Sommernächten während Hochdrucklagen, die zu dieser Jahreszeit häufig mit einer Hitzewelle einhergehen, sind Wettersysteme, die Abkühlung und Frischluft in das Stadtgebiet bringen, von zentraler Bedeutung. Deshalb gibt es zwei Szenarien, die auf dieses Thema eingehen. Das erste betrifft den in Frankfurt am Main bekannten Wetterauwind, der in den beschriebenen warmen Nächten, die oft Tropennächte sind, für Abkühlung im Stadtgebiet sorgt.

Aus vorheriger Beschreibung geht hervor, dass der Wetterauwind ein Regionalwindssystem ist, das in Fließgeschwindigkeit und Höhe der strömenden Luftmasse einem lokalen Kaltluftsystem überlegen ist. Die mittleren Windgeschwindigkeiten liegen häufig zwischen 2 und 4 m/s, die Richtung ist Nordost. Das damit verbundene Windsystem ist typischerweise regional angetrieben. Es entsteht aus einem Druckunterschied zwischen dem Rhein-Main-Tiefland und dem Niddatal bzw. dem Berger Rücken.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das vertikale Windprofil der Strömung an dieser Stelle. Das Profil wurde anhand der Angaben aus den vertikalen Windmessungen erstellt.



Vertikales Windprofil für den einströmenden Wetterauwind am östlichen und nördlichen Rand der Computerdomäne

LOKALE SCHWACHWINDSYSTEME

Als Grundlagen für dieses Szenario dienen die Analysekarten der lokalen Kaltluftsysteme in Frankfurt am Main aus der Stadtklima-analyse und einer weitergefasste Analyse des Raums Südhessen.

Mit Hilfe der Karten wurden drei für die gegenständliche Fragestellung relevante lokale Kaltluftsysteme identifiziert. Es sind dies:

- > Kaltluftstrom im Ostend von Norden nach Süden in Richtung Main strömend
- > Kaltluftstrom von Offenbach nach Norden über den Main strömend
- > Kaltluftstrom entlang des Gleiskörpers zum Hauptbahnhof von Südwesten nach Nordosten strömend

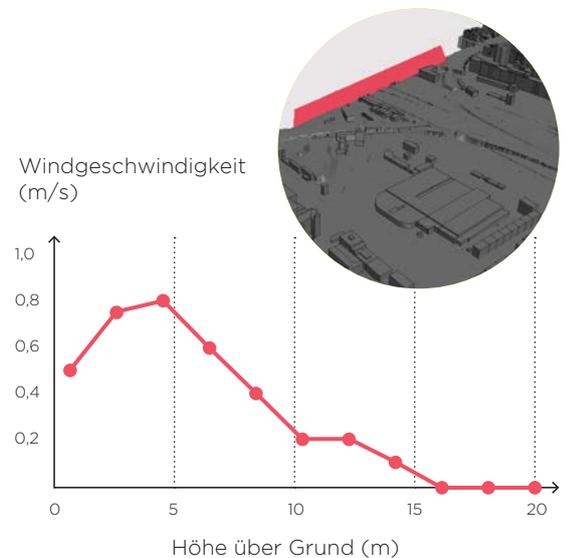
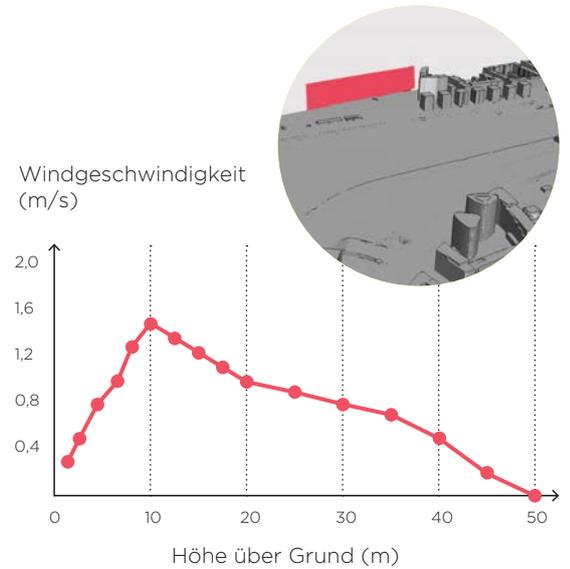
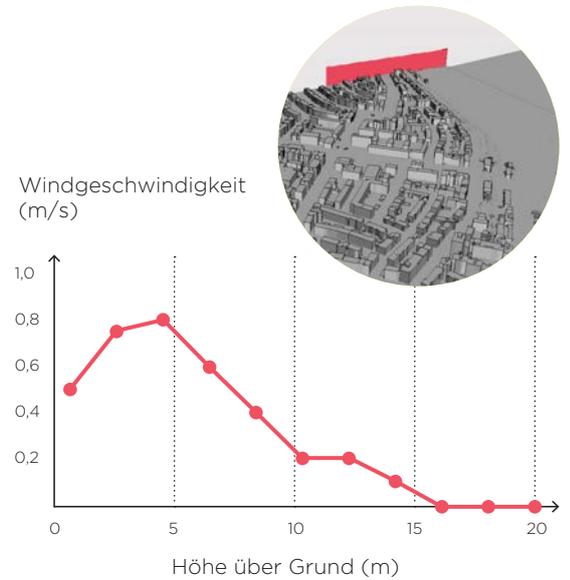
Die anderen Systeme im Stadtgebiet betreffen die Teilbereiche der zukünftigen Hochhausentwicklung nicht.

Die Eigenschaften der Kaltluftströme werden verwendet, um diese dem CFD-Modell am Rand des Untersuchungsgebiets vorzugeben. Die Kaltluftanalyse für Südhessen wurde dafür für drei unterschiedliche Höhen über dem Boden (2 m, 10 m, 20 m) durchgeführt, um ein Bild der vertikalen Struktur des jeweiligen Kaltluftsystems zu bekommen. Mit Hilfe dieser Ergebnisse und der Expertise über die typische Ausprägung von Kaltluftsystemen wurden vertikale Windprofile abgeleitet, die dem CFD-Strömungsmodell an den Einlassflächen der drei Kaltluftsysteme vorgegeben wurden.

Die nebenstehenden Darstellungen zeigen die Flächen, an der die Kaltluftströmung im Ostend, am südlichen Mainufer und auf dem Gleisfeld des Hauptbahnhofs dem CFD-Modell als Randbedingung vorgegeben werden sowie das vertikale Windprofil der Strömung an dieser Stelle.

Um für die drei Kaltluftsysteme die meteorologischen Verhältnisse einer typischen Sommernacht („Tropennacht“ mit Minimum > 20 °C) abzubilden, wurden im CFD-Modell diese Vorgaben der Temperaturen gemacht:

- > Umgebungsluft: 21 °C
- > Kaltluft am Einlass: 17 °C
- > Oberfläche der Stadt (mittlere Annahme): 27 °C
- > Gebäudeoberflächen: 37 °C



DIAGNOSE DER WINDVERHÄLTNISSE

DIE BESCHREIBUNG DER WINDFELDER DIENT ALS REFERENZZUSTAND FÜR DIE DOKUMENTATION DER VERÄNDERUNGEN AN DEN WINDFELDERN, DIE DIE GEPLANTEN NEUEN HOCHHAUSSTANDORTE VERURSACHEN WERDEN.

SZENARIO 01

GROSSRÄUMIGE STRÖMUNG SÜDWEST

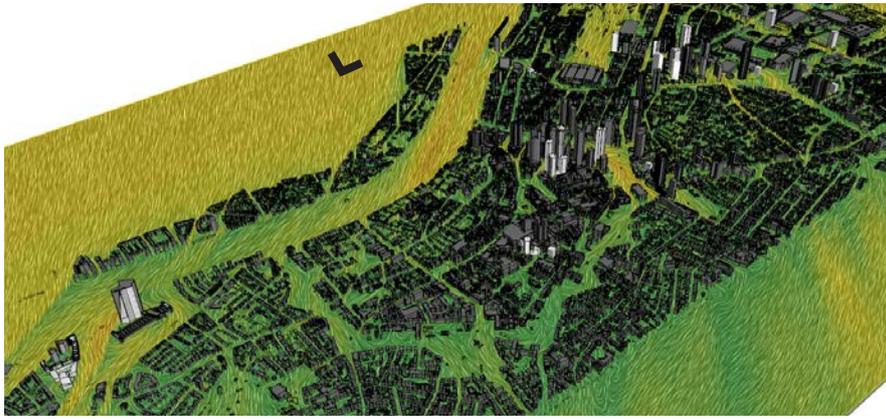
Das dreidimensionale Strömungsfeld im Untersuchungsgebiet wird in Form von horizontalen Schnitten in unterschiedlichen Höhen dargestellt. Die ersten beiden nebenstehenden Darstellungen zeigen das Windfeld in Form von Vektoren in einer Höhe von 20 m über dem Main. Die Farben stellen die Verstärkungsfaktoren dar. Diese sind größer als 1,0, wenn die Bebauung der Stadt eine lokale Verstärkung des Windes verursacht, etwa durch Kanalisierungseffekte. Bei Faktoren kleiner als 1,0 wird die Strömung durch Hindernisse abgeschwächt. Die Faktoren beziehen sich immer auf die in der entsprechenden Auswertehöhe „ungestörte“ Windgeschwindigkeit im Anströmbereich im Luv der Stadt.

In dieser Höhe von 20 m ist das Windfeld stark von der Bebauung der Stadt beeinflusst. Der Wind wird im Flussbett des Mains und in großen Straßenzügen kanalisiert. Für die Belüftung heißt das, dass Straßenzüge, die SW-NO ausgerichtet sind, relativ hohe Windgeschwindigkeiten und rasche Luftwechsel aufweisen. An den Farben der Vektoren ist zu erkennen, dass der Wind stellenweise nicht

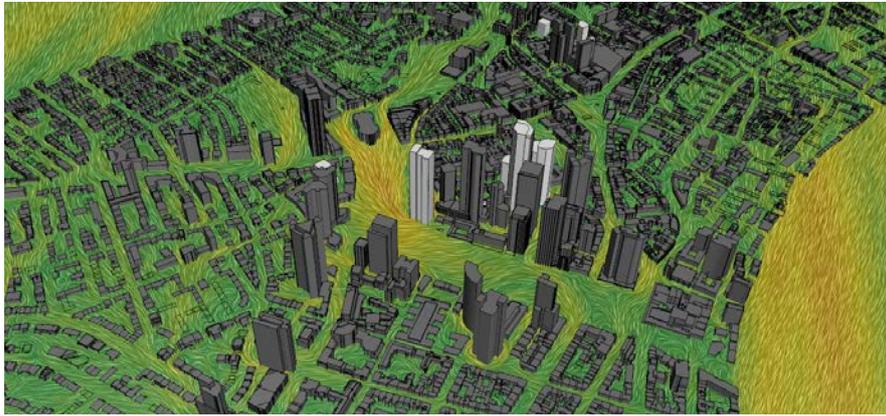
abgeschwächt wird (gelbe Farben, Faktoren um 1,0). Über dem Main, östlich der Europäischen Zentralbank oder Ecke Neue Mainzer Straße / Junghofstraße wird die Strömung verstärkt (orange Farben, Faktoren größer als 1,0).

Der Schnitt in 50 m ist in einer Höhe, die nur mehr von Hochhäusern erreicht wird. Das Windfeld ist daher bereits wesentlich homogener als jenes in 20 m Höhe. Die Windrichtung ist nun fast überall SW, die gelben Farben überwiegen, also unveränderte Windgeschwindigkeiten. Im Nahbereich der Hochhäuser kommt es zu Verstärkungen der Windgeschwindigkeiten, im Lee der Gebäude zu Bereichen mit Abschwächung (Windschatten). Nordöstlich des Bankenviertel, in dem zahlreiche Gebäude diese Auswertungshöhe erreichen, entsteht ein relativ großer Windschattenbereich.

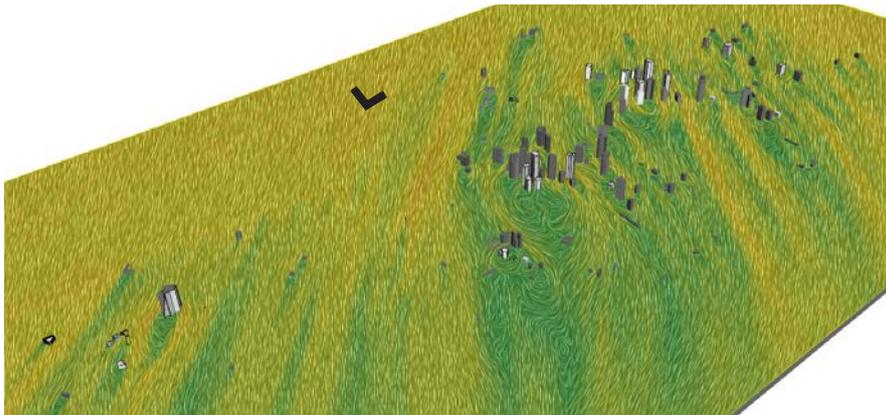
Auf der Auswertehöhe 100 m über dem Main sind nur mehr wenige Hochhäuser sichtbar. Einen großen Windschatten erzeugt aufgrund der Ausrichtung ihrer Breitseite die Europäische Zentralbank links im Bild. Das Bankenviertel schwächt das Windfeld auch in dieser Höhe am stärksten.



20 m über Grund



Detailansicht Bankenviertel
20 m über Grund



50 m über Grund



100 m über Grund

Ansicht auf das Untersuchungsgebiet mit einem horizontalen Schnitt durch das Windfeld für SW-Wind in 20 - 100 m Höhe über dem Main. Die Bestandsgebäude sind dunkelgrau, die planungsrechtlich zulässigen Neubauprojekte sind hellgrau. Blickrichtung Südwesten. Der schwarze Pfeil zeigt die Einströmrichtung.

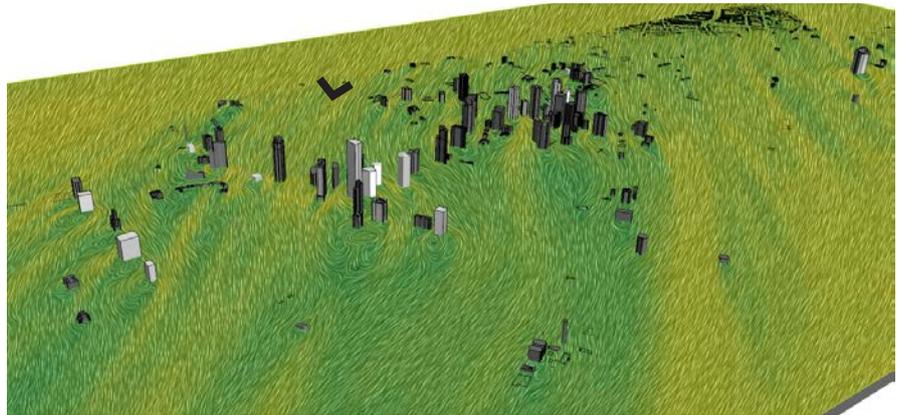
VERSTÄRKUNGSFAKTOR



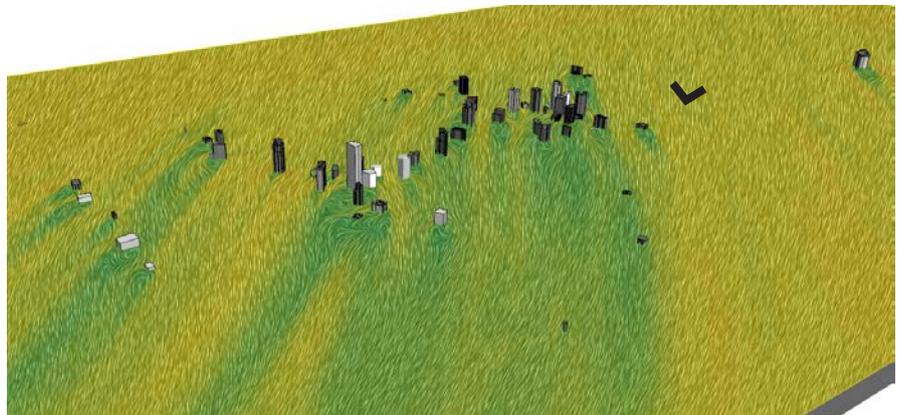
20 m über Grund



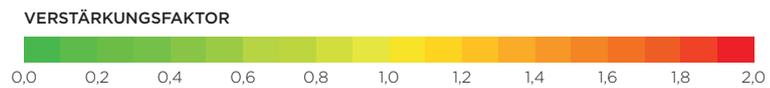
50 m über Grund



100 m über Grund



Ansicht auf das Untersuchungsgebiet mit einem horizontalen Schnitt durch das Windfeld für NO-Wind in 20 - 100 m Höhe über dem Main. Die Bestandsgebäude sind dunkelgrau, die planungsrechtlich zulässigen Neubauprojekte sind hellgrau. Blickrichtung Nordosten. Der schwarze Pfeil zeigt die Einströmrichtung.



SZENARIO 02

REGIONALWINDSYSTEM WETTERAUWIND

Das Strömungsfeld des Wetterauwindes in 20 m Höhe unterscheidet sich deutlich von jenem der großräumigen Strömung. Einerseits kommt es aus der entgegengesetzten Richtung, weshalb die Muster der Verstärkungen und Abschwächung um 180° gedreht sind. Andererseits ist die Strömung schwächer und vertikal weniger mächtig, sodass die Strömungsmuster in den Straßen und um die Gebäude weniger stark ausgeprägt sind. Die ursprüngliche Strömungsgeschwindigkeit wird durch die Gebäude der Stadt stark reduziert. Die Verstärkungsfaktoren liegen durchgehend deutlich unter 1,0. Nur über dem Main, im Umfeld der Europäischen Zentralbank und im Bereich der Ludwig-Erhard-Anlage kommen sie nahe 1,0.

Auch im Schnitt in 50 m Höhe zeigt sich das Windfeld relativ homogen. Überall dort, wo keine Hochhäuser stehen, ist das Feld mit Faktoren nahe 1,0 annähernd unbeeinflusst. Im Lee der Gebäude entstehen großflächige Windschattenbereiche mit Faktoren zwischen 0,2 und 0,4. Analog dazu ist das Strömungsfeld in 100 m Höhe über dem Main ausgebildet.

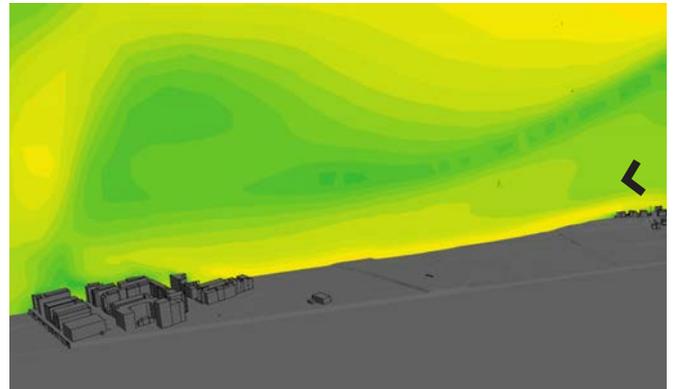
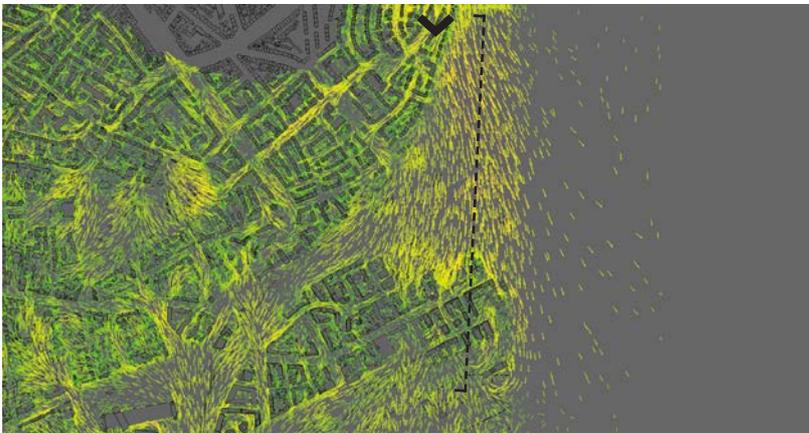
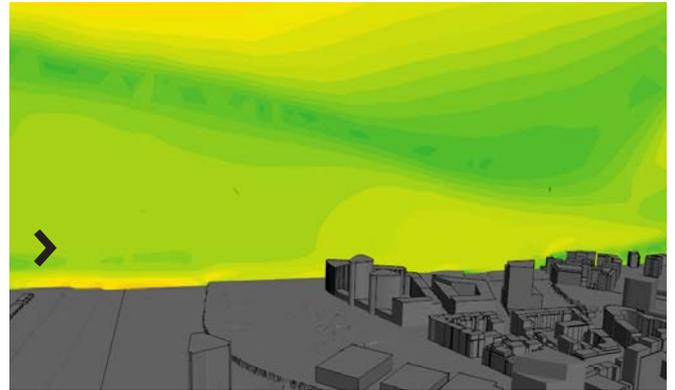
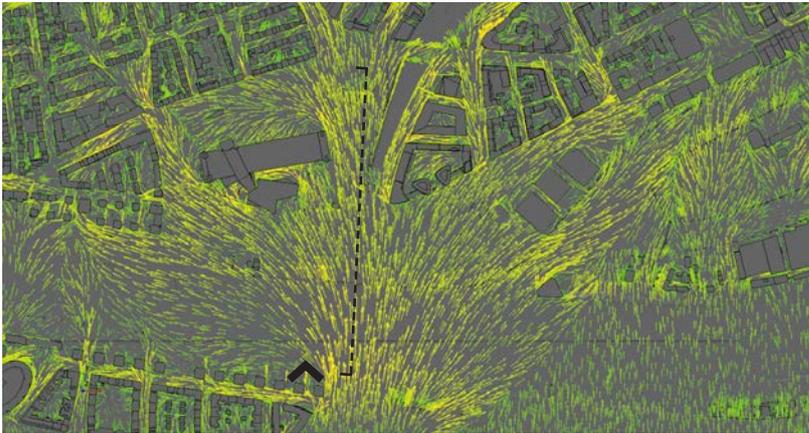
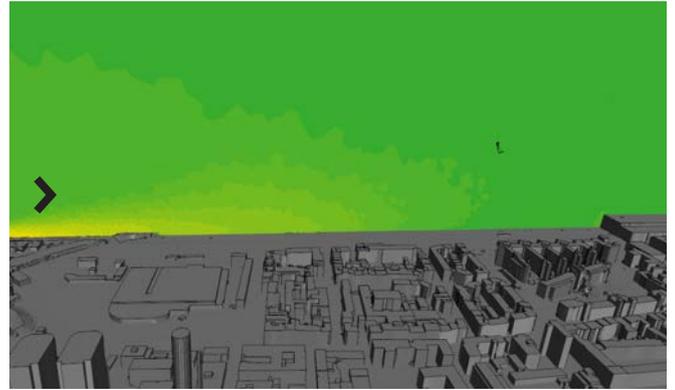
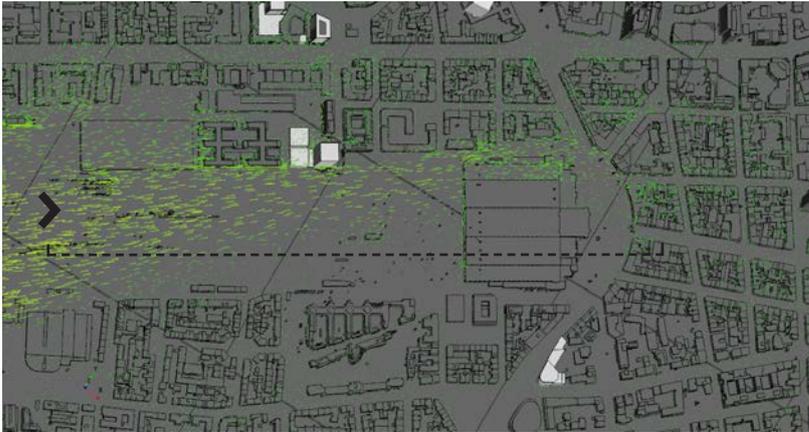
LOKALE SCHWACHWINDSYSTEME

Die Strömung im Bereich der **Gleisanlagen, die zum Hauptbahnhof führen**, ist schwach ausgeprägt. Im Schnitt in 20 m Höhe ist sie nicht mehr erkennbar. In 10 m Höhe beträgt die Strömungsgeschwindigkeit rund 0,2 m/s und in 2 m Höhe 0,8 m/s. Aufgrund der Tatsache, dass links und rechts der Gleisanlagen höhere Gebäude eine Schneise für die Luft bilden, beschränkt sich die Strömung auf die Gleisanlagen. Die Strömungsrichtung ist in der Analysekarte Südhessen nicht eindeutig, was auf einen streng lokal limitierten Kaltluftstrom schließen lässt.

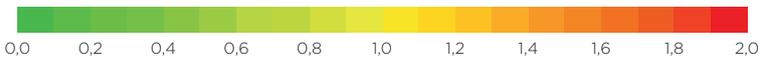
Die CFD-Analyse gibt dieses Bild gut wieder: die Strömung wird durch die Bodenreibung rasch abgebremst und weist beim Hauptbahnhof rund 0,2 m/s mit geringer Höhe auf. Nach zwei Häuserblöcken hinter dem Hauptbahnhof ist die Strömung vernachlässigbar. Daraus ist zu schließen, dass diese Kaltluftströmung keine biometeorologische Relevanz für östlicher gelegene Stadtteile hat. Jene Bereiche, die von diesem System profitieren, beschränken sich daher jeweils auf den ersten Häuserblock nördlich und südlich der Gleisanlagen und auf zwei Häuserblöcke östlich des Bahnhofs.

Der Kaltluftstrom **von Offenbach nach Norden über den Main** strömend überquert ungebremst den Main und strömt danach durch die Straßen nordwestlich, nördlich und nordöstlich auseinander. Im Nordosten trifft er auf den Kaltluftstrom Ostend, im Norden reicht er etwa bis zur Hanauer Landstraße. Über dem Main beträgt seine Höhe rund 20 m, danach wird er durch die Bebauung aufgewirbelt und tritt vor allem in den Straßenschluchten auf. Dieser Kaltluftstrom hat somit bioklimatische Bedeutung für den Bereich nördlich des Mains zwischen Zentralbank und Architekturmuseum.

Der Kaltluftstrom im **Ostend von Norden nach Süden** in Richtung Main strömend wird in der CFD-Simulation gut reproduziert, wobei weitere Details erkennbar werden. Zunächst strömt er vorwiegend von Norden nach Süden mit Geschwindigkeiten um die 3 m/s. Auffällig ist, dass die Strömung im Bereich der Sportplätze und des Ostparks kaum abgebremst wird, wohingegen der dicht verbaute Bereich von Bornheim westlich davon dazu führt, dass sich die Strömung dort vor allem auf die Nord-Süd ausgerichteten Straßenzüge beschränkt. Dort, wo südlich des Ostparks höhere Häuserblöcke beginnen, wird die Strömung im Wesentlichen abgebremst und sie verliert ihre bioklimatische Wirksamkeit. Nach Südwesten kann die Strömung entlang der Gleisanlagen noch bis in den Bereich Wim-Duisenberg-Platz ausgreifen. Im Bereich der Hafenbecken hat sich – in Übereinstimmung mit den Kaltluftanalysen – bereits die nach Norden gerichtete Strömung vom anderen Mainufer durchgesetzt. Die simulierte Temperaturverteilung in 5 m Höhe zeigt, dass sich der Bereich mit Abkühlung – und somit einem positiven bioklimatischen Effekt für die Bevölkerung – auf Teile von Bornheim, die Sportanlagen, den Ostpark und einige Häuserblöcke südlich der Gleisanlagen erstreckt.



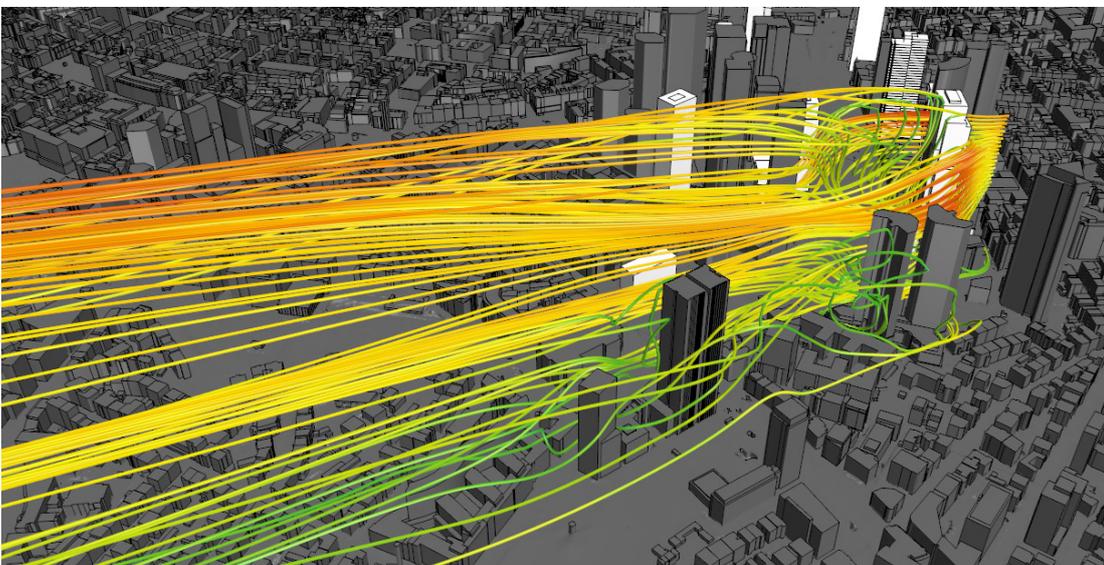
WINDGESCHWINDIGKEIT (M/S)



Vertikalschnitt und Draufsicht (5 m über Grund) der betrachteten Kaltluftströme. Die Farben und Längen der Windvektoren korrespondieren mit den Verstärkungsfaktoren relativ zur Anströmgeschwindigkeit. Der schwarze Pfeil zeigt die Einströmrichtung.

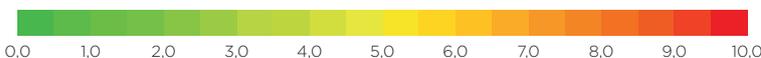
VERÄNDERUNGEN DER WINDVERHÄLTNISSE DURCH DIE NEUEN HOCHHAUSSTANDORTE

DIE UNTERSCHIEDE ZWISCHEN DEN WINDFELDERN MIT UND OHNE DIE NEUEN HOCHHAUSSTANDORTE WERDEN MIT HILFE VON DIFFERENZENFELDERN GEZEIGT. DAFÜR WERDEN AN JEDEM GITTERPUNKT DIE WERTE DER WINDGESCHWINDIGKEIT DES IST-STANDS VOM PLANSTAND ABGEZOGEN. SOMIT SIND DIE DIFFERENZEN POSITIV, WENN DIE NEUEN HOCHHAUSSTANDORTE HÖHERE WINDGESCHWINDIGKEITEN VERURSACHEN, ETWA DURCH KANALISIERUNGSEFFEKTE. DIE DIFFERENZEN SIND NEGATIV, WENN DIE NEUEN STANDORTE GERINGERE GESCHWINDIGKEITEN VERURSACHEN, Z. B. DURCH ABSCHIRMUNG DES WINDES (LEE-EFFEKTE).



Beeinflussung der Strömung durch Hochpunkte. Hier gezeigt am Beispiel einiger Hochhäuser im Bankenviertel bei SW-Wind anhand von Stromlinien. Die Farben geben die Windgeschwindigkeit an.

WINDGESCHWINDIGKEIT (M/S)



ERWARTBARE BEEINFLUSSUNG DER STRÖMUNG DURCH HOCHPUNKTE

Bei der Bewertung der Auswirkungen der unterschiedlichen Strömungsfelder durch die neuen Hochhausstandorte, wird an mehreren Stellen der Begriff „erwartbar“ verwendet. Damit ist gemeint, dass ein Hochpunkt grundsätzlich in einem bestimmten Ausmaß auf eine bestimmte Länge im Lee des Gebäudes die Strömung verändert. In der Folge wird dieses „erwartbare“ Muster beschrieben.

Am Boden und innerhalb der Straßenzüge bildet sich ein komplexes Muster aus Verstärkungen und Abschwächungen aus, das nicht allgemein darstellbar ist. Es ist von Standort zu Standort verschieden. In dieser Höhe gibt es daher kein „erwartbares“ Ausmaß der Veränderung.

Anders ist das oberhalb des mittleren Dachniveaus: Der Schnitt in 100 m Höhe zeigt, dass in größeren Höhen längliche Bereiche mit vor allem Abschwächung, aber auch stellenweise Verstärkung der Windgeschwindigkeit entstehen. Diese wechseln sich mit ebenso länglichen Verstärkungsbereichen ab. Diese dreidimensionalen Strukturen entstehen, da die Gebäude die Strömung vertikal und horizontal verdrängen. In dieser Höhe ist die Strömung frei von Hindernissen und deshalb wesentlich laminarer (d. h. gleichförmiger, turbulenzärmer und mit weniger vertikalen Ausschlägen) als in Bodennähe. Das bedeutet, dass sich Störungen in der Strömung weiter fortsetzen als in Bodennähe. Üblicherweise beträgt die Länge des Einflussbereichs von Strömungshindernisse 5 bis 30 Hindernishöhen stromabwärts des Hindernisses, abhängig von geometrischen Faktoren des Hindernisses und von der Stabilität (im Sinne einer Empfind-

lichkeit für vertikale Ausschläge) der strömenden Luft. Der aus zahlreichen Hochhäusern bestehende Cluster in Frankfurt am Main wirkt wie ein äußerst komplexer Hinderniskörper auf die Strömung. Nimmt man daher eine mittlere Einflusslänge an (15 Hindernishöhen), so kommt man bei 100 bis 200 m hohen Gebäuden auf eine Länge des Einflussbereichs der Strömung von rund 1,5 bis 3 km.

In der nebenstehenden Abbildung sind die unterschiedlichen Bereiche der Strömungsbeeinflussung zu erkennen: Direkt an den Ecken des Hochpunkts wird die Strömung verstärkt. Unmittelbar dahinter entsteht ein massiver Windschatten mit einem Gegenwirbel, der eine vertikale Achse hat. In einiger Entfernung zum Gebäude tendiert die Strömung dazu, wieder die Form von vor dem Hindernis anzunehmen. Die Geschwindigkeit bleibt noch 5 bis 30 Hindernishöhen verringert. Wenn mehrere Hochhäuser einen Cluster bilden, interferieren die Strömungsmuster und es entsteht ein komplexes Muster.

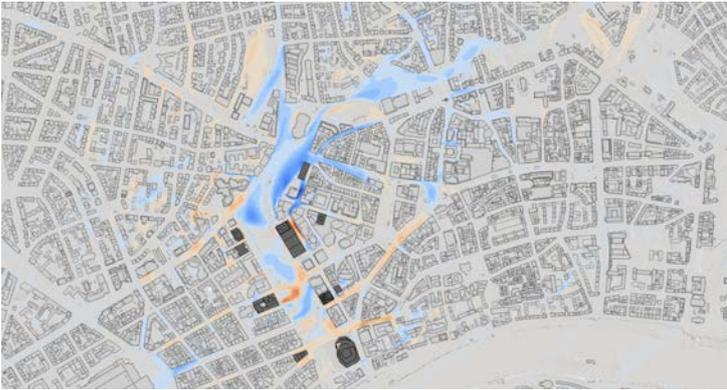
Für die Beurteilung der Reduktion der Belüftung wird davon ausgegangen, dass sich eine oben beschriebene „erwartbare“ Beeinflussung der Strömung nicht abwenden lässt. Liegen auffällige, darüber hinausgehende Effekte vor, werden diese benannt und Lösungsvorschläge formuliert.

GROSSRÄUMIGE STRÖMUNG SÜDWEST

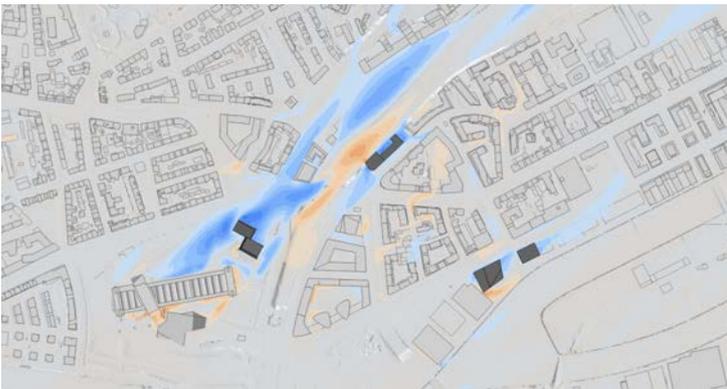
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Unterschiede in 20 m über dem Main. Das Bild ist differenziert, da die neuen Standorte sowohl lokale Verstärkungen der Windgeschwindigkeit verursachen (rote Bereiche), als auch blockierende Effekte und Abschwächungen der Windgeschwindigkeit (blaue Bereiche). Auffallend ist, dass die verstärkenden Effekte meistens lokal eng begrenzt sind, während die Abschwächungen einen größeren Bereiche betreffen.



20 m über Grund



20 m über Grund



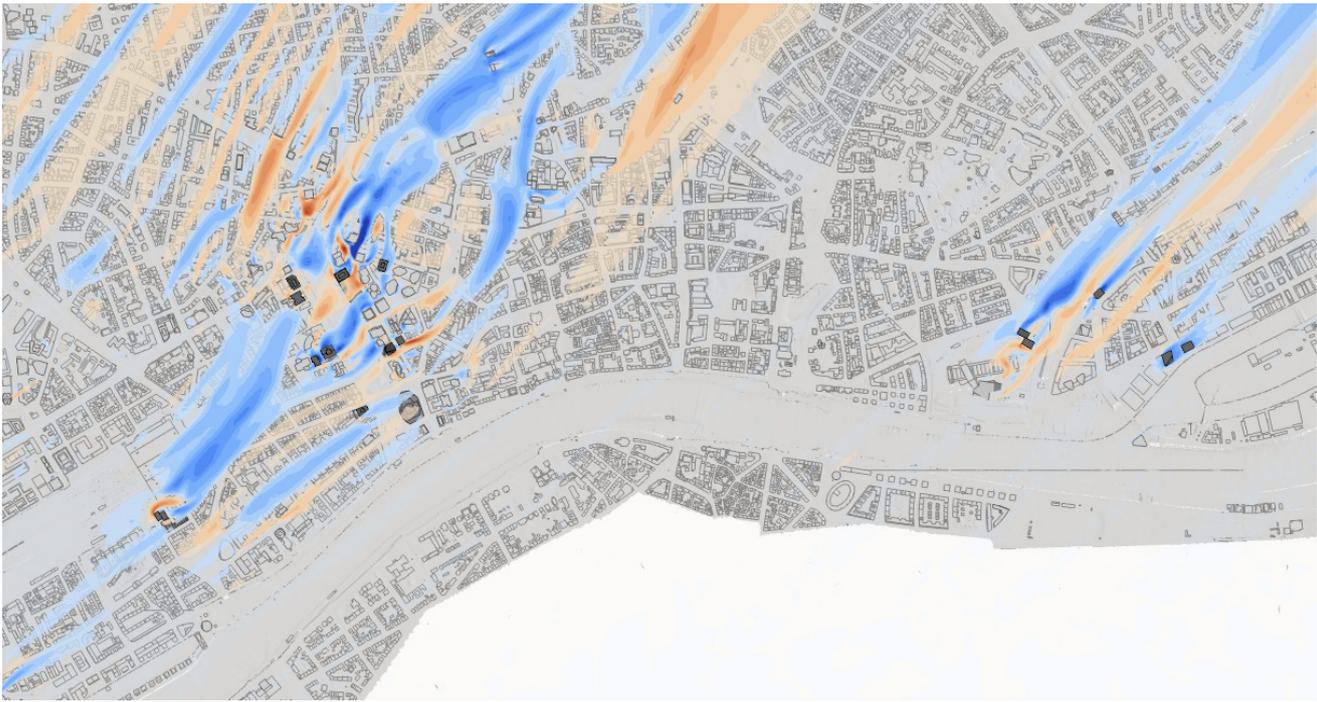
20 m über Grund

Die Verstärkungen kommen oft zu Stande, indem Luft von den Hochhäusern abwärts abgelenkt wird („Abwinde“), und so höhere Windgeschwindigkeiten das Straßenniveau erreichen als ohne Hochhaus. Zusätzlich wird die Luft in engen Straßenzügen kanalisiert und somit die Geschwindigkeit erhöht. In einigen Fällen treten auch Wechselwirkungen zwischen einem geplanten und einem bestehenden Gebäude auf.

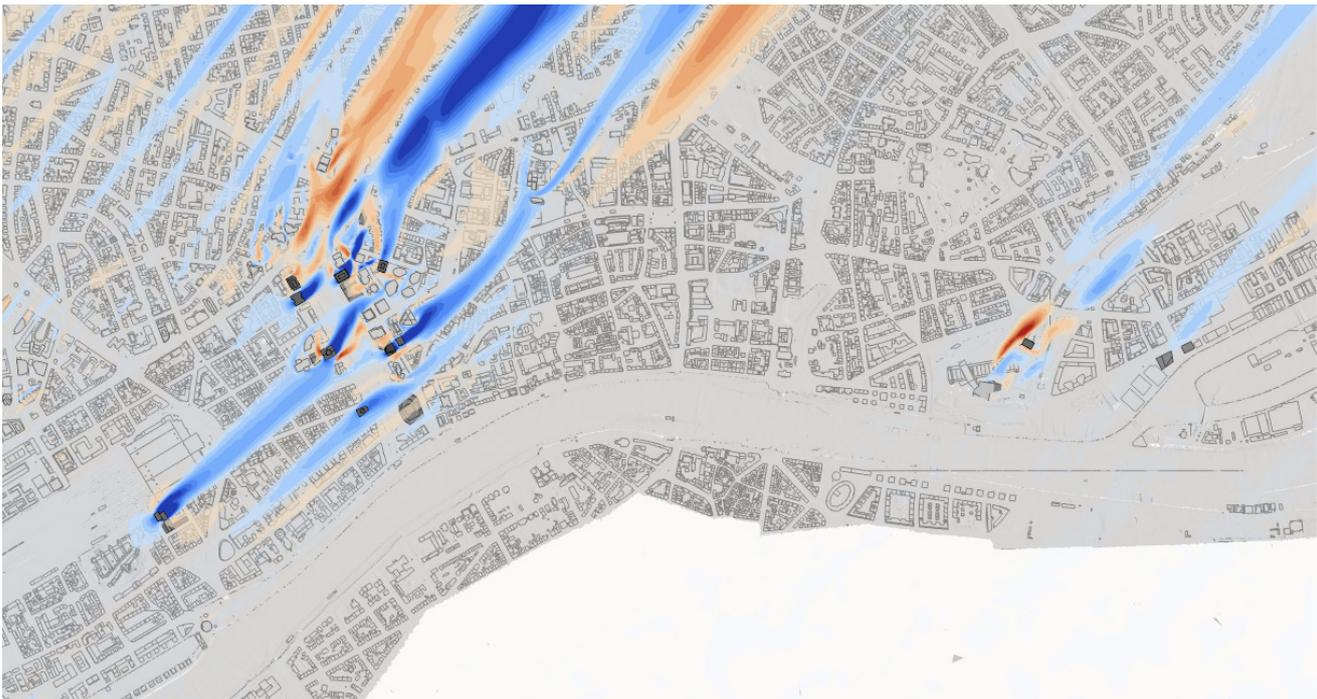
Diese Effekte sind z. B. beim Hochhausstandort südlich des Hauptbahnhofs („Campanile“) zu erkennen. In den breiten, großzügigen Freiräumen im Bankenviertel tritt dieser Effekt nur vereinzelt auf. Dort dominieren die abschwächenden Effekte. Auffallend ist etwa die großflächige Reduktion der Windgeschwindigkeit auf der nordöstlichen Taunusanlage bis hin zum Opernplatz. Das kommt daher, dass dort im Ist-Stand ein ebenso großer Bereich mit deutlicher Verstärkung der Windgeschwindigkeit durch das Hochhaus an der Junghofstraße bestand. Durch den Windschatten des neuen Standorts 09 in der Neuen Mainzer Straße fällt dieser Verstärkungsbereich beinahe vollständig weg. Der Effekt von Standort 09 auf das Windfeld ist also, dass die Gefahr von geringem Windkomfort auf der Taunusanlage abgewendet wird.

Auf dem Schnitt im 50 m Höhe verändern sich die Muster im Windfeld im Vergleich zum Schnitt in 20 m Höhe. Die abgeschatteten Bereiche im Lee der Hochhäuser werden länger. Kanalisierungseffekte zwischen Gebäuden treten nur mehr vereinzelt auf. Die Streifen mit leichten Verstärkungen und Abschwächungen im Nordwesten, wo es keine neuen Hochhausstandorte gibt, sind modellbedingte numerische Effekte, die in Realität nicht zu beobachten sein werden.

Der Schnitt in 100 m Höhe zeigt, dass in größeren Höhen längliche Bereiche mit vor allem Abschwächung, aber auch stellenweise Verstärkung der Windgeschwindigkeit entstehen. Diese wechseln sich mit ebenso länglichen Verstärkungsbereichen ab. Diese dreidimensionalen Strukturen entstehen, da die Gebäude die Strömung vertikal und horizontal verdrängen.

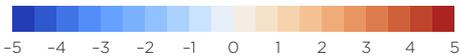


50 m über Grund



100 m über Grund

DIFFERENZEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT (M/S)



REGIONALWINDSYSTEM WETTERAUWIND

Beim Szenario Wetterauwind sind die Unterschiede in den Strömungsfeldern geringer als im Fall der großräumigen Strömung. Die Strömung ist weniger mächtig (geringere Höhe und geringere Strömungsgeschwindigkeit), weshalb sie schon deutlich schwächer am Hochhausstandort südlich des Hauptbahnhofs ankommt und in der Folge von diesem weniger deutlich verändert wird.



20 m über Grund



20 m über Grund



20 m über Grund

Die Veränderungen der Strömung im Bankenviertel fallen ebenso kleinräumiger aus. Dennoch ist zu beobachten, dass es in der Gallusanlage zu einer großflächigen Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit kommt. Die Kanalisierung zwischen dem Neubau-Entwurfs der Oper am Willy-Brand-Platz und des westlich davon gelegenen Häuserblock ist die einzige nennenswerte Verstärkung der Strömung.

Im Bereich Ostend besteht der auffälligste Effekt aus den Abschwächungen an der Europäischen Zentralbank. Und das, obwohl das Bestandsgebäude in beiden Szenarien gleich ist. Diese Strömungsabschwächungen, die jedoch auf den Main und das nördliche Ufer, bzw. die Weseler Werft beschränkt bleiben, resultieren aus dem Verdrängungseffekt des neuen Hochhausstandortes stromaufwärts des ikonischen Bestandsgebäudes. Da das Bestandsgebäude genau im Windschatten des neuen Standortes liegt, fällt ein großer Teil der „Corner-Effect“ genannten Verstärkungsbereiche links und rechts des Bestandsgebäudes weg, was in der gezeigten Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit deutlich wird. Dafür bildet sich die Verdrängung und somit die Beschleunigung der Strömung jetzt am Sockel des neuen Hochhausstandortes aus.

Auf den Schnitten in 50 m und 100 m Höhe ist zu erkennen, dass die neuen Hochhausstandorte relativ lange Windschattenbereiche verursachen. Die Reduktion der Windgeschwindigkeiten ist jedoch mit maximal 1 m/s gering. Nur unmittelbar im Lee der Hindernisse ist die Abnahme mit bis zu 3 m/s deutlich. Wie zuvor erklärt, entsteht durch die in diese Höhen (oder knapp darunter) reichenden Gebäude ein dreidimensionales Muster aus Verstärkungen und Abschwächungen, die jedoch im erwartbaren Ausmaß liegen.

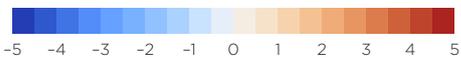


50 m über Grund



100 m über Grund

DIFFERENZEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT (M/S)



SZENARIO 03

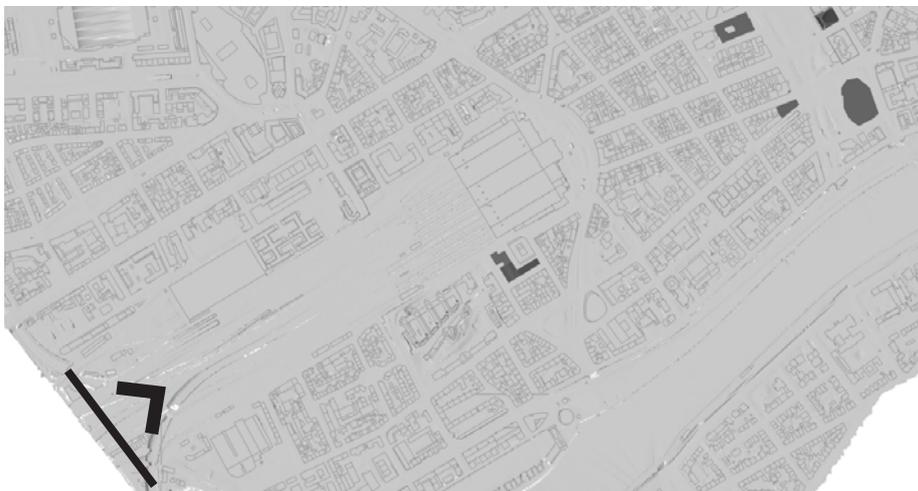
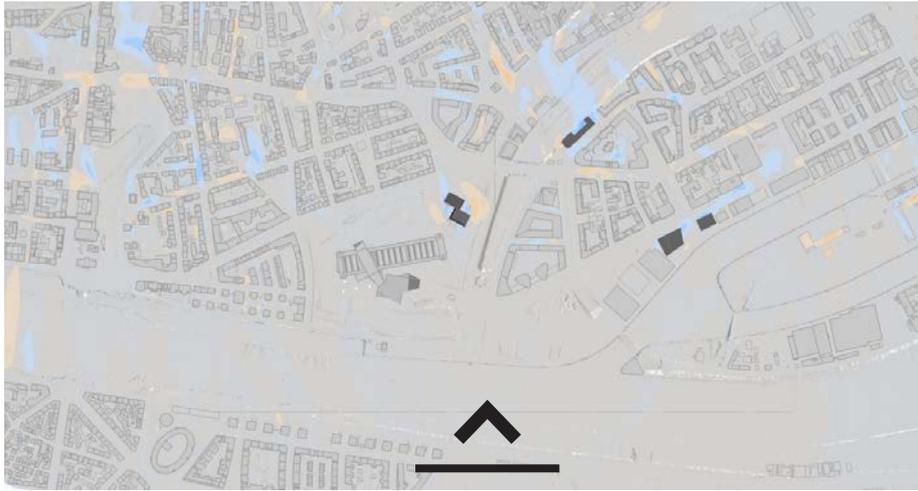
LOKALE SCHWACHWINDSYSTEME

Der **Kaltluftstrom von Offenbach nach Norden** über den Main wird durch die geplanten Gebäude punktuell abgeschwächt. Diese Effekte beschränken sich aber auf das unmittelbare Gebäudeumfeld und haben für die Belüftung des Stadtviertels keine Konsequenz.

Zu einer deutlichen Abschwächung des Kaltluftstroms kommt es im Lee des Standorts 12 in der Ferdinand-Happ-Straße. Dieser Bereich erstreckt sich über die Bahnanlage hinweg bis zur Henschelstraße und betrifft ausschließlich den Ostbahnhof und die Gleisanlagen. Der größere Einflussbereich dieses Gebäudes ist darauf zurückzuführen, dass sich die Strömung auf der Bahnanlage grundsätzlich weiter ausbreiten kann als in den Straßenzügen. Somit wirkt sich auch eine Abschwächung stärker aus.

Auf das **Schwachwindssystem im Ostend** haben die neuen Hochhausstandorte keinen Einfluss. Die über den Ostpark nach Süden strömende Kaltluft gelangt nicht bis zu den neuen Hochhausstandorten in der F.-Happ-Straße und Mayfarthstraße, da diese Gebiete hauptsächlich im Einflussbereich des von Süden über den Main einströmenden Kaltluftsystems liegen. Es kommt daher im ganzen Gebiet zu keiner Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit durch die neuen Hochhausstandorte.

Ebenso verhält es sich mit dem **Schwachwindssystem über der Gleisanlage am Hauptbahnhof**. Am einzigen neuen Hochhausstandort in diesem Bereich in der Pforzheimer Straße ist die Windgeschwindigkeit im Ist-Zustand für dieses Szenario annähernd 0,0 m/s. Es kommt im ganzen Gebiet zu keiner Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit durch den neuen Hochhausstandort.



DIFFERENZEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT (M/S)



Differenzen der Windgeschwindigkeit in 20 m über dem Main. Negative Werte (blau) bedeuten, dass der Wind durch die neuen Hochhausstandorte abgebremst wird. Positive Werte zeigen, dass der Wind verstärkt wird (rot). Die dunklen Gebäude sind die neuen Hochhausstandorte. Die schwarze Linie zeigt die Position der Einlassfläche und der Pfeil die Strömungsrichtung.

SCHATTENSTUDIE

DIE UNTERSUCHUNG DER SCHATTENVERHÄLTNISSE WURDE MIT DEM GIS-BASIERTEM DREIDIMENSIONALEN MODELL UMEP SOWOHL FÜR DEN BESTAND ALS AUCH DEN PLANSTAND UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER NEU GEPLANTEN HOCHHAUSSTANDORTE DURCHGEFÜHRT, UM DEN ZUSÄTZLICHEN SCHATTENWURF, DEN DIE NEUEN BAUKÖRPER VERURSACHEN WERDEN, ZU ILLUSTRIEREN.

HIERZU WURDEN DIE GEBÄUDE DER FRANKFURTER INNENSTADT SOWIE DIE UMGEBUNG IM BESTAND ZUM SELBEN AKTUALITÄTSSTAND WIE FÜR DIE WINDUNTERSUCHUNG IN EINEM GIS (GEOGRAPHISCHES INFORMATIONSSYSTEM) NACHGEBILDET (GEBÄUDEUMRISSE UND HÖHEN). BÄUME WURDEN NICHT IN DAS MODELL ÜBERNOMMEN.

METHODE DER AUSWERTUNG

Für die Stichtage 21. März, 21. Juni, 21. September und 21. Dezember wurden Berechnungen der Sonnenstände jeder Stunde durchgeführt. Das verwendete Modell rechnet auf Rasterbasis (1x1 m). Die jeweiligen Ergebnisse wurden in Karten übertragen, die die Stunden mit Schatten pro Tag (pro Rasterzelle) auf den Oberflächen der Straßen und Gebäude ausweisen.

Die Abbildungen zeigen für die fünf Bereiche potenzieller neuer Hochhausstandorte aus dem Entwurf des Hochhausentwicklungsplans 2024 die aufsummierte Anzahl der Stunden pro Tag mit Schatten als Farbflächen ohne mögliche neue Hochhausstandorte. Der betrachtete Entwicklungsteilbereich ist mit einer gelben Markierung gekennzeichnet. Die Umrisse der Gebäude sind schraffiert erkennbar. Die Auswertungen dienen als Referenzzustand für den Vergleich der Beschattung im Falle der Umsetzung neuer Standorte. Die Gebäudehöhen entsprechen den Firsthöhen. Topographie wird nicht berücksichtigt (Mittlere Seehöhe 112 m angenommen).

Die geometrisch maximal mögliche Anzahl der Sonnenstunden ist von der Zenithöhe der Sonne am betrachteten Tag des Jahres abhängig. Der Tag mit den meisten möglichen Sonnenstunden ist der 21. Juni. Am Untersuchungsort sind das rund 16 Stunden. Am 21. September und am 21. März ist die maximal mögliche Sonnenscheindauer rund 12 Stunden und am 21. Dezember beträgt sie am Untersuchungsort 8 Stunden. Dem folgend reichen auch die Legenden in den Differenzabbildungen bis zu den maximal möglichen Veränderung. Der Schattenwurf für das gegenständliche Projekt wird jeweils für die geometrisch maximal möglichen Sonnenstunden ausgewertet:

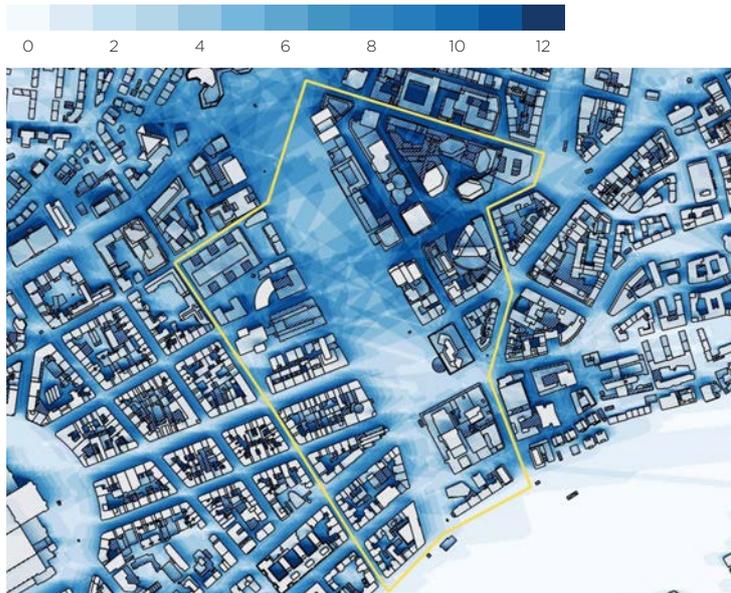
- > 21. März: MEZ (= UTC+1)
- > 21. Juni: MESZ (= UTC+2)
- > 21. September: MESZ (= UTC+2)
- > 21. Dezember: MEZ (= UTC+1)

TB1A - BANKENVIERTEL

SCHATTENANALYSE BESTAND

21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



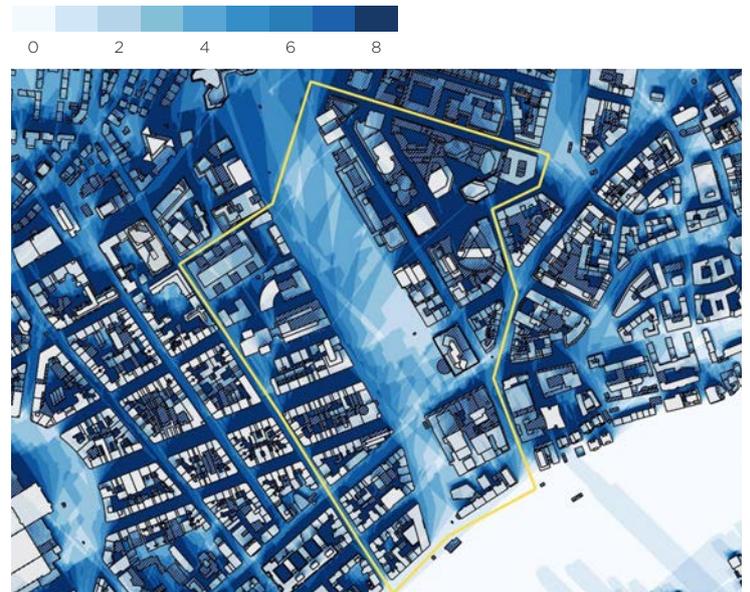
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

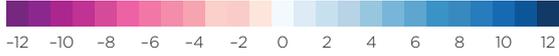
ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE HEP2024 (DIFFERENZ)

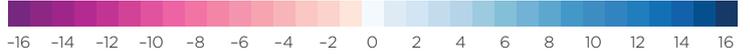
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



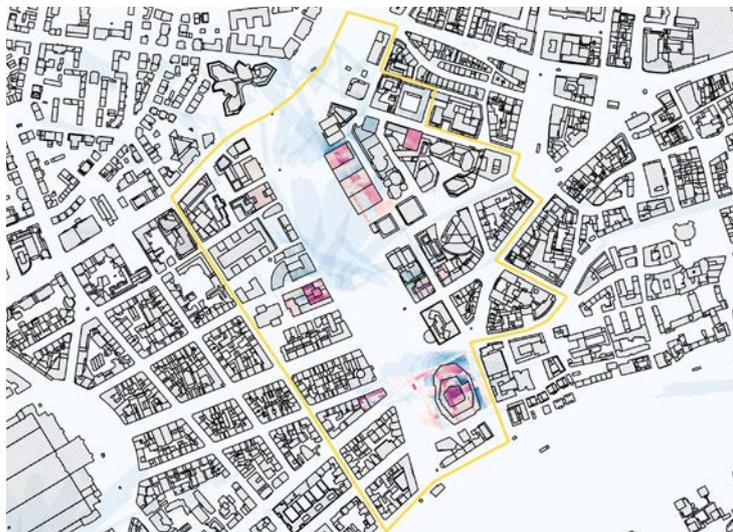
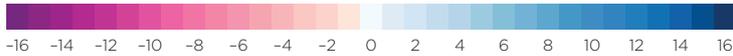
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



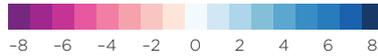
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



TB1B - WESTLICHES MAINUFER
SCHATTENANALYSE BESTAND

21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

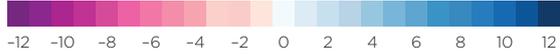
ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE HEP2024 (DIFFERENZ)

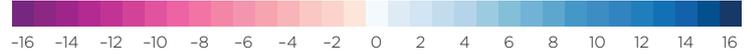
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



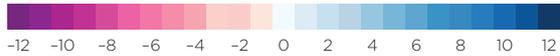
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN

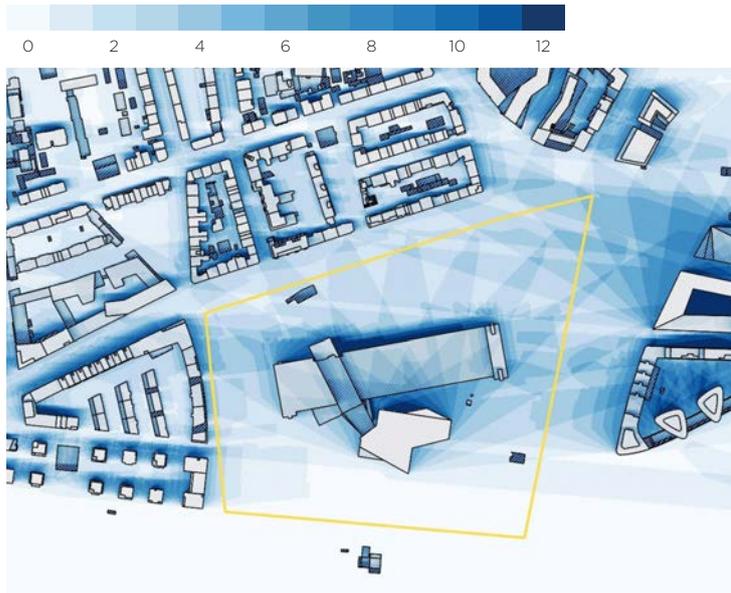


TB2A - EZB

SCHATTENANALYSE BESTAND

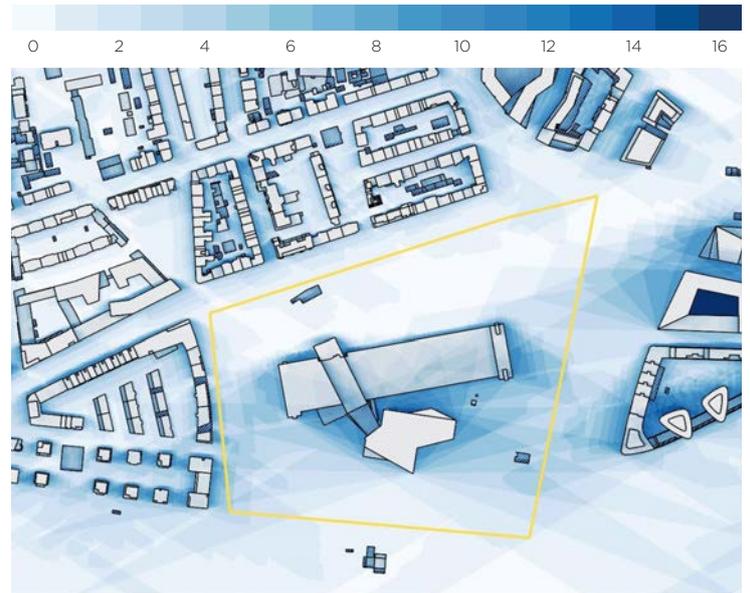
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



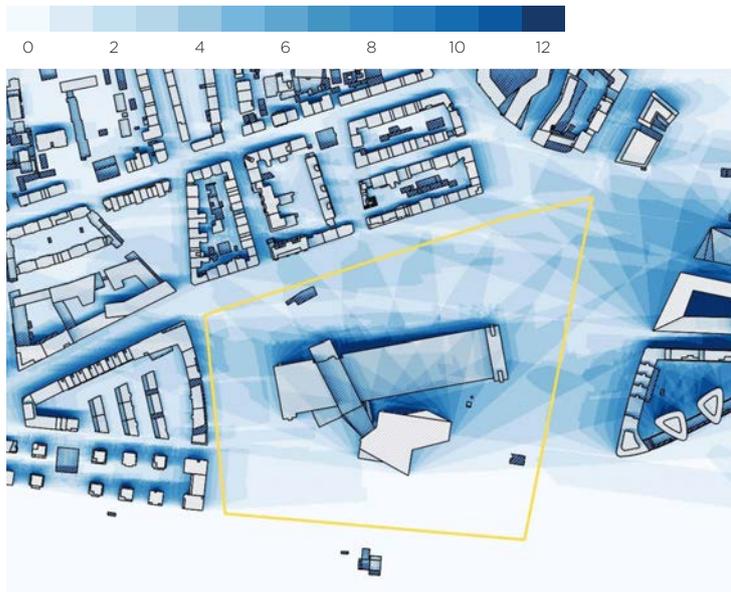
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



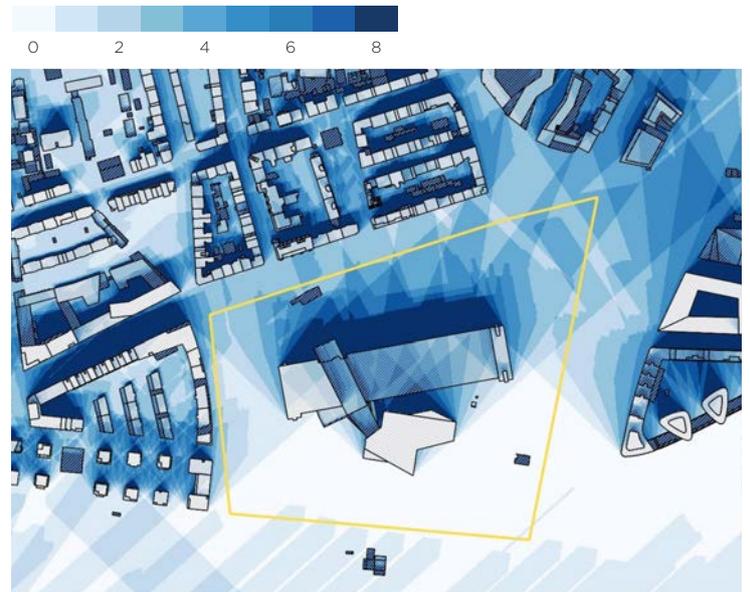
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

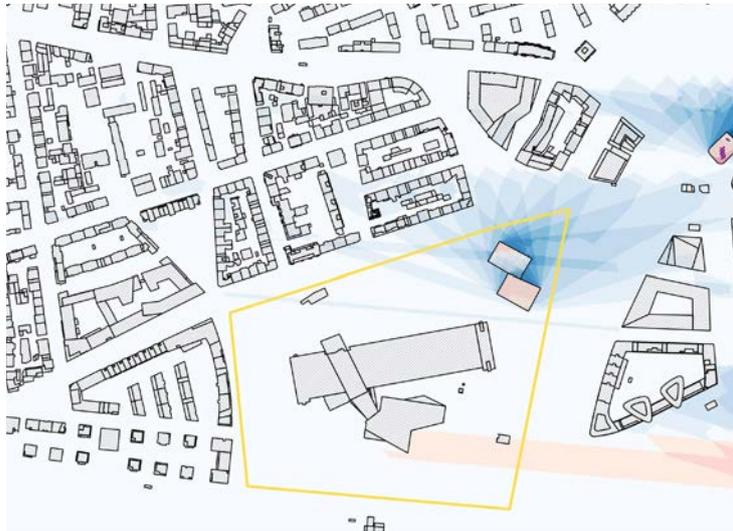
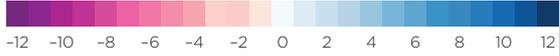
ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE HEP2024 (DIFFERENZ)

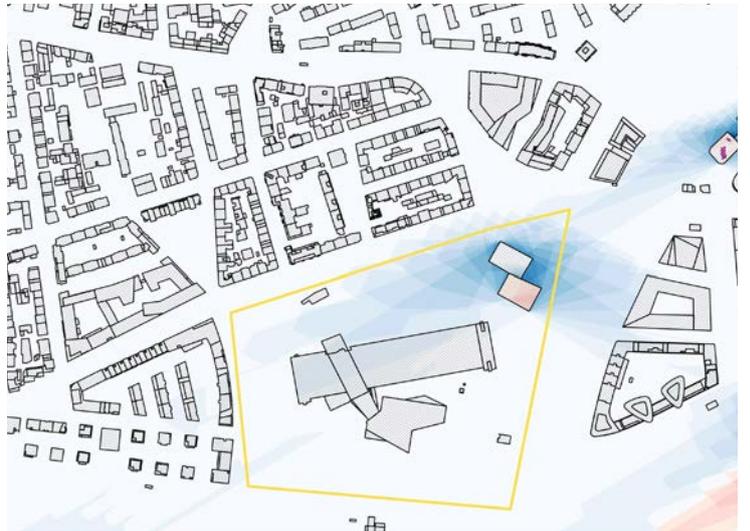
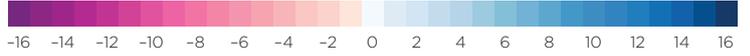
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



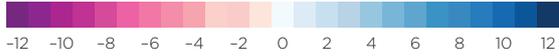
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



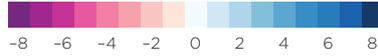
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

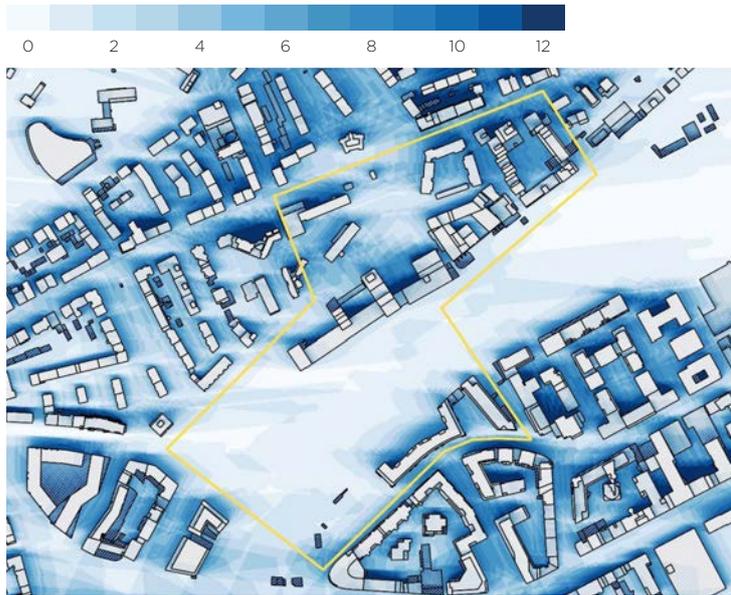
DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



TB2B - DANZIGER PLATZ
SCHATTENANALYSE BESTAND

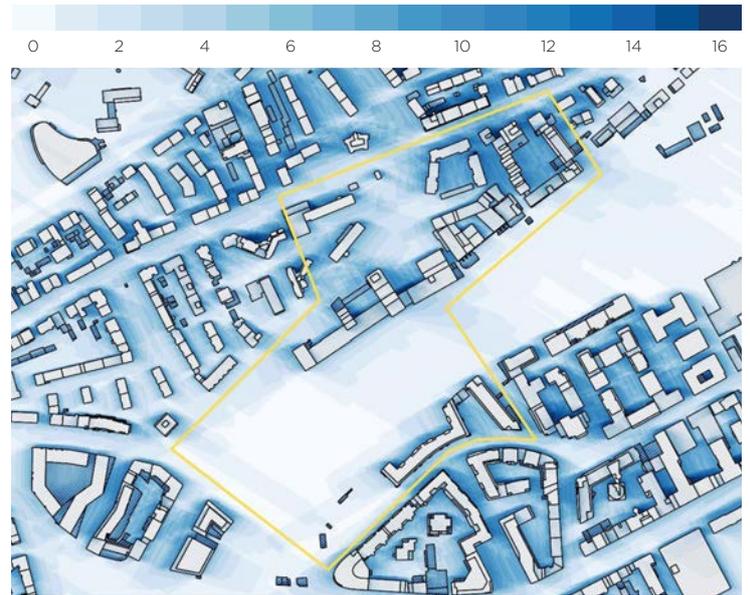
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



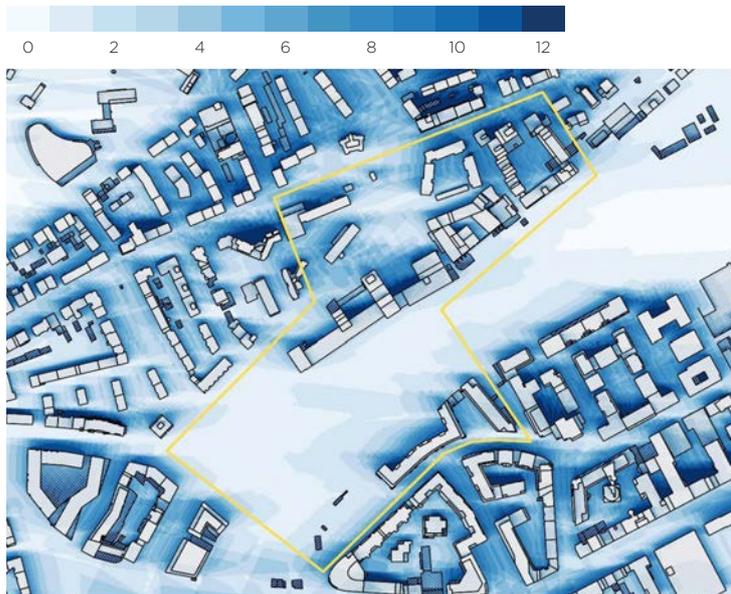
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



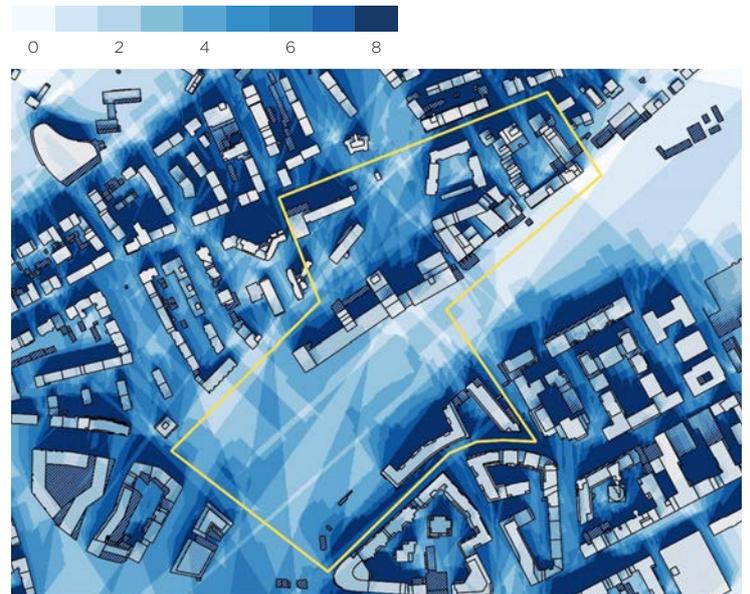
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

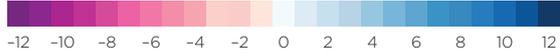
ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE HEP2024 (DIFFERENZ)

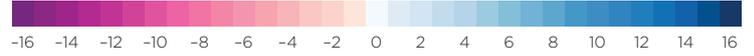
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



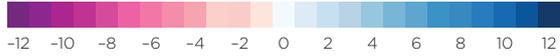
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



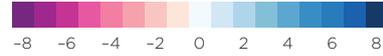
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

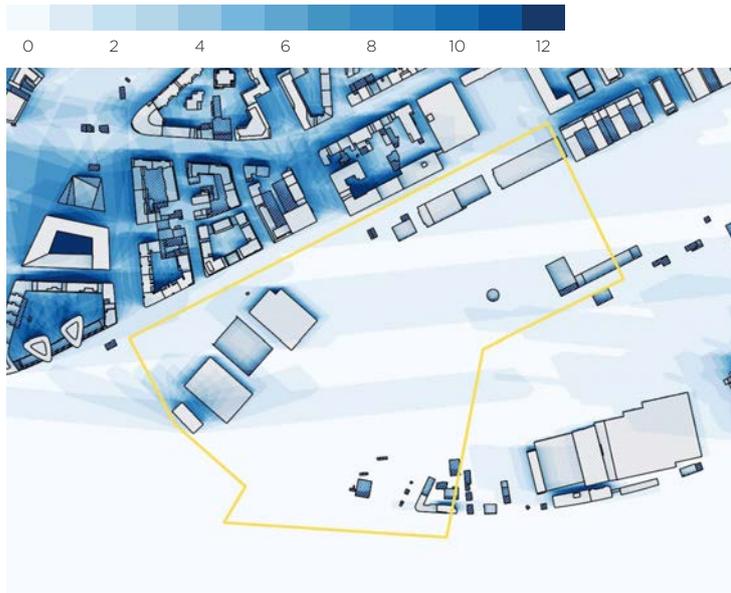
DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE BESTAND

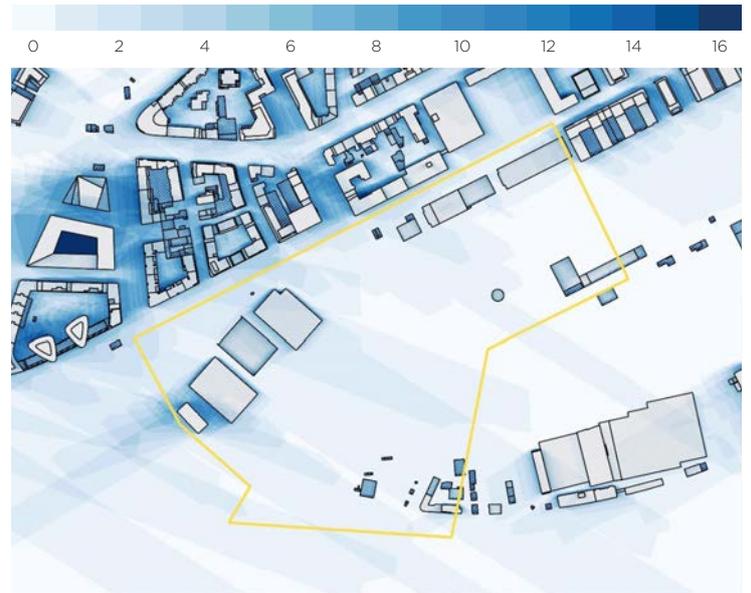
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



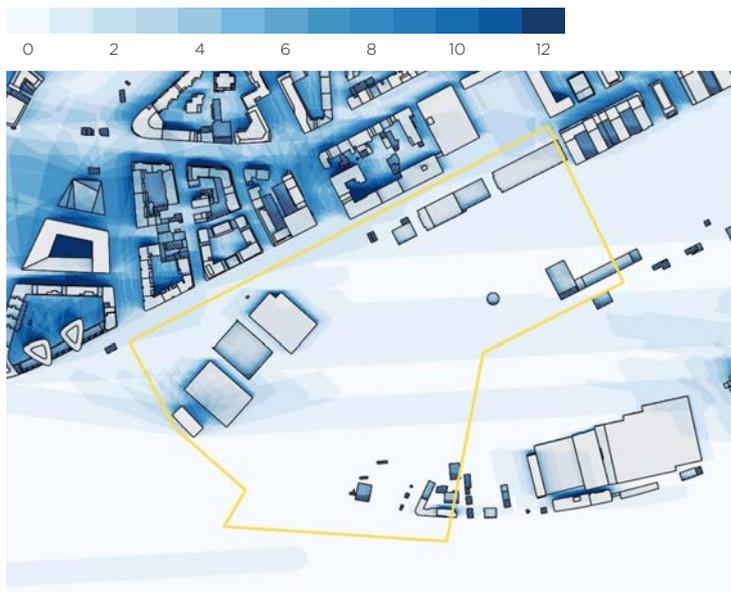
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



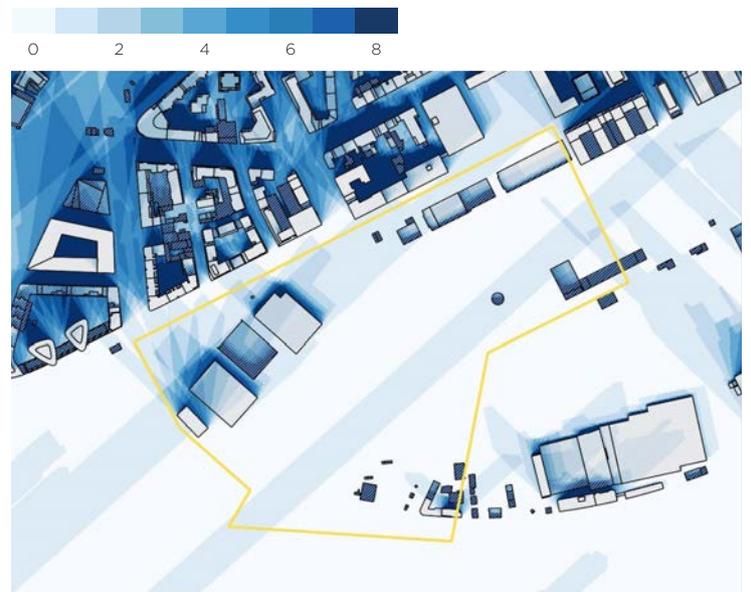
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

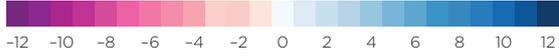
ANZAHL DER STUNDEN MIT SCHATTEN



SCHATTENANALYSE HEP2024 (DIFFERENZ)

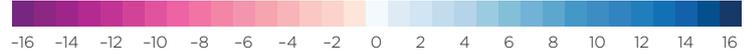
21. MÄRZ 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



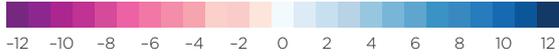
21. JUNI 2023 (MAX. 16 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



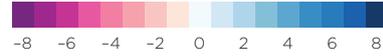
21. SEPTEMBER 2023 (MAX. 12 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



21. DEZEMBER 2023 (MAX. 8 STUNDEN)

DIFFERENZ DER STUNDEN MIT SCHATTEN



MASSNAHMENVORSCHLÄGE

„DIE STADT IST AUCH 2030 LEBENSWERT UND ZUKUNFTSFEST. (...) FRANKFURT AM MAIN UNTERNIMMT ANSTRENGUNGEN FÜR DEN KLIMASCHUTZ UND PASST SICH GLEICHZEITIG AN DEN STATTFINDENDEN KLIMAWANDEL AN.“

Auszug aus: Integriertes Stadtentwicklungskonzept Frankfurt 2030+

WINDKOMFORT

- > Die großräumige Strömung SW wird innerhalb der Bebauung an einigen neuen Hochhausstandorten verstärkt. An diesen Stellen ist die Berücksichtigung des Windkomforts bei der Entwicklung der neuen Standorte wichtig: Standort 01, Standorte 03 und 04 sowie Standorte 09 und 12.
- > Auffallend sind Verstärkungseffekte durch Abwinde, die in der Neuen Mainzer Straße durch den Standort 09 verursacht werden. Bei der Entwicklung des Standortes ist es empfehlenswert, Maßnahmen für hohen Windkomfort in der Neuen Mainzer Straße zu entwickeln.
- > Maßnahmen, um Abwinde zu vermindern sind beispielsweise: Ausrichtung und Form des Gebäudes (aerodynamisch günstige Formen), Sockelgebäude und eine projektbegleitende Beratung zum Thema Windkomfort.

OPTIONAL

VERSCHATTUNG

- > Die zusätzliche Verschattung umliegender Gebäude sowie des öffentlichen Raumes durch neue Hochhäuser sollte im Rahmen der Bebauung möglichst minimiert werden.
- > Darauf aufbauend sollten bei der Entwicklung der einzelnen Standorte die geforderten Verschattungs- und Besonnungsgutachten erstellt werden (z. B. nach DIN 5034 Tageslicht in Innenräumen, DIN EN 17037 Tageslicht in Gebäuden).
- > Die Verschattung des Opernplatzes als gesamt städtisch bedeutsamer Stadtraum durch neue Hochhausbauten ist auszuschließen.

OPTIONAL

- > Das im Rahmen des HEP2024 entwickelte Konzept zur Bildung von Kleinclustern westlich der Taunusanlage und damit die Schaffung von sog. ‚Stadtlichtungen‘ an zentralen Orten des Anlagenringes sollte langfristig sichergestellt werden.
- > Das weitere Vordringen der Bankenviertel-Hochhäuser nach Osten sollte, sollte insbesondere vor dem Hintergrund der Verschattung historisch gewachsener Innenstadt-Quartiere limitiert werden.