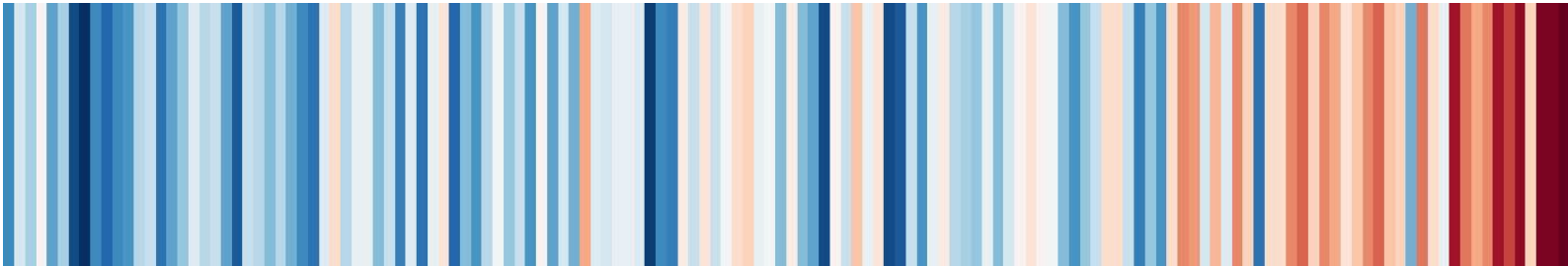


Stadtklimaanalyse Kreisstadt Siegburg

Juli 2025



Bearbeitung

Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI)
info@bpi-kassel.de | www.bpi-kassel.de

Dipl.-Biol. Nicole Burghardt, MSc. ULM

Annika Poblocki, MSc.

Dr.-Ing. René Burghardt

Felix Huck, BSc.

Frederik Hilden, MSc.

Kiara Thielemann

Insofern nicht anders angegeben gilt für alle Abbildungen, Diagramme und Tabellen als
Quelle: **Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI) 2025**

in Zusammenarbeit mit

Kreisstadt Siegburg

Amt für Umwelt und Wirtschaft

Tanja Marks

Sachgebietsleitung Umwelt und Klimaschutz

Auftraggeberin (AG)

Kreisstadt Siegburg
Amt für Umwelt und Wirtschaft
Sachgebiet Umwelt und Klimaschutz
Nogenter Platz 10
D – 53721 Siegburg

**BPI**

Burghardt und Partner, Ingenieure

Kontakt

Tanja Marks
Tanja.marks@siegburg.de

Auftragnehmer (AN)

Burghardt und Partner, Ingenieure
Am Sonnenhang 4
D – 34128 Kassel

**Kontakt**

Dr.-Ing. René Burghardt
info@bpi-kassel.de

Überlassungserklärung

Hiermit überträgt der AN der AG die Nutzungsrechte der vorliegenden Ausarbeitung inklusive aller Karten- und Planwerke sowie der erstellten und übermittelten Daten.

Inhaltliche Änderungen seitens der AG müssen als solche klar gekennzeichnet werden. Die Änderungen dürfen nicht zu Miss- oder Fehlinterpretationen der Ergebnisse und Aussagen der Stadtklimaanalyse führen.

Die Urhebernennung für das erbrachte Werk und | oder Teilen daraus ist obligatorisch und dessen Einhaltung obliegt der Verantwortung der AG.

gez. Dr.-Ing. R. Burghardt

Kassel, im Juli 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Auftragsgegenstand.....	1
1.2	Vorbemerkung zur Handhabung der Stadtklimaanalyse.....	2
1.3	Bisherige Auswirkungen des Klimawandels, Strategien und Betroffenheiten der Stadt Siegburg.....	3
2	Fachlicher Hintergrund.....	5
2.1	Stadtklima.....	5
2.2	Temperatur und städtische Wärmeinsel	6
2.3	Vegetation und städtisches Grün	9
2.4	Regionaler Wind und städtische Durchlüftung.....	10
2.4.1	Rauigkeit und Porosität.....	10
2.4.2	Luftleitbahnen und Strömungsregime	11
2.5	Flurwinde und Kaltluft	13
3	Methodisches Vorgehen und verwendete Software.....	16
3.1	Methodisches Vorgehen	16
3.1.1	Historische Klimadatenauswertung.....	19
3.1.2	Projizierte Klimadatenauswertung.....	21
3.1.3	Ableitung der Klimaanalysekarte.....	23
3.1.4	Ableitung der Planungshinweiskarte	23
3.2	Technische Umsetzung.....	25
3.3	Verwendete Software.....	27
3.3.1	Geoinformationssystem	27
3.3.2	Kaltluftsimulationen.....	27
3.3.3	Windfeldsimulationen.....	28
4	Charakterisierung des Untersuchungsraums	29
4.1	Räumliche Charakterisierung der Region.....	29
4.2	Topographie und räumliche Besonderheiten	30
4.3	Naturräumliche Einordnung	30
5	Klimatisch-planerische Analysen.....	32
5.1	Klimatische Charakterisierung der Region	32
5.1.1	Temperatur und Niederschlag	34
5.1.2	Klimatische Kenntage	39

5.1.3	Windverhältnisse	42
5.2	Topographische Analysen	50
5.2.1	BlueSpot-Analysen	50
5.3	Bebauungsanalysen	56
5.3.1	Baulich-Räumliche Offenheit.....	56
5.3.2	Mittlere Baumassenvolumendichte	59
5.4	Vegetationsanalysen.....	62
5.4.1	Vegetationserfassung	62
5.5	Klimatische Analysen.....	67
5.5.1	Kaltluftentstehung und -transport	67
5.5.2	Nächtliche bodennahe Lufttemperatur (Städtische Wärmeinsel).....	76
6	Klimatischer Bestand und Szenarien	78
6.1	Klimaanalysekarte.....	78
6.2	Klimaszenarien für die Region Siegburg	84
6.2.1	Lufttemperatur und Niederschlag	85
7	Analysen und Planungen	94
7.1	Planungshinweiskarte und Maßnahmenempfehlungen	94
8	Zusammenfassung	101
9	Anhang	9-1
9.1	Glossar	9-1
9.2	Literaturverzeichnis.....	9-1
9.3	Abbildungsverzeichnis	9-1
9.4	Tabellenverzeichnis.....	9-1
9.5	Diagrammverzeichnis	9-1
9.6	Abbildungen und Diagramme.....	9-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausführung	DJF	Dezember, Januar, Februar
%	Prozent	DOM	Digitales Geländemodell
<	kleiner	DOP	Digitale Orthophotos
>	größer	Dr.	Doktor Doktorin
≤	kleiner gleich	DWD	Deutscher Wetterdienst
≥	größer gleich	e.V.	eingetragener Verein
∅	Durchschnitt	et al.	et alii/ "und andere"
§	Paragraf	etc.	et cetera
°	Grad	Feb	Februar
°C	Grad Celsius	FFH	Fauna-Flora-Habitat
AG	Auftraggeber Auftraggeberin	GCM	Global Climate Modell
AN	Auftragnehmer Auftragnehmerin	gez.	gezeichnet
Apr	April	ggf.	gegebenenfalls
Aug	August	GIS	Geoinformationssystem
BfN	Bundesamt für Naturschutz	ha	Hektar
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr	i.d.R.	in der Regel
bspw.	beispielsweise	ID	Identifikation
bzw.	beziehungsweise	Ing.	Ingenieur Ingenieurin
ca.	circa	inkl.	inklusive
CFD	Computer Fluid Dynamics	insb.	insbesondere
CI-Green	Green Chlorophyll Index	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
cm	Zentimeter	ISEK	Integriertes städtebauliches Entwicklungskonzept
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	Jan	Januar
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment	JJA	Juni, Juli, August
D	Deutschland	Jul	Juli
d.h.	das heißt	Jun	Juni
Dez	Dezember	K	Kelvin
DGM	Digitales Geländemodell	KAnG	(Bundes-)Klimaanpassungsgesetz
		KFK	Klimafunktionskarte
		km	Kilometer

km ²	Quadratkilometer	RCP	Representative Concentration Pathway
l/m ²	Liter pro Quadratmeter	rd.	rund
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz	RL	Richtlinie
LT	Lufttemperatur	s	Sekunde
m	Meter	Sep	September
m/s	Meter pro Sekunde	SKA	Stadtklimaanalyse
m ²	Quadratmeter	sog.	sogenannte
m ³ /m*s	Kubikmeter pro Meter mal Sekunde	SON	September, Oktober, November
m ³ /m ² /ha	Kubikmeter pro Quadratmeter je Hektar	Std.	Stunde
m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde	SVF	SkyView Faktor
MAM	März, April, Mai	u. a.	unter anderem
max	Maximum	UC	Urban Canopy
min	Minimum	UCL	Urban Canopy Layer
Min.	Minute	UTC	Universal Time Coordinated
mind.	mindestens	u _z	Windgeschwindigkeit
mm	Millimeter	v.a.	vor allem
Mrz	März	VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	vgl.	vergleiche
NIR	Nahinfrarotbereich	VM BW	Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg
Nov	November	VWG	Verwaltungsgrenzen
NRW	Nordrhein-Westfalen	W/m ²	Watt pro Quadratmeter
o.ä.	oder ähnliche	z.B.	zum Beispiel
o.J.	ohne Jahr	Z ₀	Rauigkeitslänge
O ₂	Sauerstoff	Z _d	Nullpunktverschiebung
Okt	Oktober		
PET	physiologisch äquivalente Temperatur		
Ph_var	Städtische Porosität		
PHK	Planungshinweiskarte		
RCM	Regional Climate Models		

1 Einleitung

1.1 Auftragsgegenstand

Im Zuge des voranschreitenden Klimawandels ist es für Städte, Gemeinden und Kommunen von besonderer Bedeutung die aktuelle klimatische Situation sowie die projizierten klimatische Veränderungen in ihrer strategischen Entwicklungsplanung zu berücksichtigen, um negative klimatische Einflüsse zu reduzieren und positive Effekte oder Synergien zu fördern.

Das Amt für Umwelt und Wirtschaft der Kreisstadt Siegburg beschäftigt sich mit allen Belangen der Umwelt und des Klimas im Stadtgebiet. Während der Klimaschutz schon lange eine Priorität in der Planung und Umsetzung von Konzepten innehat, soll nun die Klimaanpassung nachziehen. So wurde bereits ein Hitzeaktionsplan für das Stadtgebiet erarbeitet, um einen Umgang mit der klimawandelbedingten Wärmezunahme zu finden.

Die Stadtklimaanalyse beschreibt, analysiert und bewertet den aktuellen Bestand im Untersuchungsraum hinsichtlich unterschiedlicher klimatischer Aspekte. Neben dem klimatischen Status quo wird auch die mögliche klimatische Entwicklung des Raums betrachtet. Die hieraus resultierenden Handlungsempfehlungen dienen später als Grundlage für eine zielgerichtete, realitätsnahe und individualisierte Klimaanpassung im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung.

Gleichzeitig stellt die Stadtklimaanalyse, als hoch aufgelöste, evidenzbasierte und räumlich verortete Bestandsanalyse die ideale Basis für ein städtisches Klimaanpassungskonzept dar, dessen Erstellung durch das Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG) [1] forciert wird.

Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG)

Das am 20.12.2023 durch den Bundestag beschlossene „Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KAnG)“ zielt darauf ab durch den Klimawandel hervorgerufene negative Auswirkungen und insbesondere Schäden zu vermeiden bzw. zu reduzieren, um so Leben, Gesundheit, Gesellschaft, Wirtschaft, Infrastruktur, Natur und Ökosysteme zu schützen (§ 1).

Dazu plant die Bundesregierung in einem vierjährigen Rhythmus eine Klimaanpassungsstrategie zu veröffentlichen, welche auf einer im achtjährigen Turnus zu aktualisierenden Klimarisikoanalyse basiert. Die Klimarisikoanalyse soll basierend auf aktuellen Daten und wissenschaftlichen Erkenntnissen u. a. Klimaszenarien für Deutschland untersuchen und so als Grundlage für Aussagen über Handlungserfordernisse und Maßnahmenplanungen (bspw. in besonders betroffenen Regionen) dienen. Diese sollen in die Klimaanpassungsstrategie einfließen, und zwar in Form von sieben Clustern mit entsprechenden Handlungsfeldern. Zu den Clustern gehören u. a. „Land und Landnutzung“ sowie „Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz“. Ihnen sollen jeweils messbare, ambitionierte Ziele zugeordnet werden, deren Erreichung mithilfe zuvor festgelegter Indikatoren überprüft werden sollen. Auch werden für die Erreichung der Ziele notwendige Maßnahmen des Bundes festgelegt und Maßnahmenempfehlungen an die neben Verbänden und Öffentlichkeit zu beteiligenden Länder ausgesprochen (§ 3). Weiterhin besagt das KAnG § 8, dass Ziele der Klimaanpassung und insbesondere potenzielle Auswirkungen des Klimawandels wie Überflutung, Überschwemmung, Absinken des Grundwasserspiegels, Trockenheit, Bodenerosion und lokale Wärmeinsel-Effekte zu integrieren und fachübergreifend durch Träger öffentlicher Aufgaben bei Entscheidungen und Planungen zu berücksichtigen sind [1].

1.2 Vorbemerkung zur Handhabung der Stadtklimaanalyse

Das Projekt „**Stadtklimaanalyse Stadt Siegburg**“ kann in drei Bereiche aufgeteilt werden.

Informatorische Kapitel erläutern allgemeine fachliche Hintergründe und angewandte Methodiken (vgl. Kapitel 2 und 3). Ein zweiter Bereich umfasst die (klimatische) Bestandsanalyse für die Stadt Siegburg (vgl. Kapitel 4 und 5). Das finale Kapitel schließt den Bericht mit der Auswertungen der Klimaprojektionen, der Planungshinweiskarte und den entsprechenden Handlungsempfehlungen (vgl. Kapitel 7) für die Stadt ab.

Zur Übersichtlichkeit und damit die generierten Karten- und Planwerke – speziell die Themenkarten – auch abseits des Themas „Klima bzw. Klimaanpassung“ einen Mehrwert darstellen und seitens der Verwaltung der Stadt genutzt werden können, werden sie außerdem als einzelne Karten mit einer technischen Beschreibung bereitgestellt.

Ebenenbezug

Die Stadtklimaanalyse stellt ein digitales Planungswerkzeug dar. Alle Daten liegen im GIS vor, was zum einen den Umgang der Stadtklimaanalyse im digitalen Planungskontext erleichtert und zum anderen die Möglichkeit besteht, dass die Daten nicht immer auf der ihr entsprechenden Maßstabebene betrachtet werden. Während die Klimaanalysekarte per Definition der VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) die Zusammenfassung von Räumen mit ähnlichen klimatischen Eigenschaften beschreibt, diese als Klimatope visualisiert und entsprechend mesoklimatischen Planungsfokus beschreibt, besitzen die einzelnen Themenkarten in der Regel eine wesentlich höhere räumliche Auflösung (zwischen 20 cm und 5 m) und adressieren in ihrer solitären Anwendbarkeit eher den mikroklimatischen Bezugsraum. Daraus lässt sich ableiten, dass die Stadtklimaanalyse als gesamtstädtisch bzw. regionales Planungswerkzeug verstanden werden muss. Gleichzeitig stellt sie wichtige klimatische, aber auch städtebauliche und landschaftsplanerische Rahmenparameter zur Verfügung, um diese bei Detailbetrachtung im mikroklimatischen / großmaßstäblichen Kontext als notwendige Grundlagen nutzen zu können.

Perspektive

Die Stadtklimaanalyse umfasst als Planungs- und Entscheidungsinstrument mehrere Aufgabenbereiche. Hierzu zählt, neben der nachvollziehbaren Darstellung des stadtklimatischen Status Quo, der Wissensvermittlung unterschiedlicher klimatischer, stadt- und landschaftsplanerischer Kenngrößen sowie der Bewertung der klimatischen Bedeutung der Flächenkulisse des Untersuchungsraums, auch die Funktion der Einbettung der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in den perspektivischen Stadtentwicklungsprozess. So können aus (stadt-)klimatischer Perspektive Potential- wie auch Defiziträume identifiziert werden, deren Berücksichtigung in der langfristigen Stadtentwicklung einen wichtigen Beitrag im Kontext der Anpassung des Siedlungsraums an den Klimawandel leisten kann.

Alle Berechnungen und Analysen werden final der Stadt Siegburg als GIS-Daten zum Import in das kommunale GIS zur Verfügung gestellt.

1.3 Bisherige Auswirkungen des Klimawandels, Strategien und Betroffenheiten der Stadt Siegburg

Mit dem im Jahr 2023 fertiggestellten „Masterplan Grün“ [4] hat die Stadt Siegburg eine gesamtstädtische Freiraumstrategie entwickelt, auf deren Grundlage nicht nur die Siegburger Frei- und Grünflächen weiterentwickelt und die Auswirkungen des Klimawandels abgemildert werden sollen, auch sollen die Erkenntnisse und Strategien des „Masterplan Grün“ in die Steuerung der baulichen Entwicklung Siegburgs einfließen. Dazu wurden u. a. Ortsbegehungen durchgeführt, bestehende Geodaten und Konzepte, wie bspw.

- die Klimawandelvorsorgestrategie der Region Köln/Bonn,
- das Integrierte Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzept der Stadt Siegburg,
- der Landschaftsplanentwurf für Siegburg, Troisdorf und St. Augustin
- sowie das Integrierte städtebauliche Entwicklungskonzept (ISEK) Siegburg Innenstadt ausgewertet

und Bürgerinnen und Bürger sowie Expertinnen und Experten beteiligt.

Neben anderen wichtigen Erkenntnissen haben die Expertenrunden die Hauptwindrichtungen in Siegburg Südwesten und Südosten als relevante Aspekte bei der weiteren Freiraumentwicklung von Siegburg identifiziert. Bei der Befragung von Siegburgerinnen und Siegburgern wurde der Aspekt „Hitzeanpassung“ als wichtigstes Thema für den „Masterplan Grün“ genannt gefolgt von „Anpassung an Starkregen“. Der „Masterplan Stadtgrün“ geht weiterhin auf eine projizierte Zunahme der Jahresmitteltemperatur und von heißen Tagen ein. Dabei bezieht er sich auf Modellberechnungen des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 2014, welche auf projizierten Entwicklungen des Szenario SRES A1B basieren.

Das „Integrierte Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzept für die Kreisstadt Siegburg“ [5] befasst sich mit planerischen Aspekten, die im Zuge des voranschreitenden Klimawandels an Relevanz gewinnen. Dabei liegt der Fokus des Berichts insbesondere auf Themen des Klimaschutzes, welcher allgemein formuliert das Ziel verfolgt, *„den Ausstoß von klimarelevanten Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan zu reduzieren, um entsprechend dem Vorsorgeprinzip ein Voranschreiten des Klimawandels zu minimieren“* [6]. Themen der Klimaanpassung hingegen, wie Hitze- und Gesundheitsvorsorge mit Fokus auf verletzbare Bevölkerungsgruppen, Sturm- und Starkregenvorsorge zur Minderung von Überflutungsereignissen und weiteren Risiken innerhalb von Siedlungsbereichen, werden im vierten Kapitel unter dem Titel „Grobe Risikoanalyse“ betrachtet. Zusätzlich werden einige konkrete Maßnahmen benannt. Zunächst wurden dafür Aussagen regionaler Klimaprojektionen für Nordrhein-Westfalen zusammengestellt. Diese Klimaprojektionen wurden bereits im Abschnitt zum „Masterplan Grün“ behandelt. Eine Zusammenstellung bisheriger Auswirkungen und Erfahrungen in Siegburg wird auf Grundlage überschlägiger Prüfung klimasensibler Bereiche vorgenommen. Zuletzt werden ausdrücklich „Nicht abschließende Schlussfolgerungen zu den Klimawandel-bezogenen Betroffenheiten“ [5,7] gezogen. Neben den Klimaprojektionen bezieht sich der Bericht auf Studien und Gutachten wie den Hochwasserrisikomanagementplan, relevante Presseartikel und Projekte sowie die Ergebnisse einer Beteiligung.

Der „Hitzeaktionsplan“ [7] wurde zum Schutz der Einwohnenden der Stadt Siegburg entwickelt, um auf die zunehmenden gesundheitlichen Belastungen und Gefahren aufgrund des Klimawandels und insbesondere die steigenden Temperaturen zu reagieren. Dazu wurden u. a. historische Klimadaten ausgewertet, welche durch die Wetterstation des DWD am Flughafen Köln/Bonn (ID 2667) langjährig und für zwei Klimaperioden (1961 bis 1990 und 1991 bis 2020) aufgezeichnet wurden. Es zeigt sich, dass bereits im Laufe der beiden durch die DWD-Station erfassten historischen Klimaperioden ein Anstieg der mittleren Jahreslufttemperatur um beinahe 1 °C zu verzeichnen ist. Auch die Sommermonate Juli und August weisen jeweils einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von 1 °C für denselben Zeitraum auf. Die Anzahl der Ereignistage ist im Laufe der beiden Klimaperioden ebenfalls gestiegen: Die Anzahl der heißen Tage steigt statistisch von 6,7 auf 11,2 Tage und die der Sommertage von 34 auf 46,8 Tage. Dieser Trend zeigt sich auch in den Sommermonaten. Die Anzahl der Tropennächte betrug in der Klimaperiode von 1961 bis 1990 0,2 Tage und zwischen 1991 und 2020 0,5 Tage pro Jahr. Ein Anstieg ist auch hier für die Sommermonate zu beobachten.

Die Erkenntnisse des „Hitzeaktionsplans“ hinsichtlich der historischen und projizierten Temperaturveränderungen werden in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 nochmal aufgegriffen und mit den Ergebnissen der Stadtklimaanalyse ins Verhältnis gesetzt.

2 Fachlicher Hintergrund

2.1 Stadtklima

Der städtische Siedlungsraum unterscheidet sich hinsichtlich seiner klimatischen Wirkungsweise deutlich von seinem unbebauten Umfeld. In Städten und Ballungsräumen herrscht das sogenannte Stadtklima, welches sich aus der menschengemachten Modifikation des natürlichen Mesoklimas (Lokalklimas) ergibt, während das Mikroklima (Kleinklima) (siehe Kapitel 3, Abbildung 8) mitunter standortbedingt von den stadtklimatischen Veränderungen der urbanen Bebauung, Abwärme, Luftbeimengungen u. a. beeinflusst wird [8].

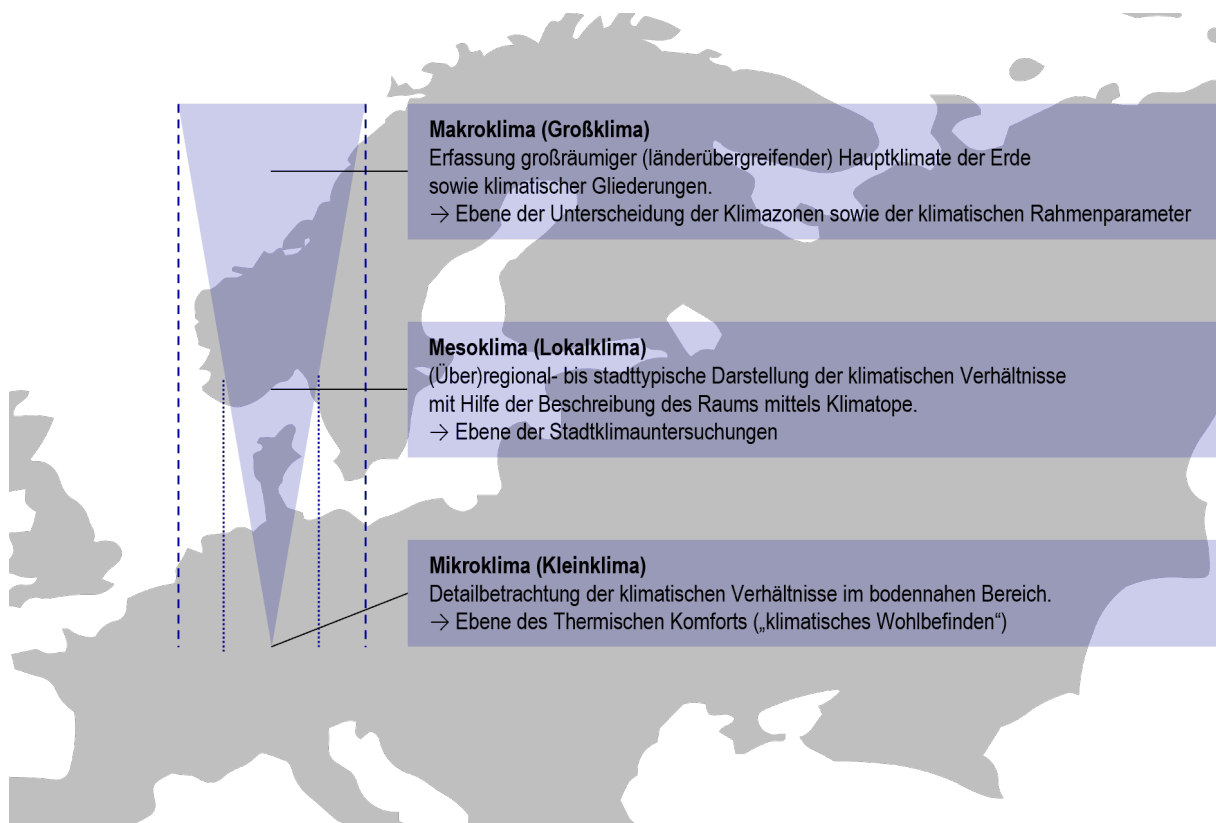


Abbildung 1: Übersicht der Klimaebenen mit dem korrespondierenden (typischen) Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 3)

Das Stadtklima wirkt sich wiederum auf die meso- und mikroklimatische Ebene aus, wobei seine konkrete Ausprägung in Abhängigkeit von den vorhandenen Klimaeinflussfaktoren (z. B. Strahlungsintensität, Neigung der Erdoachse) und Stadtcharakteristik (Klimamodifikatoren, siehe Tabelle 1) variiert. Hiervon unterscheiden sich einige Parameter, z. B. in Bezug auf einzelne Stadtteile, nur wenig (z. B. Sonneneinstrahlung, Niederschlag); andere wiederum, die z. B. durch das Wärmespeichervermögen von Baustoffen, die Versiegelung des Bodens oder anthropogene Abwärme etc. bedingt werden, können spürbar große Unterschiede aufweisen.

Tabelle 1: Beispiele für typische (anthropogene) Modifikationen / Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen / Risiken (rechte Spalte) im städtischen Raum.

Parameter Ursache	Wirkung Risiko
Beeinflussung durch Oberflächengeometrie, aerodynamische Rauigkeit, Wärmeinseleffekt	- Windfeldveränderungen - Turbulenzen - ..
Oberflächenversiegelung	- Reduzierte Retentionsfähigkeit (kumulativ) - Gefahr von Überschwemmungen - ..
Oberflächenversiegelung, geringer Grünflächenanteil	- Reduzierte Verdunstung - ..
Reduzierte Retentionsfähigkeit	- Gefahr von Überschwemmungen - ..
Reduzierte Verdunstung und erhöhte Wärmespeicherung durch Bebauung	- Temperaturerhöhung - ..
Temperaturerhöhung	- Vorhandensein wärmeliebenderer Pflanzen (Zunahme Invasiver Arten) - Hitzestress, thermische Belastung - Anstieg der hitzebezogenen Vulnerabilität unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen - ..

2.2 Temperatur und städtische Wärmeinsel

Ähnlich unterschiedlich wie die Ursachen für die Modifikation des städtischen Mesoklimas sind die Auswirkungen des Stadtklimas auf Menschen, Tiere, Pflanzen und auch die unbelebte Natur (z. B. Gebäude). Hierbei muss beachtet werden, dass klimatische Faktoren wie bspw. die Lufttemperatur oder die Luftfeuchte zum einen vom Organismus physiologisch und zum anderen von jedem Menschen subjektiv wahrgenommen werden. Diese subjektive Wahrnehmung wird wiederum durch viele unterschiedliche Faktoren, wie bspw. das Geschlecht, das Alter, das Gewicht etc. aber auch die Herkunft bzw. den Lebensraum oder Erkrankungen geprägt. Aus humanphysiologischer Sicht stellt eine Überhitzung des Körpers über 40 °C eine starke Belastung dar, die ab 42 °C lebensgefährlich ist.

Obwohl nicht alle Eigenschaften des Stadtklimas generell schädlich sind, werden viele der stadtklimatischen Wirkungskomplexe wegen ihrer Auswirkung auf die städtische Infrastruktur, das Wohlbefinden oder die Gesundheit der Stadtbewohnenden als negativ empfunden. Ein solcher Wirkungskomplex ist der städtische Wärmeinseleffekt, der aus der Wechselwirkung von verschiedenen Faktoren und Effekten im urbanen Kontext resultiert. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Städte tragen stets zur Erwärmung der Lufttemperatur bei; im Jahresmittel sind sie durchschnittlich um 1 bis 2 °C wärmer als die sie umgebende Landschaft [9,10]. Der Mittelwert der Lufttemperatur wird langfristig durch urbane Charakteristika, wie die Bebauung und die damit einhergehende Bodenversiegelung, beeinflusst (siehe Abbildung 2). Wird beispielsweise der Versiegelungsgrad innerhalb eines Quartiers um 10 % erhöht, steigt auch der Lufttemperatur-

mittelwert um ca. 0,2 °C gegenüber seiner unbebauten Umgebung an. Dieser Wert kann in Hinsicht auf einzelne Tageswerte, sprich Temperaturminima und -maxima, bei Strahlungswetterlagen noch stärker überschritten werden [11].

Ergänzend zu der eigentlichen Bebauung spielen auch die Eigenschaften der eingesetzten Materialien (Absorptionsvermögen, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeemissionsvermögen und Verdunstungsfähigkeit) sowie die Kubaturen, die Baumassen und die Bebauungsmorphologie im Kontext des Überwärmungsrisikos städtischer Räume eine bedeutende Rolle.

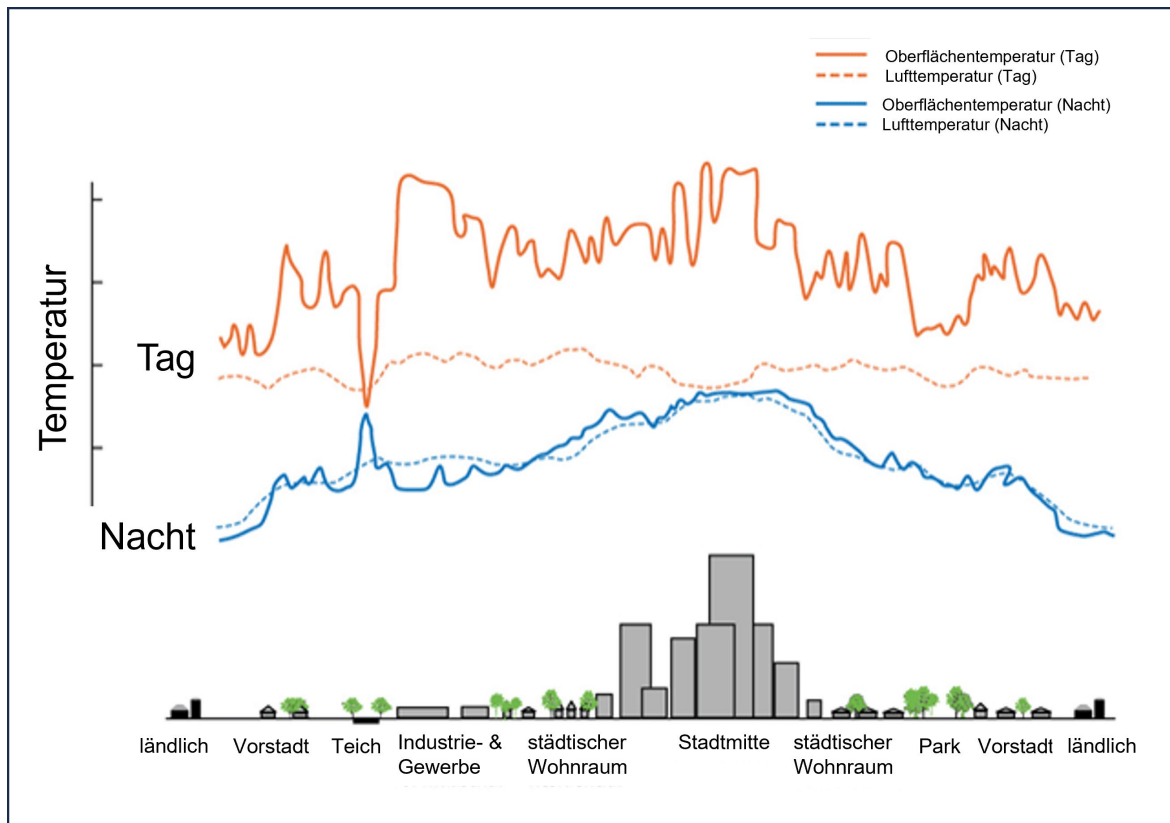


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der typischen Durchschnittstemperaturen (Sommer, aber nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Landnutzung (unterschiedliche Stadtcharakteristika). Die orangenen Graphen stellen die durchschnittlichen Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen die durchschnittlichen Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich deutlich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Stadtstrukturen bzw. Materialien oder Objekte. Beispiel Stillgewässer: im Gegensatz zu anderen Landnutzungen liegt die durchschnittliche Temperatur eines Wasserkörpers am Tag unter der durchschnittlichen Lufttemperatur. Auf Grund der guten Wärmespeicherkapazität des Wassers fällt sie in der Nacht, ohne Strahlungseintrag, aber nur kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen dar. In der Regel bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. auch weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen [12] (überarbeitet).

Aus diesem Zusammenspiel urbaner Eigenschaften und klimatischer Effekte entsteht die ballungsraumtypische Wärmeinsel (siehe Abbildung 3). Sie ist durch eine starke Erwärmung am Tag und eine nur eingeschränkte Abkühlung während der Nacht geprägt. Die akkumulative Intensität dieses Effekts kann durch Extremwetter, wie länger anhaltende Hitzeperioden, zusätzlich verstärkt werden. Im Zuge des Klimawandels treten diese immer häufiger auf. In dieser Form stellt der Effekt der städtischen Wärmeinsel ein gesundheitsbedingtes Risiko für eine

ebenfalls zunehmende Zahl an hitzevulnerablen Menschen, Tieren, Pflanzen und Infrastruktur dar und zählt somit zu den negativen Effekten des Stadtklimas.

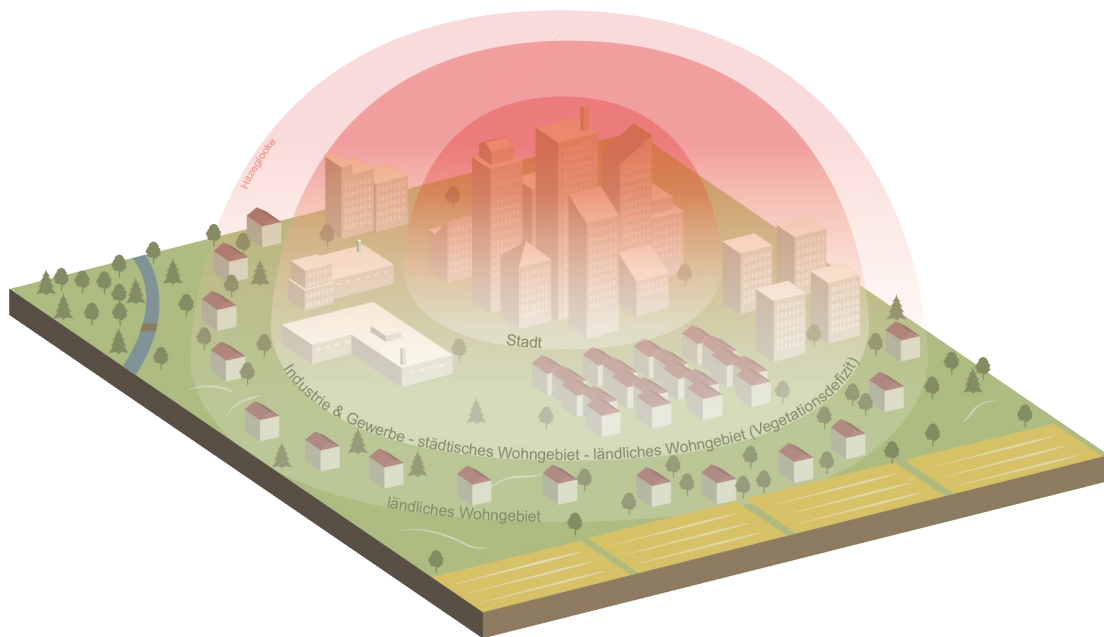


Abbildung 3: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel. Zwischen dem wärmeren Siedlungsraum der Stadt und dem kühleren Umland bildet sich, vorzugsweise bei wolkenfreien und wind-schwachen Wetterbedingungen während der Nacht, eine Lufttemperaturdifferenz aus. Je weniger „kühlende“ Faktoren (Vegetation, unversiegelte Flächen, Be- und Durchlüftungssachsen) und desto mehr Baumassen in ungünstiger Anordnung vorhanden sind, desto stärker i.d.R. der städtische Wärmeinseleffekt.

Eine **Hitzewelle** ist eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Sie ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann. Neben der Lufttemperatur sind hierbei weitere Parameter, wie die Luftfeuchte, Strahlung und Wind von Bedeutung.

International existiert keine einheitliche Definition des Begriffs Hitzewelle. Definitionen basieren häufig auf einer Kombination von Perzentil basierten Schwellenwerten (z. B. 98. Perzentil der Tagesmaximalwerte und einer minimalen Dauer z. B. 3 Tage) [13]

2.3 Vegetation und städtisches Grün

Urbanes Grün erfüllt eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen, die das städtische Klima und die Lufthygiene positiv beeinflussen. Auf das Stadtklima bezogen spielt es vor allem bei Verdunstungsprozessen und der Verhinderung der Bodenversiegelung (Retentionseigenschaft) eine wichtige Rolle. Städtische Vegetation bestimmt auch die urbane Struktur und hat zahlreiche weitere (ökologische, ökonomische, strukturelle, soziale und ästhetische) Funktionen, wodurch die Identität der Stadt geprägt und die Lebensqualität der Bewohnerinnen und Bewohner beeinflusst wird.

Beispielhaft sei für das öffentliche, städtische Grün auf die Rasenflächen hingewiesen: Bei guter Wasserversorgung weisen diese an Strahlungstagen im Vergleich zu angrenzenden versiegelten Flächen wesentlich niedrigere Oberflächentemperaturen und damit niedrigere Lufttemperaturen auf. Bei schlechter Wasserversorgung heizt sich auch der Boden und das Gras darüber auf, sodass von einer Kühlwirkung nicht mehr gesprochen werden kann. Wiesen, d. h. Vegetationsflächen mit größeren Wuchshöhen, können den Boden durch die Eigenverschattung der Gräser- und Kräuter vor einer zu starken Überhitzung schützen [14]. Ihre größte thermische Wirkung besitzen vitale Rasenflächen abends und nachts, wenn, aufgrund der isolierenden Wirkung des Grasfilzes, der Bodenwärmestrom gering und die Ausstrahlung hoch ist. Diese Rasenareale kühlen dann sehr stark ab und heben sich als innerstädtische Kaltluftflächen (vgl. Kapitel 2.5) hervor. Baum- und Strauchbestandene inner-städtische Flächen können die genannten positiven klimatischen Effekte noch weiter verstärken, da sie neben ihrer Transpiration auch durch ihren Schattenwurf tagsüber für niedrigere Temperaturen sorgen. Nachts hingegen stellen sich dort höhere Temperaturen als auf einer Rasenfläche ein.

Die relative Luftfeuchte ist in einem Stadtwald höher als über einer urbanen Rasenfläche. Baumbestandene Flächen transpirieren im Vergleich zu Kurzgras mit 40 % - 70 % (je nach Baumart) deutlich mehr. Außerdem weisen sie nach Niederschlägen wegen ihres größeren Interzeptionsvolumens (zurückhalten des Wassers auf der „Oberfläche“ der Vegetation) eine höhere Evaporationsrate (Verdunstungsrate) als Rasenflächen auf. Da der größte Teil der Globalstrahlung bereits vom Kronendach absorbiert wird, steht tagsüber weniger Energie für die Bodenerwärmung und Speicherung zur Verfügung als bei Rasenflächen, Wiesen oder gar unbeschatteten versiegelten Oberflächen. Ferner bewirken Baumbestände als potenzielle Strömungshindernisse, eine Reduzierung der Windgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 2.4), wodurch Aerosole und Stäube, aber auch Gase aus der vorbeiströmenden Luft ausgefiltert werden können [8]. Wird die Luftzirkulation gänzlich durch bspw. ein geschlossenes Kronendach über einer stark frequentierten Straße unterbrochen, so kann es aber auch zu einer temporären Anreicherung der Luftschadstoffe im Straßenraum kommen. Unter klimatischen Gesichtspunkten nehmen bereits kleinräumige Grünflächen Einfluss auf das Mikroklima. Ab welcher Größe jedoch ein deutlicher „Abstrahlungseffekt“ (bspw. hinsichtlich der Senkung der Lufttemperatur oder der Verbesserung der Luftqualität) entsteht, hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren (z. B. Dichte der umgebenden Bebauung, Grünvolumen, Barrierewirkungen etc.) ab. Nachgewiesen wurde die Klimarelevanz für Vegetationsflächen von mind. 10 m x 10 m nachgewiesen [15].

2.4 Regionaler Wind und städtische Durchlüftung

Die Unterscheidung zwischen ländlichem und städtischem Gebiet spielt, neben der Jahres- und Tageszeit, im Hinblick auf den Faktor Wind eine große Rolle. Die morphologischen und thermischen Charakteristika des urbanen Raums führen dort zu einer Veränderung der Windverhältnisse (Windgeschwindigkeit & Windrichtung, siehe Abbildung 4).

Die Luftbewegungen in der Stadt werden insbesondere durch lokale Windsysteme beeinflusst, die entweder von den topographischen Gegebenheiten oder von der Art und Anordnung seiner Bebauung abhängig sind [16]. Diese Windsysteme bilden sich gerade dann heraus, wenn der überregionale Wind nur schwach ausgeprägt ist.

Stark durch das vorliegende Relief geprägte Windsysteme (topographisch) sind bspw. Hangwinde sowie Berg- und Talwinde. Vor allem bei Städten in Tal- und Kessellagen sind diese Zirkulationssysteme von Bedeutung, da sie die Frischluftzufuhr und den Abluftabtransport (z. B. hinsichtlich Schadstoffen) fördern.

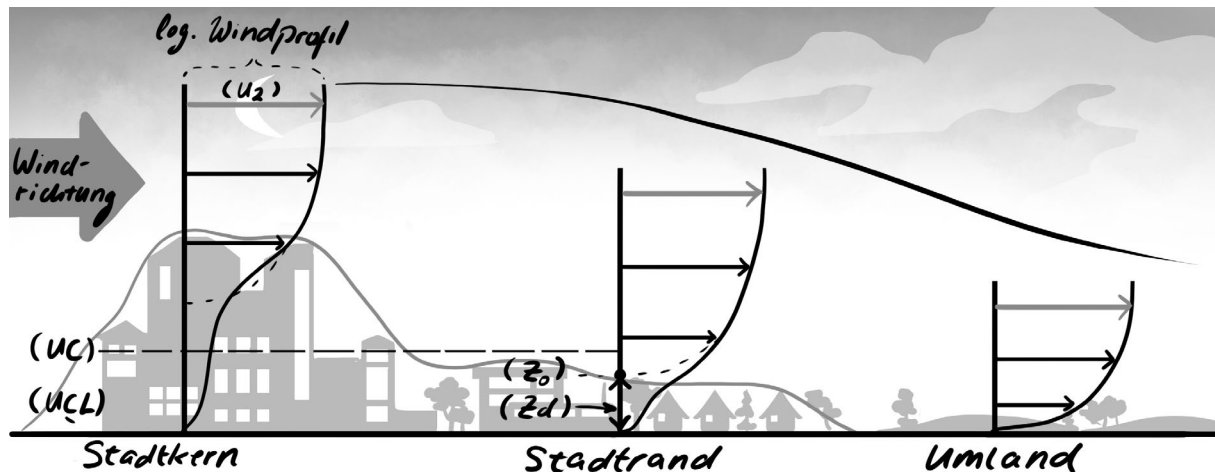


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand und dem freien Land (Umland). Das Windprofil wird im urbanen Bereich deutlich stärker beeinflusst bzw. verformt als im Umland. z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (vertikale Streckung des Profils) und den Raum unterhalb der mittleren Gebäudehöhe (UC).

2.4.1 Rauigkeit und Porosität

Wie bereits beschrieben verändert das urbane Profil die Windverhältnisse hinsichtlich der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung. Die größere Oberfläche und Rauigkeit (Oberflächen- oder Terrainstruktur) einer städtischen Bebauung bewirkt durch die erhöhte Reibung eine Verminderung der Windgeschwindigkeit (bis zu 30 % im Jahresmittel). Insbesondere nimmt die Häufigkeit von Windstillen um bis zu 20 % zu, was auch zu einer Verminderung des Luftaustausches führt und damit den Schadstofftransport behindert [16].

Hinsichtlich der Rauigkeit einer Oberfläche oder eines Terrains sind zwei Parameter von Relevanz. Zum einen die Rauigkeitslänge (z_0) und zum anderen die Nullpunktverschiebung (z_d). z_0 beschreibt den durch die Oberflächenrauigkeit eines Hindernisses beeinflussten vertikalen Raum über dem Objekt. z_d beschreibt den vertikalen Versatz von z_0 (siehe Abbildung 4). Typische Werte beider Rauigkeitsparameter für unterschiedliche Oberflächen bzw. Terrains

werden in Tabelle 2 wiedergegeben. Je höher die Werte von Z_0 und Z_d , desto stärker wird das Windprofil verformt, was u.a. eine Verminderung der Windgeschwindigkeit im Urban Canopy Layer (UCL) zur Folge hat.

Tabelle 2: Beispiele für Rauigkeitslängen und Nullpunktverschiebungen unterschiedlicher Oberflächen (nach [17])

	Oberfläche Terrain	Durchschnittshöhe [m]	Rauigkeitslänge (z_0)	Nullpunktverschiebung (z_d)
rural	Eis, geteerte Fahrbahn		0,001-0,01 mm	--
	Schnee, Wasser		0,1-1 mm	--
	Blanker Boden, geschnittenes Gras	0,02-0,05	0,01-0,02 m	--
	Gras, Stoppelfeld	0,2-0,5	0,03-0,06 m	0,1-0,3 m
	Ackerland, Pflanzenbestand	0,4-1	0,05-0,15 m	0,2-0,7 m
	Plantagen, Buschland	2-4	0,4-1 m	1,3-2,5 m
	Wald	12-30	0,8-2 m	9-24 m
urban	<i>niedrige Höhe und Dichte</i> Häuser, Gärten, Bäume, Warenhäuser	5-8	0,3-0,8 m	2-4 m
	<i>mittlere Höhe und Dichte</i> Reihenhäuser, Stadtzentren	7-14	0,7-1,5 m	3,5-8 m
	<i>hohe Höhe und Dichte</i> < 6 Stockwerke, Reihen- und Block-Gebäude	11-20	0,8-2 m	7-15 m
	Büro- und Wohnungsturmcluster	> 20	> 2 m	> 12 m

2.4.2 Luftleitbahnen und Strömungsregime

Sowohl der horizontale wie auch der vertikale Luftmassentransport regulieren die Belüftung des bodennahen Raums, ganzjährig relevant für die Durchlüftung von städtischen Gebieten ist jedoch nur die horizontale Luftströmung. Von besonderer stadtklimatischer Relevanz sind diese Luftströmungen besonders in den Nacht- und Vormittagsstunden bei austauscharmen Hochdruckwetterlagen. Diese Wettersituationen verstärken die typischen Eigenschaften des Stadtklimas, wodurch die thermische und lufthygienische Belastung der Bevölkerung gesteigert wird.

Stadtklimarelevante Luftleitbahnen ermöglichen besonders bei austauscharmen Wetterlagen das Ein- und Durchdringen vorhandener schwacher Horizontalströmungen in den UCL [18]. Eine räumlich umfangreichere Möglichkeit zur Verminderung thermischer und luft-hygienischer Belastungen innerhalb des Stadtraums liegt in der Freihaltung beziehungsweise Schaffung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (z. B. Ein- und Ausfallstraßen, Grünflächen, Gewässer, Gleisanlagen) im UCL [19].

Entsprechend ihrer thermischen und lufthygienischen Eigenschaften und Qualität der transportierten Luftmassen werden stadtklimarelevante Luftleitbahnen in

- Ventilationsbahnen,
- Frischluftbahnen und
- Kaltluftbahnen unterteilt (nach [20])

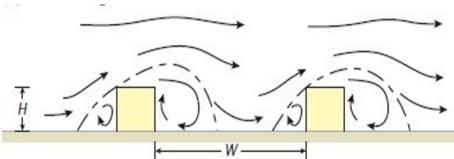
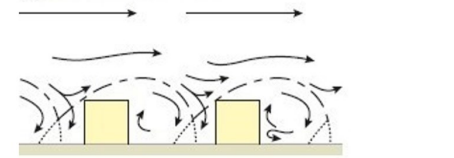
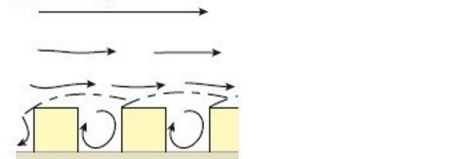
unterteilt.

Kaltluft beschreibt ausschließlich einen Temperaturzustand von Luftmassen, nimmt aber keinen Bezug auf lufthygienische Aspekte. Sie entsteht nur nach Sonnenuntergang (kein Strahlungseingang). Bei **Frischluft** handelt es sich hingegen um unbelastete Luftmassen, sie können, müssen aber nicht aus Kaltluft bestehen. Sie entsteht nur am Tag durch Photosynthese der Vegetation.

In Abhängigkeit von der Stadtmorphologie können sich unterschiedliche lokale Strömungsregime im innerstädtischen Raum ausbilden [17]. Das hierbei relevante dimensionslose Höhen-Weiten-Verhältnis beschreibt den Raum zwischen zwei Objekten (z. B. Gebäuden) in Abhängigkeit einer angenommenen Windrichtung. Dabei definieren unterschiedliche Schwellenwerte des Höhen-Weiten-Verhältnisses die Zugehörigkeit zu einem Strömungsregime (siehe Tabelle 3).

Informationen zu bestehenden Strömungsregimen bzw. deren mögliche Veränderung (z. B. durch bauliche Nachverdichtung oder Abriss von Gebäuden) sind für die Stadtplanung bzw. Stadtentwicklung von großem Interesse. So können konkrete Aussagen zu baulichen Vorgaben (keine Bebauung, definierte Bebauung etc.) z. B. im Bereich von bestehenden Luftleitbahnen getroffen werden, sodass deren Funktionalität weiterhin bestehen bleibt. Funktionierende Strömungssysteme können durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische und immissionsrelevante Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Tabelle 3: Strömungsregime mit zugehörigen Höhen (H)-Weiten (W)-Verhältnissen und grafischen Beispielen.

Regime	Höhen-Weiten-Verhältnis	Schema
Isolierte Rauigkeitsströmung	$< 0,3$ bis $0,5$	
Wirbelüberlagerungsströmung	$> 0,5$ und $< 0,65$	
Abgehobene Strömung	$> 0,65$	

2.5 Flurwinde und Kaltluft

Neben den durch das Relief beeinflussten Strömungen bilden sich in ebenen Lagen sogenannte Flurwinde aus. Das Flurwindsystem beschreibt Druckausgleichsströmungen zwischen verschiedenen Fluren (z. B. Stadt-Umland) und ist an ein flaches Relief oder an hindernisarme Freiflächen (Leitbahnen) gebunden. Der flache städtische Raum ist stark von seiner baulichen Gestaltung abhängig und fällt als ein durch Bebauung bedingtes Windsystem in diese Kategorie. Diese Windsysteme sind ein unterstützender Faktor bei der Kalt- und der Frischluftzufuhr sowie dem generellen Luftabtransport. Flurwinde sind in ihrer Intensität regulär recht schwach ausgeprägt und anfällig gegenüber überlagernden regionalen Strömungen, weshalb sie bspw. bei vermehrt auftretenden windschwachen Sommernächten von großer Bedeutung für die Be- und Durchlüftung des städtischen Raums sind.

Flurwinde entstehen, wenn sich in Gebieten gegenüber ihrem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Dies wird insbesondere durch die Überwärmung bebauter oder versiegelter Gebiete und dem damit einhergehenden konvektiven Aufstieg von Luftmassen (siehe Abbildung 5) gefördert. Der entstehende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Druckausgleichsströmung). Im Gegensatz zu den topographischen Windsystemen ist dieses System eher in Städten mit einem flachen Relief zu finden.



Abbildung 5: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruderalen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz).

Die Kaltluftentstehung beschreibt auf mikro- und mesoskaliger Ebene den nächtlichen Abkühlungsprozess der bodennahen Luftschichten. Mit dem Sonnenuntergang beginnt auf ausreichend großen Grün- und Freiflächen die Kaltluftproduktion. Diese dauert bis in die frühen Morgenstunden an und wird sowohl durch die ausbleibende solare Einstrahlung als auch durch die thermische Ausstrahlung der oberen Bodenschicht bedingt. Da sich die Luft mit dem Erkalten auch verdichtet, strömt sie anschließend flüssigkeitsähnlich der Reliefausprägung folgend in tiefere Regionen (siehe Abbildung 6). Eine signifikante Strömungsdynamik entwickelt sich hierbei ab ca. 1 – 2 ° Gefälle und wird stets von der Rauigkeit (vgl. Kapitel 2.4.1) der überströmten Bodenschichten beeinflusst (siehe Tabelle 2).



Abbildung 6: Schematische Darstellung eines der Orographie folgenden Kaltluftabflusses (helle Pfeile). Ähnlich einer Flüssigkeit versucht die Kaltluft Hindernisse wie bspw. Gebäude zu umströmen. Orthogonal zum Kaltluftstrom ausgerichtete größere Hindernisse, wie bspw. Gebäuderiegel (rechts) bremsen bzw. stauen die Kaltluft.

Sowohl das Entstehungsgebiet als auch die Kaltluftproduktionsrate werden von dem vorhandenen Untergrund bestimmt. Hierbei fördern besonders unversiegelte Freiflächen (z. B. Wiesen, Brachen, Grünflächen etc.) mit einer niedrigen Vegetationshöhe die Kaltluftproduktion. Liegen diese Areale in einem reliefierten Gebiet (z. B. unbebaute Hänge), werden die Kaltluftmassen über die topographischen Windsysteme (Hang- und Bergwinde) abgeleitet. Allerdings können Hindernisse, in Abhängigkeit ihrer Ausprägung (Länge, Höhe, Ausrichtung), den Kaltluftabfluss behindern oder auch komplett zum Erliegen bringen (siehe Abbildung 7).

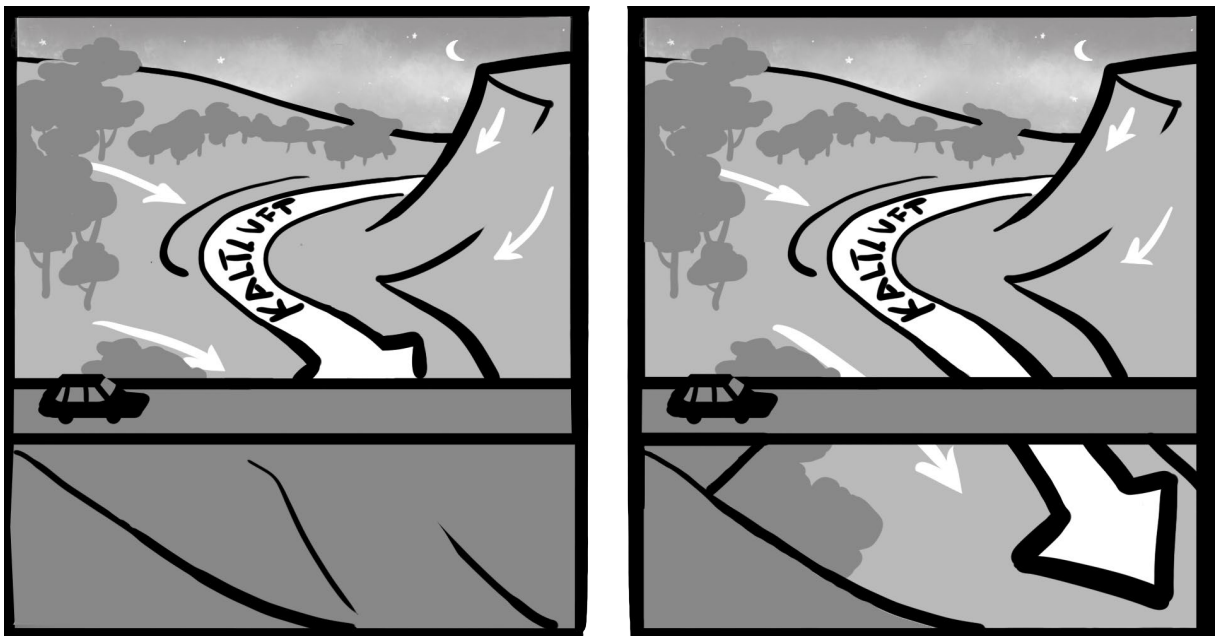


Abbildung 7: Kaltluft verhält sich wie eine zähe Flüssigkeit und folgt, sofern vorhanden, dem Gefälle. Stößt die Kaltluft auf Hindernisse versucht sie sie zu umströmen oder wird gestaut, bis die Kaltluftschichtdicke so mächtig ist, dass das Hindernis überströmt werden kann.

Fehlendes Gefälle bei Kaltluftentstehungsflächen reduziert zwar nicht die Kaltluftproduktion, verringert jedoch den Wirkungsbereich, aufgrund des fehlenden Kaltluftabflusses. Unter Umständen können die Sogwirkungen vorhandener Flurwinde den Kaltlufttransport unterstützen. Waldgebiete auf stark geneigten Flächen [18] tragen ebenfalls zur Kaltluftproduktion bei. Durch die Baumkronen wird das Aufheizen tagsüber verringert und die Neigung des Geländes unterstützt die Durchströmung des kühlen Stammraums. Dies ermöglicht den Kaltluftabfluss aus dem bodennahen Waldbereich. In Abhängigkeit von Gefälle, Dauer und Einzugsgebiet kann eine Kaltluftschicht bis zu einer Höhe von über mehreren Dekametern anwachsen.

Natürliche, unversiegelte Untergründe sind für die Kaltluftentstehung entscheidend. Zudem kann eine geringe Bodenrauigkeit (keine bodennahen Hindernisse wie Mauern, dichte Büsche etc.) zu einem besseren Abflussverhalten an einem Hang führen und sich der Wirkungsraum somit vergrößern.

Im Durchschnitt wird den Acker- und Wiesenflächen das höchste Kaltluftentstehungspotential zugeordnet [18,19]. In der Regel handelt es sich bei diesen Luftmassen um weniger stark thermisch belastete Luft, weshalb sie auch im Zusammenhang mit dem städtischen Luftaustausch umgangssprachlich als „Frischluft“ bezeichnet wird. Wissenschaftlich ist dies jedoch nicht korrekt, da Kaltluft nur einen Temperaturzustand von Luftmassen beschreibt und entsprechend auch aus lufthygienischer Sicht belastet sein kann. Liegt beispielsweise eine starke Emissionsquelle (lufthygienisch) im Abflussbereich eines Kaltluftentstehungsgebiets, so entsteht zwar weiterhin Kaltluft, diese kann aber nicht als unbelastete Luft bezeichnet werden. Entsprechend müssen die Umgebung oder mögliche lufthygienische Störfaktoren bei der Bewertung von potenziellen Frischluftzuflüssen miteinbezogen werden. Der Begriff der Frischluft beschreibt den am Tag durch Photosynthese neu gebildeten Sauerstoff der Vegetation (vornehmlich in Waldgebieten). Dadurch ist Frischluft per se unbelastet und nicht mit Kaltluft gleichzusetzen.

Besonders für urbane Räume in Kessel- oder Hanglagen ist die Kaltluftentstehung und deren Transport für die thermische Regulierung des Stadtklimas und der Luftreinhaltung von großer Wichtigkeit. Die Richtlinie 3787 Blatt 5 des VDI [2] unterstreicht diese Bedeutung mit der Forderung, Kaltluftentstehung und Kaltluftabflüsse in der Stadt- und Regionalplanung zu berücksichtigen.

3 Methodisches Vorgehen und verwendete Software

3.1 Methodisches Vorgehen

Die zunehmende Temperaturverschiebung und insbesondere die Zunahme der sogenannten Kenntage oder Ereignistage, wie bspw. die SOMMERTAGE ($LT_{\max} \geq 25\text{ °C}$), die HEIßEN TAGE ($LT_{\max} \geq 30\text{ °C}$) sowie die TROPENNÄCHTE ($LT_{\min} \geq 20\text{ °C}$), rücken immer stärker in den Fokus der Stadtplanung. Insbesondere durch die Akkumulation der Wärme innerhalb des urbanen Umfelds kann es bereits in mittelgroßen Städten zur Ausprägung von städtischen Wärmeinseln kommen. Diese führen wiederum zur verstärkten thermischen Beeinflussung von Baustrukturen (und Infrastruktur) sowie zur bioklimatischen Belastung für Menschen, Tiere und Pflanzen. In Anbetracht der weiter voranschreitenden Klimaveränderung ist es daher eine wichtige Aufgabe der Kommunen, klimatische Aspekte bei der Stadtentwicklung systematisch zu berücksichtigen. Belastungen müssen durch eine vorausschauende Stadtplanung und die Umsetzungen von individuellen Klimaanpassungsmaßnahmen gezielt für das Umfeld abgebaut werden, während positive Effekte gefördert und erhalten werden müssen.

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden [21,22], die eine direkte Grundlage und einen Zugang für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen bieten. Prinzipiell werden beim Stadtklima zwei Aspekte betrachtet, die Thermischen und die Dynamischen. Der Arbeitskreis der Umweltmeteorologen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (2018) beschreibt das Stadtklima wie folgt:

„...ein ideales Stadtklima zeichnet sich durch eine möglichst große Inhomogenität mit einer charakteristischen Weglänge von 150 m und einem thermisch und lufthygienisch belastungsfreien Raum aus. Es soll die planerischen Absichten im Außenraum unterstützen...“ [23]

Demzufolge bietet ein heterogenes Mikroklima mehr Freiraum für die individuelle Anpassung von Menschen, Tieren und Pflanzen an ihre städtische Umwelt, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, stadtklimatische Belange mit planerischen Zielen in Einklang zu bringen.

Im stadtplanerischen Kontext wird zwischen mehreren Planungsebenen unterschieden. In Abhängigkeit der gewählten Planungsebene finden sich wiederum unterschiedliche klimatische Einordnungen (= klimatische Planungsebenen) (siehe Abbildung 8), die es zu beachten gilt. So bewegt sich ein Flächennutzungsplan im mesoklimatischen Bereich, wohingegen sich Einzelgebäude oder Gebäudegruppen auf der Ebene des Mikroklimas wiederfinden. Bebauungspläne liegen, je nach Flächenumgriff, zwischen diesen beiden Ebenen und werden dem Lokalklima zugeordnet.

Trotz der direkten und indirekten Wechselbeziehungen der einzelnen stadtklimatischen Ebenen muss dennoch eine strikte fachliche Trennung erfolgen. So kann z. B. eine gesamtstädtische mesoklimatische Analyse nicht auf einen Objektplan gezoomt und angewendet werden. Dies ergibt sich zum einen aus den unterschiedlichen Auflösungen (Rastergrößen) und zum anderen aus den unterschiedlichen klimatischen Fragestellungen, unter deren Aspekten die jeweiligen Klimaanalysen durchgeführt werden (siehe Abbildung 8). Ebenso kann die erforderliche Datenbasis in Abhängigkeit der klimatischen Planungsebene variieren.

Um ein Gesamtbild einer stadtklimatischen Situation darstellen zu können, ist eine mesoskalige Analyse notwendig. Die Ergebnisse der Analyse werden als Klimafunktionskarte dargestellt und geben Aufschluss über die Verteilung verschiedener Klimatope (Flächen, die sich

durch bestimmte klimatische Eigenschaften charakterisieren lassen) sowie über den Einfluss der regionalen Belüftungssituation, auch können für die Stadtentwicklung wichtige Empfehlungen erarbeitet werden. Sollten sich hierbei bereits einzelne „Hotspots“ herauskristallisieren, so können diese nachfolgend, unter Zuhilfenahme mikroklimatischer, numerischer Simulationen, genauer untersucht werden, um detaillierte Maßnahmen zu erarbeiten.

Stadtklimatische Bewertungen, die den Außenraum und somit den direkten Lebens- und Aufenthaltsraum der Menschen betreffen, finden im Maßstab der Mikrokimate ($< 1:1000$) statt. Die Gestaltung der Umwelt hat direkten Einfluss auf die thermische Situation in diesem Bereich und beeinflusst dadurch auch indirekt das Wohlbefinden der Bewohnerinnen und Bewohner. In diesem Maßstab, in dem kleinräumige nachbarschaftliche Einflüsse eine größere Rolle spielen, zeigt sich, ob ein schattenspendender Baum am richtigen Ort gepflanzt wurde oder ob er durch die Baumkrone möglicherweise ein Belüftungshindernis darstellt. Auf den Menschen wirken permanent eine Vielzahl von unterschiedlichen Umwelteinflüssen ein, mit denen sich der Organismus auseinandersetzen muss. Um nun das subjektive Behaglichkeitsempfinden eines Individuums erfassen zu können, müssen alle relevanten Einflüsse, die wiederum in einem komplexen Zusammenspiel miteinander stehen (siehe Abbildung 9), berücksichtigt werden [24]. Durch die Komplexität und Dynamik der mikroskaligen Energieflüsse ist eine gesamtstädtische Darstellung (Simulation) des vorherrschenden Mikroklimas mit einer Auflösung von einem Meter aus technischer Sicht heute noch nicht möglich. Allerdings können einzelne Bereiche (Themenkarten), die für das Stadtklima von Relevanz sind, wie z. B. die Bestandsvegetation oder die Bestandsbebauung, auf unter einen Meter aufgelöst werden.

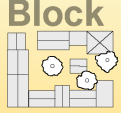
administrativer Bezug	Planungsebene	klimatische Fragestellung	Auflösung (Rastergröße)	klimatische Einordnung
Region 	Regionalplan > M 1: 100.000	regionale Luftaustauschprozesse und Klimafunktionen	100m	Mesoklima ↓
Stadt 	Flächennutzungsplan > M 1: 10.000	Wärmeineleffekt, Belüftungsstrukturen (Rauigkeiten)	25 - 50m	
Ortsteil 	Bebauungsplan M 1: 5.000	Übergang von Klimatop- zu Mikroklimaanalyse	10m	
Block 	Bebauungsplan M 1:1.000	Mikroklimatische Untersuchungen, thermischer Komfort	2 - 5m	Mikroklima ↓
Gebäude 	Bauplan/Objekt M 1:200	Strahlungs- und Gebäudeströmungen	>0 - 2m	

Abbildung 8: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen.

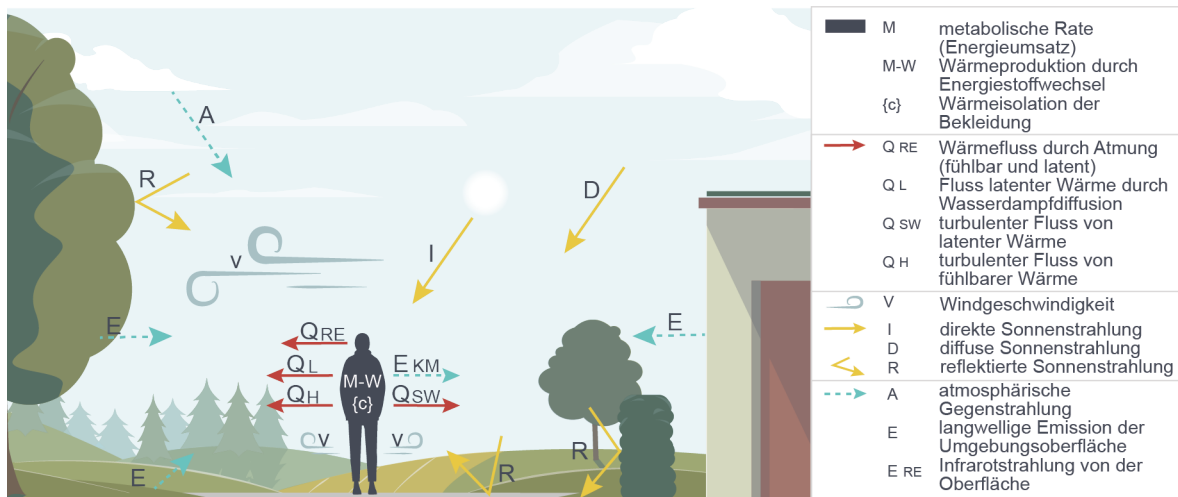


Abbildung 9: Der thermische Wirkungskomplex nach der VDI-RL 3787 Blatt 2. Schematische Darstellung der unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken, wie bspw. direkte Sonneneinstrahlung oder Windgeschwindigkeit, aber auch Wärmeabstrahlungen von Umgebungsoberflächen.

3.1.1 Historische Klimadatenauswertung

In der Beschreibung historischer und projizierter klimatischer Dynamiken werden verschiedene Eingangsdaten von unterschiedlichen Akteuren ausgewertet und miteinander verglichen. Dabei ist die räumliche Auflösung, bspw. der Raster, aber auch die räumliche Verschneidung und Interpretation abhängig von diesen Eingangsdaten (siehe Abbildung 10).

Die Erfassung der historischen Daten und deren Aufbereitung ist in Deutschland die Kernaufgabe der Bundesoberbehörde des Deutschen Wetterdienst (DWD) welcher dem Bundesministerium für Verkehr (BMV) unterstellt ist [25]. Klimatische Messreihen und weiterführende Daten stellt der DWD auf seiner Internetseite frei und überprüfbar zur Verfügung [26].

Die Lufttemperatur und der Niederschlag gelten als die wichtigsten Indikatoren in der klimatischen Betrachtung geografischer Räume. Für die umfassende historische und gegenwärtige Analyse des Klimas werden die Parameter weltweit unter genau festgelegten Bedingungen gemessen. Dafür werden bspw. strahlengeschützte Messfühler genutzt. Die Geräte des DWD messen i. d. R. in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche die Lufttemperatur. Ebenfalls existiert ein standardisiertes Verfahren zur Messung von Niederschlägen. Die Messstationen sind in Deutschland auf aktuell 1.117 Standorte verteilt. Die zeitliche Auflösung variiert dabei zwischen minütlich bis stündlich. Da das Stationsnetz stetig erweitert wird, sind die realgemessenen Zeiträume stationsabhängig, umfassen jedoch häufig eine Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten [26]. Die Zuverlässigkeit der Messungen wird vom DWD in mehreren Schritten automatisiert und manuell überprüft und kann daher als hoch eingeschätzt werden. Dennoch spricht der DWD selbst von einer Fehlerquote von 0,1 % - 1 %, insbesondere bei Werten aus dem Zeitraum vor dem Jahr 1979 [26].

Die klimatische Wasserbilanz ist in Bezug auf die Datenherkunft als gesonderter Parameter zu betrachten, da diese nicht auf Grundlage von Messungen ermittelt wird, sondern in einem Verschnitt der Temperatur und Niederschlagsdaten berechnet wird. Es bestehen verschiedene Berechnungsmethoden, die die Verdunstungsraten von Oberflächen unterschiedlich annehmen. Die Daten des DWD zur klimatischen Wasserbilanz ergeben sich aus einem eigenen Berechnungsverfahren [27,28].

Ferner verfügt der DWD mit einem 1 km x 1 km Raster innerhalb Deutschlands über die Möglichkeit, die gemessenen Temperaturdaten in einer flächendeckenden Darstellung auflösen zu lassen. Die Informationen basieren auf den real gemessenen Werten der DWD-Messstationen, die mittels eines eigenen Interpolationsverfahrens auf ganz Deutschland projiziert werden können, wodurch die klimatischen Dynamiken seit 130 Jahren für bestimmte Parameter beschrieben werden können [26].

Für den klimatischen Parameter der Windverhältnisse liegen bundesweit 218 DWD-Messstationen vor, die seit variierenden Zeitpunkten die langjährigen Windstärken und -richtungen verzeichnen. Wie schon bei den vorher genannten Klimaparametern sind die Windstärken auch in einem flächendeckenden Raster berechnet worden. Die Werte berücksichtigen verschiedene Einflussfaktoren, wie z. B. die Höhe über dem Meeresspiegel, die geographische Lage, die Geländeform und die Landnutzung mittels eines statistischen Verfahrens. Lokale Hindernisse, die die Stationsmesswerte verfälschen könnten, wurden ebenfalls herausgerechnet. Die Abweichungen liegen somit im Bereich von $\pm 0,15$ m/s [29].

Bei der Verwendung bestimmter Eingangsdaten muss immer der Bezugsraum beachtet werden (siehe Abbildung 10). Die DWD-Messstationen decken mit ihrem Stationsnetz eine

Vielzahl von Orten ab, jedoch sind gerade ländliche Regionen in einer geringeren Dichte erschlossen. Zudem befinden sich die Standorte teilweise innerhalb bebauter Umgebungen, teilweise aber auch auf vegetationsbestimmten Freiflächen. Hier ist das Augenmerk auf die lokalen Bedingungen zu richten und dies mit in der Interpretation der Messdaten zu berücksichtigen. Die Daten können sowohl einen Bezug auf die klimatischen Bedingungen innerhalb des Siedlungsraums als auch auf die allgemeinen regionalen Verhältnisse bieten. Gerade bei kleinräumigen klimatischen Prozessen, wie dem bodennahen Windfeld oder städtischen Wärmeineffekten sind die Daten dahingehend zu bewerten. Des Weiteren kann es sinnvoll sein, den Siedlungsraum gesondert von der kommunalen Verwaltungsgrenze zu betrachten, wenn sich bspw. infolge von topographischen Besonderheiten signifikante lokale Unterschiede herausbilden.

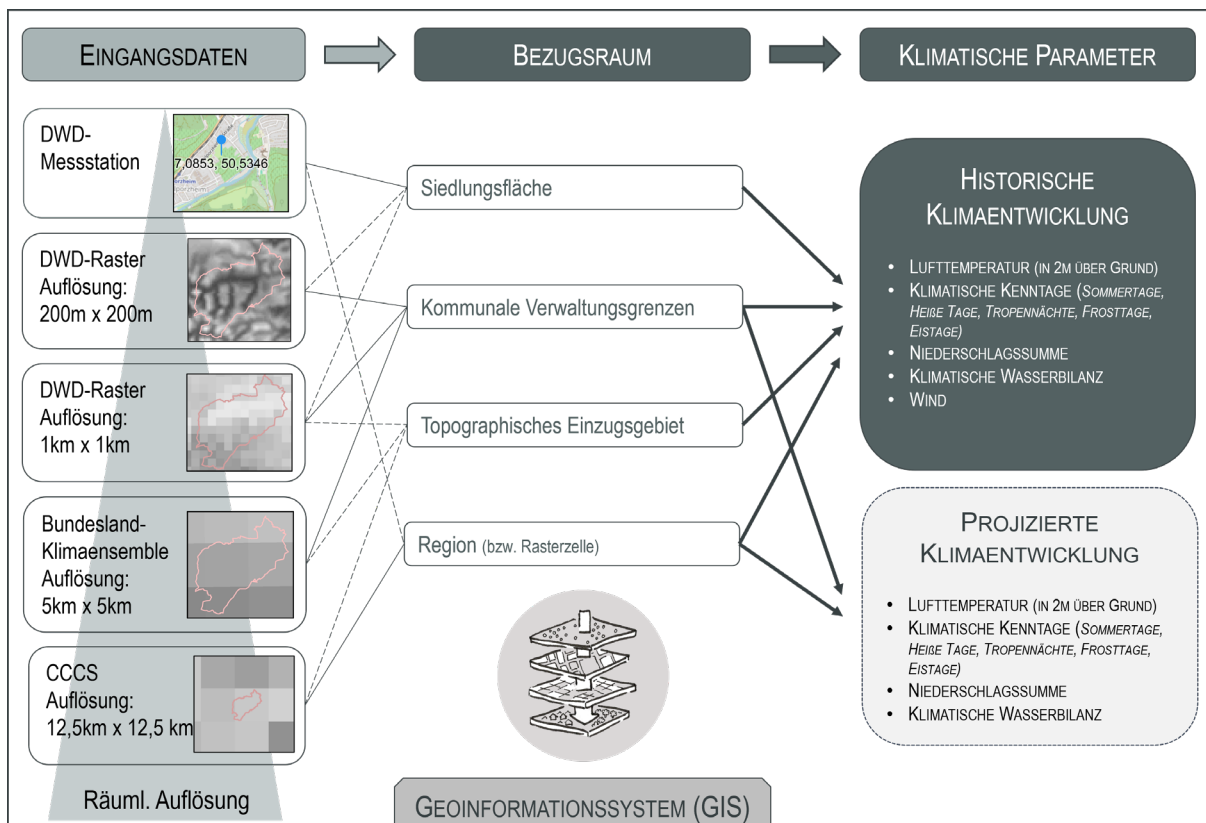


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Auswertungssystematik klimatischer historischer und projizierter Daten; die Pfeile ermöglichen einen Überblick, welcher klimatischer Parameter für welchen Bezugsraum und mit welcher Datengrundlage ausgewertet wurde.

Der Auswertung der klimatischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und Wind mit den jeweiligen Teilaspekten, wie den klimatischen Kenntagen oder der klimatischen Wasserbilanz liegen die Stationswerte vom Flughafen Köln/Bonn (ID 2667) und Königswinter-Heiderhof (ID 683) des DWD zu Grunde. Ferner ermöglicht das Raster des DWD, die gesamte Gemarkung Siegburgs abzubilden und somit auch ortsspezifische Einflüsse zu betrachten.

3.1.2 Projizierte Klimadatenauswertung

Um eine allumfängliche Beschreibung der klimatischen Situation für die Stadt Siegburg zu gewährleisten, ist es notwendig neben dem historisch klimatischen Status Quo auch die erwartbare zukünftige Entwicklung des Klimas zu betrachten.

Klimatische Projektionen werden i.d.R. in Änderungssignalen entlang eines ausgewählten Szenariums für die Entwicklung der Treibhausgaskonzentration (speziell Kohlenstoffdioxid und Methan) in der Atmosphäre beschrieben und berechnet.

Klimamodelle

Die Ermittlung der Projektionspfade der verschiedenen Szenarien folgt einer gestaffelten Modellierungssystematik. Die Berechnung globaler Klimadynamiken besteht aus mehreren Modellen, den sog. Global Climate Modells (GCM), mit einer räumlich gerasterten Auflösung von $0,22^\circ \times 0,22^\circ$. Hieraus lassen sich die sog. Regional Climate Models (RCM) ableiten, die eine Auflösung von $0,11^\circ \times 0,11^\circ$ (rd. 12,5 km x 7,5 km) ermöglichen. Die Modelle können in statistische und dynamische Modelle eingeteilt werden, welche auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen [30]. Methodisch basieren die nachfolgenden Darstellungen bspw. auf den Berechnungen des globalen Klimamodells „MPI-ESM-LR“ und dem regionalen Klimamodell „MPI-CSC-REMO2009“ des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, welches im Zuge des „Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment“ (CORDEX) entstand und eine höhere Auflösung mit detaillierteren Aussagen zu Europa ermöglicht [31–33].

Trotz der räumlich präziseren Auflösung der RCMs ist eine direkte Übersetzung auf lokale Gegebenheiten, wie etwa den Klimaszenarien innerhalb kommunaler Verwaltungsgrenzen, nicht valide, da etwaige Ungenauigkeiten der Modelle nicht herausgefiltert werden. Empfohlen wird i.d.R. eine Auswertung von 3x3 Rasterzellen [34]. Die dargestellten Ergebnisse sind stets als lokal allgemeingültige Werte zu verstehen und nicht auf kleinräumige Gegebenheiten, wie etwa einzelne Bebauungsstrukturen, anzuwenden. Insbesondere die thermischen, erwartbaren Belastungen innerhalb von Siedlungsgebieten können sich stark unterscheiden. Allerdings können aktuell messbare Temperaturunterschiede angenommen werden, um die projizierten Werte weiter kleinräumig einzuschätzen.

Die Datengrundlage für die Auswertungen der klimatischen Veränderungen bildet ein **Klimaprojektionsensemble**, berechnet für das Bundesland Nordrhein-Westfalen. Die Auswahl der verschiedenen Klimarechenmodelle wurde der Vorlage des DWD-Referenzensemble v2018 entsprechend festgelegt und aufbereitet.

Trotz der grundlegenden Richtigkeit der einzelnen RCMs divergieren die einzelnen Rechenmodelle untereinander in Bezug auf die Ergebnisse einzelner klimatischer Parameter. Als Schritt hin zur Validierung der Projektionen in einem Untersuchungsraum sind daher die RCMs in einem sog. Klimaprojektionsensemble zu vergleichen und zu mitteln. Hierbei werden die Werte einer Plausibilitätsprüfung und einer qualitativen Prüfung nach eindeutig formulierten Kriterien unterzogen. In NRW wurden die Modelle in Kooperation mit dem DWD erarbeitet. Das Ensemble für das RCP 4.5 setzt sich aus 12 RCM zusammen, das RCP 8.5-Ensemble umfasst 21 Modelle [2,3].

Wie bei den historischen Klimaauswertungen (vgl. Kapitel 3.1.1 und 5.1) wird zur Veranschaulichung der klimatischen Veränderungen zum einen zwischen zwei 30-jährigen Mitteln und zum anderen zwischen zwei Klimaszenarien unterschieden. Auf diese Weise werden mittelfristige

Dynamiken wie auch die langfristige Perspektive betrachtet und durch die Auswertung der zwei Szenarien wird zudem die Varianz dargestellt, welche sich aus möglichen zukünftigen Konzentrationspfaden einschließt.

Entsprechend wurden in der vorliegenden Stadtklimaanalyse die Veränderungen bestimmter klimatischer Parameter für die RCP 4.5 (*langfristige Transformation zur Klimaneutralität*) und RCP 8.5 (*rasantes fossiles Wirtschaftswachstum* – aktuell anzunehmen) für die langjährigen Mittel 2031 - 2060 und 2071 - 2100 aus den Klimaensembledaten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) berechnet.

Für die Interpretation der Daten und Werte ist wichtig zu beachten, dass Projektionen annahmebasiert sind, die bereits 2012/2013 entwickelt wurden. Die getroffenen Annahmen stammen aus dem 5. IPCC-Bericht und nehmen etwa im RCP 2.6-Szenario ein sofortiges Handeln ab diesem Jahr an [35]. Die reale Entwicklung in den vergangenen 10 Jahren weisen jedoch zunehmend auf eine Überschreitung des angenommenen Treibhausgaskontingents für das 2 °C-Ziel, welches das RCP 2.6 Szenario repräsentiert (siehe Abbildung 57). Im aktuellen Bericht des Weltklimarates wird das Niveau einer globalen Erwärmung von 1,5 °C bereits 2030-2035 erwartet, wenn bis dahin nicht der Ausstoß von CO₂ um 65 % gegenüber dem Jahr 2019 reduziert wird [36].

Klimatische Projektionen werden i.d.R. in Änderungssignalen beschrieben und berechnet. D.h. es wird die relative Veränderung für einen zukünftigen Zeithorizont (bspw. das 30-jährige Mittel 2031-2060) gegenüber einer historischen Referenzperiode dargestellt.

Für den vorliegenden Bericht bedeutet dies, dass die Änderungssignale zunächst für die langjährigen Mittel 2031-2060 und 2071-2100 aus den Klimaensembledaten des LANUV berechnet wurden. Anschließend wurden die Änderungssignale mit den realgemessenen historischen Daten des DWD interpoliert, wodurch die absoluten Werte für NRW und Siegburg vorliegen.

3.1.3 Ableitung der Klimaanalysekarte

Ziel der Erstellung einer Klimaanalysekarte (früher Klimafunktionskarte (KFK)) ist es, Flächen und deren Verbindungen miteinander hinsichtlich ihrer Klimafunktionen zu bewerten und daraus im Folgenden planungsrelevante Empfehlungen für die Stadt- und Landschaftsplanung abzuleiten. Hierfür werden grundlegende klimatische Aspekte (siehe Tabelle 4) unter Einbeziehung ihres Ursprungs und ihrer Abhängigkeiten zugrunde gelegt.

Tabelle 4: Grundlegende klimatische Aspekte und deren Ursprung bzw. ihre Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klimafunktionen herangezogen werden.

Klimatischer Aspekt	Ursprung und Abhängigkeit
Wärmebelastung	• solare Einstrahlung • umgebendes Gebäudevolumen und dessen Materialität • vorhandene Vegetation
Übergeordnetes Strömungsfeld (Luftleitbahnen)	Für die Durchlüftung der Stadt sorgen häufig großräumige (synoptische) Winde. Die Winde in der Stadt hängen dabei von • der Anströmungsrichtung, • der baulichen und • der topographischen Struktur der Stadt ab. Für die Durchlüftung der Stadt sind daher Luftleitbahnen (zusammenhängende, windoffene Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit) von entscheidender Bedeutung.
Autochthones Windfeld (Flurwind)	Als Ergänzung zu den großräumigen Winden bilden sich, vornehmlich während austauscharmer Wetterlagen, auch lokale (autochthone, also eigenbürtige) Strömungen aus. Häufig werden diese durch lokale Temperaturdifferenzen angetrieben. Ihnen kommt in der stadtklimatischen Bewertung eine besondere Bedeutung zu, da sie an (windstillen) Hitzetagen / Tropennächten die einzigen, vornehmlich kühlenden Windströmungen darstellen.
Nächtliche Kaltluftproduktion	Beim Ausbleiben des externen Strahlungsantriebes der Sonne (nach Sonnenuntergang) findet die Aus- bzw. Abkühlung aller Flächen und Objekte auf der Erdoberfläche statt. Dabei kühlen insbesondere Acker- und Wiesenflächen besonders schnell und stark ab, wodurch die Temperatur der bodennahen Luftschichten sinkt, und so Kaltluft entsteht.

3.1.4 Ableitung der Planungshinweiskarte

Die Planhinweiskarte (PHK) transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte (bzw. KFK) sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung. Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken können so synergetische, aber auch konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Maßnahmenempfehlungen - in Bezug auf die kommunale Planung herausgearbeitet werden.

Über die statistische Verteilung der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (subsidiäre Themenkarten) lassen sich Stadtteilcharakteristika ablesen. Diese können für eine individuelle klimatische Beschreibung der einzelnen Stadtteile sowie der gesamten Stadt und für zukünftige Planungsentscheidungen, z. B. in Hinblick auf eine optimierte städtische Belüftung oder den Abbau von Wärmeinseln, herangezogen werden. Die Planungshinweiskarte in Kombination mit den im Erläuterungsbericht genannten konkreten Handlungsempfehlungen dient zukünftig als Instrument um die Schutz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Stadträumen in Bezug auf ihre Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Veränderungen hinsichtlich der klimatischen Wirkgrößen frühzeitig abzuleiten. Die Funktionsräume sind hinsichtlich ihrer Planungsrelevanz im städtebaulichen Kontext geschärft und werden dabei konkret beschrieben sowie in mehreren planerischen Bewertungsstufen, in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1 [20], dargestellt.

Für die Stadt Siegburg wurden in der Planungshinweiskarte neben den raumbezogenen Planungshinweisen (unterschiedliche Ausgleichsräume und Bebaute Räume) auch thematische Planungshinweise in Form von Piktogrammen ausgewiesen. Die Piktogramme stellen konkrete Handlungsempfehlungen dar und werden aus den unterschiedlichen Themenkarten und der Klimaanalysekarte abgeleitet. Sie beschreiben beispielsweise die Sicherung bestimmter klimabestimmender Faktoren (z.B. Kaltluftversorgung) und / oder den Ausbau bzw. die Entwicklung von aktuell defizitären Räumen zu einem bestimmten Thema (z.B. Vegetationsanteil erhöhen).

3.2 Technische Umsetzung

Die Technik der Erstellung einer Klimafunktionskarte (jetzt Klimaanalysekarte) hat sich seit Anfang der 1970er dahingehend verändert, dass durch den Einsatz moderner Geoinformationssysteme (GIS) wesentliche Verbesserungen in der Erfassung der klimatischen Wechselbeziehungen möglich wurden. Obwohl national wie auch international keine einheitlichen Standards zur Herleitung einer Klimafunktionskarte existieren, ist die Verschneidung zuvor erfasseter stadtklimatischer Einflussgrößen mit dem Ziel der Klimatopausweisung und -evaluierung anerkannte wissenschaftliche Praxis [37,38,21,39–41]. Insbesondere haben Ng & Ren [42] mit ihrem umfassenden Werk „The Urban Climatic Map“ die internationale und nationale Verbreitung und Erstellung moderner Klimafunktionskarten thematisiert.

In diesem Zug erfolgt die Analyse einzelner klimatisch relevanter Größen (subsidiäre Themenkarten), die Berechnung der Klimaanalysekarte sowie die Entwicklung der Planungshinweiskarte innerhalb eines Geoinformationssystems (hier ArcGISPro der Firma Esri).

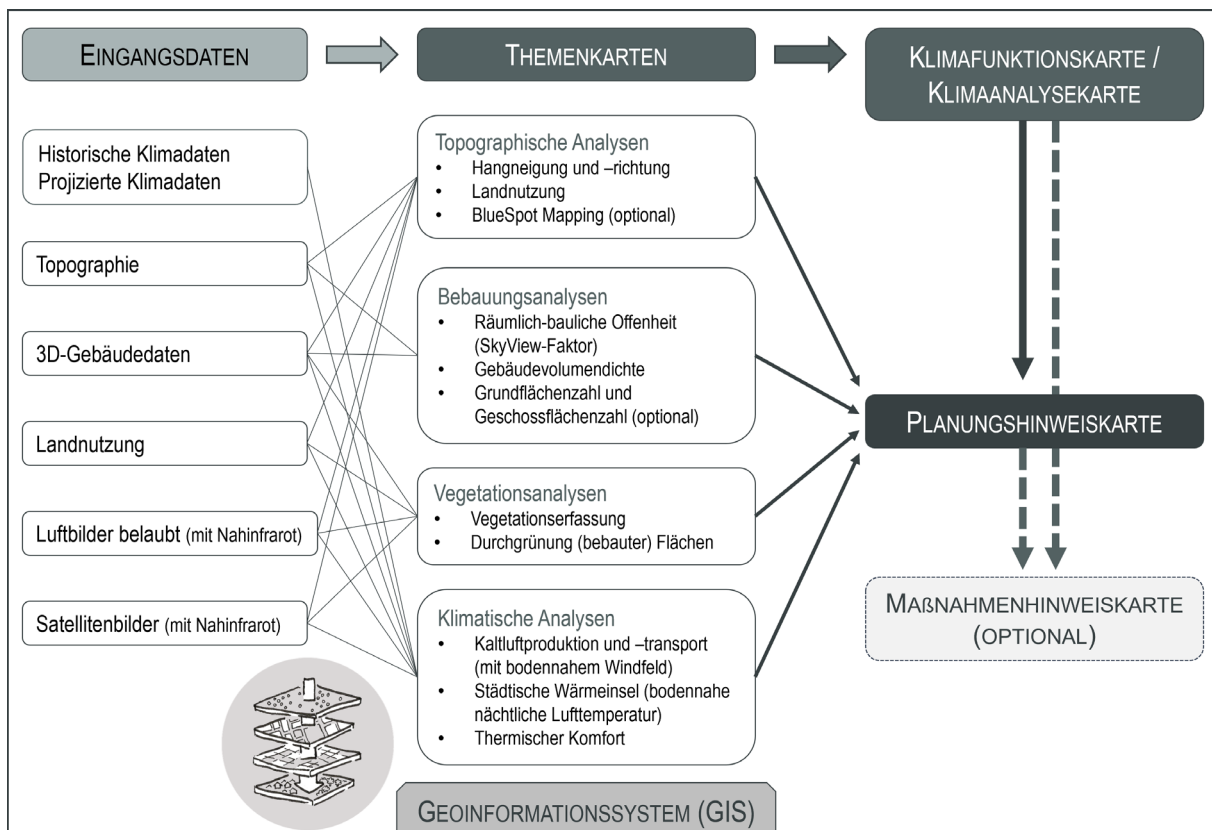


Abbildung 11: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung der Klimaanalysekarte und der Planungshinweiskarte. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen.

Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, werden die einzelnen Themenkarten mit Hilfe mehrerer und unterschiedlicher Eingangsdatensätzen erstellt. Entgegen den Eingangsdaten, welche diskrete (klar abgegrenzte Daten) stadt- und landschaftsplanerische Informationen abbilden, repräsentieren die Themenkarten klimarelevante räumliche Ableitungen. Die Entwicklung der Themenkarten basiert auf physikalisch korrekten Berechnungen innerhalb des GIS. Die Methodik zur Herleitung wurde unter anderem im Rahmen unterschiedlicher Arbeiten entwickelt

und geprüft [21]. Dabei werden die Ergebnisse der Themenkarten immer auch in den planerischen Kontext (siehe Abbildung 12) gesetzt, so dass die Verwendbarkeit im Planungsalltag gewährleistet wird.

Auf Basis der Themenkarten wird in der Folge die Klimaanalysekarte abgeleitet. Dies geschieht unter Zuhilfenahme einer linearen Wertungsmatrix, welche auf den geolokalen Besonderheiten der Stadt, sowie der wissenschaftlichen klimatischen Expertise beruht.

Gleichzeitig fließen auch numerische Simulationen (bspw. zur Kaltluftentstehung und -transport) in den Entstehungsprozess ein.

Mit Hilfe der Planungshinweiskarte werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Themenkarten, der Klimaanalysekarte und – sofern vorhanden – weiterer stadtklimatische Analysen und Untersuchungen in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer zukunftsorientierten (klimaangepassten) Entwicklung des Untersuchungsraums transformiert.

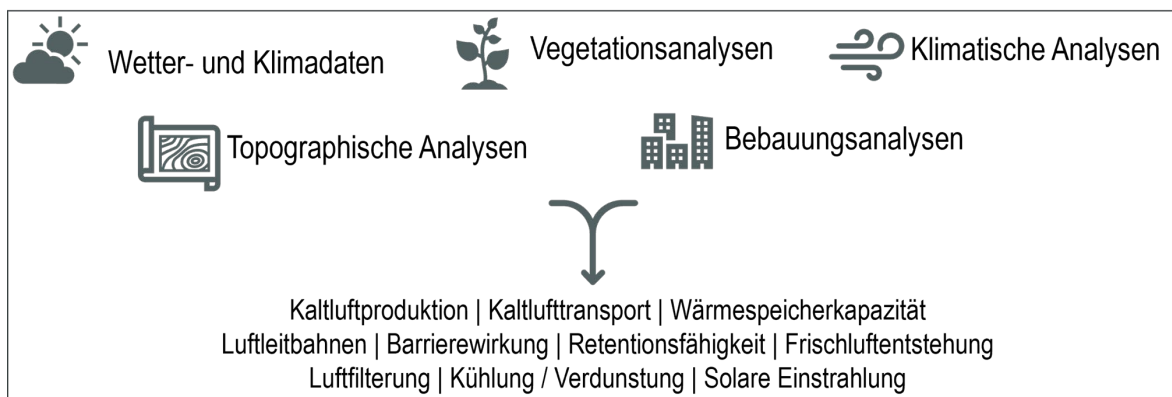


Abbildung 12: Die unterschiedlichen Daten und Analysen der Stadtklimaanalyse ermöglichen konkrete Aussagen zu unterschiedlichsten Fragestellungen und klimatischen Aspekten im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung.

3.3 Verwendete Software

3.3.1 Geoinformationssystem

Geoinformationssysteme (GIS) stellen eine Schnittstellentechnologie zwischen räumlichen und technischen Sachdaten dar. Einzig über GIS ist es möglich, Daten im Raum zu verorten und gleichzeitig räumlich und zeitlich zu analysieren (siehe Abbildung 13). Unter der Berücksichtigung bzw. der Erfassung räumlicher sowie zeitlicher Korrelationen, können analytische, planerische und entwerferische Mehrwerte generiert werden. Gleichzeitig organisieren Geoinformationssysteme Geodatenbestände und ermöglichen so die Verwaltung von räumlichen, zeitlichen und technischen Daten auf Datenbankebene.

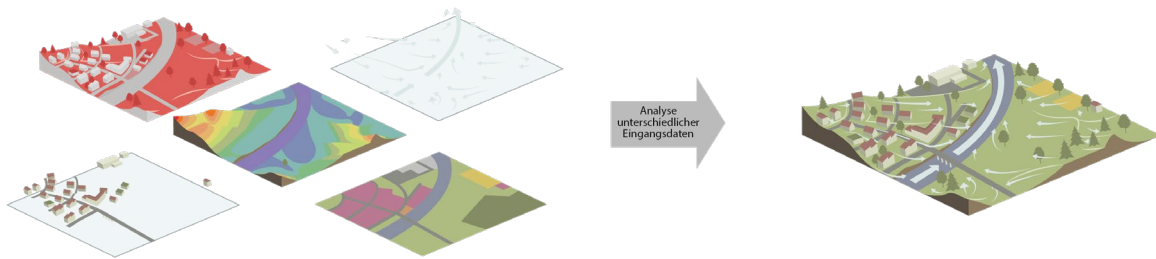


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (Raster- oder Vektordaten) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität zu schaffen.

3.3.2 Kaltluftsimulationen

„KLAM_21 ist ein vom Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickeltes zweidimensionales, mathematisch-physikalisches Simulationsmodell zur Berechnung von Kaltluftflüssen in orographisch gegliedertem Gelände für Fragen der Standort-, Stadt- und Regionalplanung. (...) Das Modell simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in einem beliebig auswählbaren, rechteckig begrenzten Untersuchungsgebiet. Über diese Fläche wird ein numerisches Gitter gelegt, typische Gitterpunktabstände sind dabei 20 bis 50 m. Die Modellgebietsgröße wird in der Regel so gewählt, dass alle relevanten Kaltlufteinzugsgebiete erfasst sind. Bei 50 m Gitterabstand beträgt z.B. die maximale Größe 22.500 km². Jedem Gitterpunkt werden eine Flächennutzung (schematisiert in 9 Nutzungsklassen, Sondernutzungen können bei Bedarf ergänzt werden) sowie eine Geländehöhe zugeordnet. Jeder Landnutzungs-kategorie wiederum entspricht eine fest vorgegebene Kälteproduktionsrate und eine „Rauigkeit“ als Maß für den aerodynamischen Widerstand sowie gegebenenfalls eine „Porosität“ als Maß für die Durchlässigkeit von bebauten Flächen. Außerdem können aus dem Gelände herausragende Hindernisse (z.B. Einzelgebäude, Dämme, Schallschutzwände) modelliert werden, die von der Kaltluft erst dann überwunden werden, wenn sie eine entsprechende Höhe erreicht hat. Das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen bestimmt das Entstehen, Fließen und die Ansammlung der Kaltluft. Der Start der Simulation liegt kurz vor Sonnenuntergang. Zu diesem Zeitpunkt wird eine annähernd adiabatisch geschichtete Atmosphäre vorausgesetzt, in der keine horizontalen Gradienten der Lufttemperatur und der Luftdichte vorhanden sind. Es werden während der gesamten Nacht gleichbleibend gute Ausstrahlungsbedingungen, das heißt eine geringe Bewölkung, angenommen. Möglich ist die Vorgabe einer schwachen, durch regionale Luftdruckunterschiede hervorgerufenen Grundströmung des Windes. Der

Simulationszeitraum von 8 Stunden entspricht der mittleren Andauer einer Sommernacht. Im Gegensatz zu stark vereinfachenden Modellen, die auf einer „statischen“ Analyse des Reliefs und der Landnutzung beruhen, können mit KLAM_21 Kaltluftbewegungen in ihrer Dynamik und zeitlichen Entwicklung flächendeckend wiedergegeben werden. Die physikalische Basis des Modells bilden eine vereinfachte Bewegungsgleichung und eine Energiebilanzgleichung, mit der der Energieverlust und damit der „Kälteinhalt“ der Kaltluftschicht bestimmt wird. Aus dem Kälteinhalt einer jeden Säule wird dann (unter der Annahme einer bestimmten Höhenabhängigkeit der Abkühlung) die Kaltluflhöhe errechnet. Als Ergebnis erhält man die flächenhafte Verteilung der Kaltluflhöhe und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten.“ [43]

3.3.3 Windfeldsimulationen

Um die Interaktionen der vielen unterschiedlichen Faktoren realitätsnah zu simulieren, werden Windfeldsimulationen primär mit numerischen Strömungsmechanik-Modellen (CFD Computer Fluid Dynamics) durchgeführt.

Durch die Verwendung der international evaluierten Softwareerweiterung „Airflow Analyst“ ist es möglich, das Windfeld direkt innerhalb des Geoinformationssystems zu berechnen. Bei der Berechnung des Windfeldes wird eine räumliche Auflösung von 0,5 bis 1 m zugrunde gelegt. Da das berechnete Windfeld den 3-dimensionalen Raum abdeckt, können unterschiedlichste Informationen zum Windfeld für jede beliebige Höhe abgefragt werden. Dies ist insbesondere dann von großem Interesse, wenn zu überprüfen ist, inwieweit vertikale und horizontale Veränderungen (z. B. durch neue Gebäudestrukturen, Vegetation o. ä.) im Windfeld auftreten.

Innerhalb des Geoinformationssystems kann die Simulationssoftware numerische Analysen turbulenter Strömungen über komplexer Topografie im urbanen und ruralen Raum durchführen. Als Eingangsparameter werden eine gitterartige Beschreibung der Geländehöhe, Rauigkeit sowie Windbeobachtungsdaten oder ein alternatives Grenzschichtprofil, welches in einer Datei vorliegt, verwendet. Das Windfeld wird in einem 3D-Raster berechnet und ermöglicht die Nachbearbeitung der Ergebnisse sowie den Export von Daten in ein GIS-konformes Austauschformat.

4 Charakterisierung des Untersuchungsraums

4.1 Räumliche Charakterisierung der Region

Die Stadt Siegburg liegt im Rhein-Sieg-Kreis (Regierungsbezirk Köln) in Nordrhein-Westfalen und erstreckt sich über eine Fläche von rund 23,66 km² [44]. Als Teil der Metropolregion Rheinland profitiert Siegburg von seiner zentralen Lage zwischen den Städten Bonn und Köln sowie seiner Nähe zu bedeutenden Verkehrswegen wie der Autobahn A3 und Bahnanbindungen an das Fernverkehrsnetz bspw. in Richtung Frankfurt.

Das Kloster Siegburg wurde bereits 1065 erwähnt und die Stadt Siegburg erstmalig zwischen 1181 und 1185 [45]. Durch die Eingemeindung mehrerer Gemeinden zwischen 1899 und 1969 wurde das Stadtgebiet sukzessive vergrößert [45] und hat aktuell rd. 43.930 Einwohnern und Einwohnerinnen [46].

Der administrative Raum der Stadt umfasst rd. 2.36 ha (siehe Tabelle 5), auf den gut 36 % Siedlungsflächen und 11 % Verkehrsflächen entfallen. Gut die Hälfte des Gebiets sind Vegetationsflächen im Verhältnis 2/3 Wald und Gehölze zu 1/3 landwirtschaftlich genutzter Fläche. Fließgewässer und stehende Gewässer machen rd. 5 % der Gesamtfläche aus, dazu zählt aber nicht der Stausee WAHNBACHTALSPERRE östlich von Siegburg.

Siegburg hat eine wirtschaftliche Bedeutung in der Region. Neben dem Einzelhandel und Dienstleistungssektor spielen auch traditionelle Wirtschaftszweige wie Landwirtschaft und Handwerk eine wichtige Rolle. Die Nähe zu Bonn und Köln sowie die gute Verkehrsanbindung machen Siegburg auch zu einem attraktiven Standort für Unternehmen verschiedener Branchen. Auch der Tourismus trägt zur Wirtschaft in Siegburg bei, vor allem aufgrund der Nähe zu touristischen Attraktionen wie dem Siebengebirge.

Tabelle 5: Übersicht zur Flächenverteilung (Landnutzung) des administrativen Raums von Siegburg [47]

Fläche		Hektar [ha]
Siedlungsfläche	Wohnbau-, Industrie- und Gewerbefläche	578
	Sport-, Freizeit- und Erholungsgebiete, Friedhofsflächen	122
	Flächen anderer Nutzung	144
	Abbauland und Halde	2
Verkehrsfläche		278
Summe		1.124
Vegetationsfläche		
	Landwirtschaftlich genutzte Fläche	385
	Wald und Gehölz	708
	Moor, Heide, Sumpf, Unland	30
Gewässer		119
Summe		1.242
Gesamtfläche		2.366

4.2 Topographie und räumliche Besonderheiten

Siegburg liegt in einer abwechslungsreichen topographischen Umgebung rund 10 km östlich des Rheins an der Mündung der Agger in die Sieg. Die Stadt erstreckt sich über Hügel und Täler entlang des Flusses Sieg, der durch das Stadtgebiet fließt. Siegburg befindet sich im Südosten der Kölner Bucht und ist im Osten durch das Bergische Land und im Süden durch das Pleiser Hügelland begrenzt. Die Höhenlage des Stadtgebietes selbst variiert zwischen rund 50 und 220 m über dem Meeresspiegel [48]. Einer der markanten Erhebungen in Siegburg ist der rund 118 m hohe Michaelsberg [49]. Dieser ist bekannt für sein ehemaliges Benediktinerkloster. Mittlerweile werden die Gebäude durch das katholische soziale Institut des Erzbistums Köln bewirtschaftet. Vom Michaelsberg erhält man einen weiten Blick über die Stadt und das Siegtal. Die höchste Erhebung befindet sich mit rund 220 m in Braschoß. Dabei handelt es sich um Ausläufer des Bergischen Land.

4.3 Naturräumliche Einordnung

Die Stadt Siegburg liegt im Südosten der „Kölner Bucht“ am Übergangsbereich zum „Rheinische Schiefergebirge“ ([50], siehe Abbildung 14 oben). Der Naturraum D35 ist die „Kölner Bucht und Niederrheinisches Tiefland“, welche Teil des „Nordwestdeutschen Tieflandes“ ist ([51], siehe Abbildung 14 unten). Diese naturräumliche Einheit zeichnet sich durch ihre flache Landschaft mit fruchtbaren Böden und geringen Höhenunterschieden aus.



Abbildung 14: Ausschnitt aus den Naturräumlichen Großregionen ([50], oben) sowie den Großlandschaften ([51], unten) Deutschlands.

Der Fluss Sieg ist von Bedeutung für die Wasserversorgung, die Landwirtschaft und den Naturschutz in der Region. Er bietet Lebensraum für verschiedene Pflanzen- und Tierarten. Zusätzlich zur Sieg gibt es in Siegburg auch kleinere Bäche und Fließgewässer, die das lokale hydrologische System ergänzen und die Wasserversorgung der Stadt unterstützen.

In Siegburg sind mehrere Schutzgebiete vorhanden (siehe Abbildung 15), die eine bedeutende Rolle bei der Bewahrung der Biodiversität und des natürlichen Lebensraums spielen. Die meisten Schutzgebiete befinden sich in den Außenbereichen der Stadt.

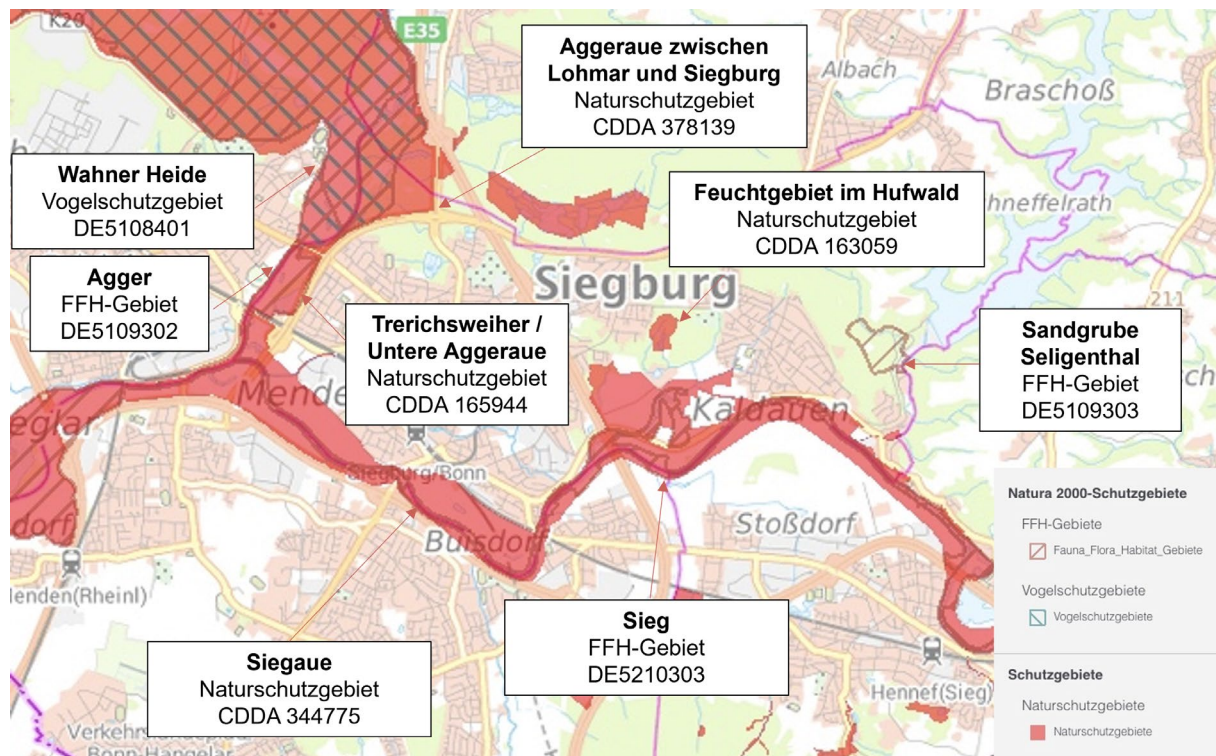


Abbildung 15: Auszug aus der interaktiven Karte Schutzgebiete in Deutschland des BfN [52] für den administrativen Bereich der Stadt Siegburg. Naturschutzgebiete sind gefüllt rot und FFH-Gebiete braun schraffiert dargestellt.

Am nordwestlichen Stadtrand von Siegburg befindet sich ein Teil des Naturschutzgebietes AGGERAUE ZWISCHEN LOHMAR UND SIEGBURG. Zu den vorkommenden Pflanzenarten zählen u. a. die Hainbuche (*Carpinus betulus*) und das Zottige Weidenröschen (*Epilobium hirsutum*) und zu den Tierarten das Bachneunauge (*Lampetra planeri*) [53]. Das Naturschutzgebiet überschneidet sich mit südlichen Teilen des Vogelschutzgebietes WAHNER HEIDE [54] und des FFH-Gebietes AGGER [52]. Südlich angrenzend am westlichen Stadtrand befindet sich außerdem das 34 ha große Naturschutzgebiet TRERICHSWEIHER / UNTERE AGGERAUE [55]. Das weitläufige Naturschutzgebiet SIEGAUE [56] grenzt direkt südlich davon an. Es beginnt westlich von Siegburg und schlängelt sich im Süden der Stadt weiter entlang des Flusses und seiner Seitenarme durch Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Vornehmlich finden hier Vogelarten wie der Graureiher (*Ardea cinerea*) einen Lebensraum, darunter auch seltene und bedrohte Spezies. Das Naturschutzgebiet überschneidet sich zum Teil mit dem FFH-Gebiet SIEG [57]. Zu den hier vorkommenden Anhang-II-Arten zählen u. a. der Lachs (*Salmo salar*), der Bitterling und das Flussneunauge (*Lampetra fluviatilis*). Zwischen Stallberg und Kaldauen befindet sich das lediglich 9 ha große Naturschutzgebiet FEUCHTGEBIET IM HUFWALD und am östlichen Stadtrand das 23 ha große FFH-Gebiet SANDGRUBE SELIGENTHAL [55].

5 Klimatisch-planerische Analysen

5.1 Klimatische Charakterisierung der Region

In der Umweltmeteorologie hilft die historische Betrachtung klimatischer Parameter bei dem Aufzeigen von klimatischen Veränderungen und der klimatischen, regionaltypischen Bewertung. Außerdem bilden sie die Grundlage für weitergehende klimatische Analysen, wie bspw. der Simulation der bodennahen Lufttemperatur und damit der Ableitung des städtischen Wärmeinseleffekts. Mittels der klimatischen Charakterisierung der Region werden übergeordnete Dynamiken der vergangenen Jahre sichtbar. Die klimatischen Analysen befinden sich auf der Ebene des Mesoklimas und bilden somit die Grundlage für detaillierter Stadtklimauntersuchungen (siehe Abbildung 8).

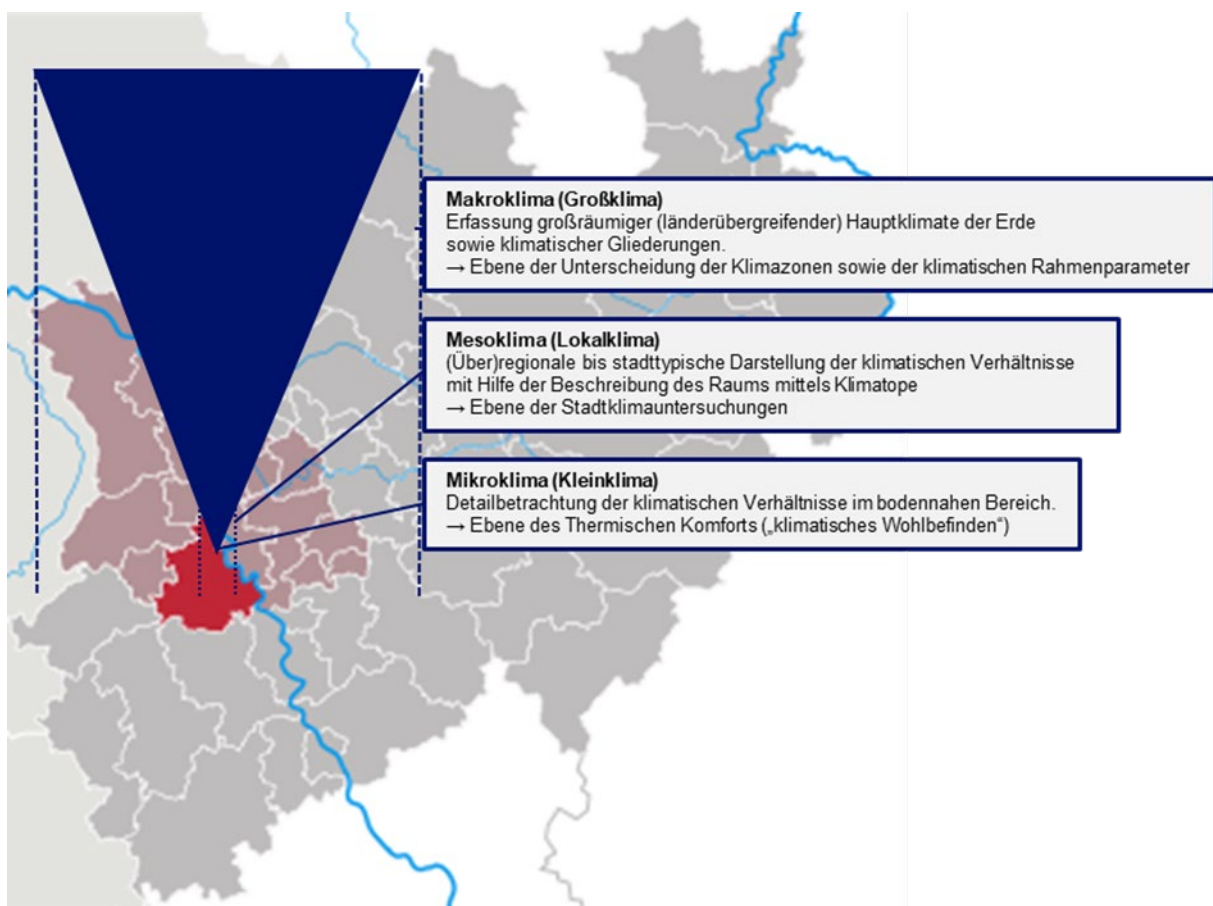


Abbildung 16: Einordnung der klimatischen Untersuchungsebenen in Makro-, Meso- und Mikroklima

In der klimatischen Charakterisierung gilt es zunächst, das großräumigere Mesoklima (siehe Abbildung 16) zu betrachten. Unterschiede zu anderen Regionen in Deutschland werden hierdurch hervorgehoben, was anhand der Abbildung 17 und Abbildung 18 nachvollzogen wird.

Die regionale, klimatische Gliederung von Siegburg im langjährigen Mittel (1991-2020) wird auf die dort vorherrschenden thermoklimatischen Schwankungen bezogen, d. h. die Differenz zwischen dem monatsgemittelten Temperaturminimum im Winter und dem Temperaturmaximum im Sommer. Diese liegen im Bereich der Gemarkung Siegburg bei 15,9 K zwischen dem

kühlsten Monat Januar und dem wärmsten Monat Juli (siehe Kapitel 5.1.1) und ist demnach mit einem maritimen Klima übereinstimmend. Der Unterschied zwischen kontinentalen und maritimen Klimata besteht darin, dass sich kontinental geprägte Regionen durch eine klimatisch wechselhaftere und heterogene Gesamtsituation auszeichnen als die maritim geprägten.

Neben der thermoklimatischen Typisierung ist außerdem die niederschlagsbezogene pluvioklimatische Typisierung in der Kartendarstellung berücksichtigt. Die Stadt Siegburg wird mit einer durchschnittlichen Jahressumme von 814 mm (1991-2020; siehe Kapitel 5.1.1) als „niederschlagsnormal“ typisiert, wobei die angrenzenden Regionen des Siegerlandes und des Sauerlandes ein niederschlagsbegünstigtes Klima aufweisen.

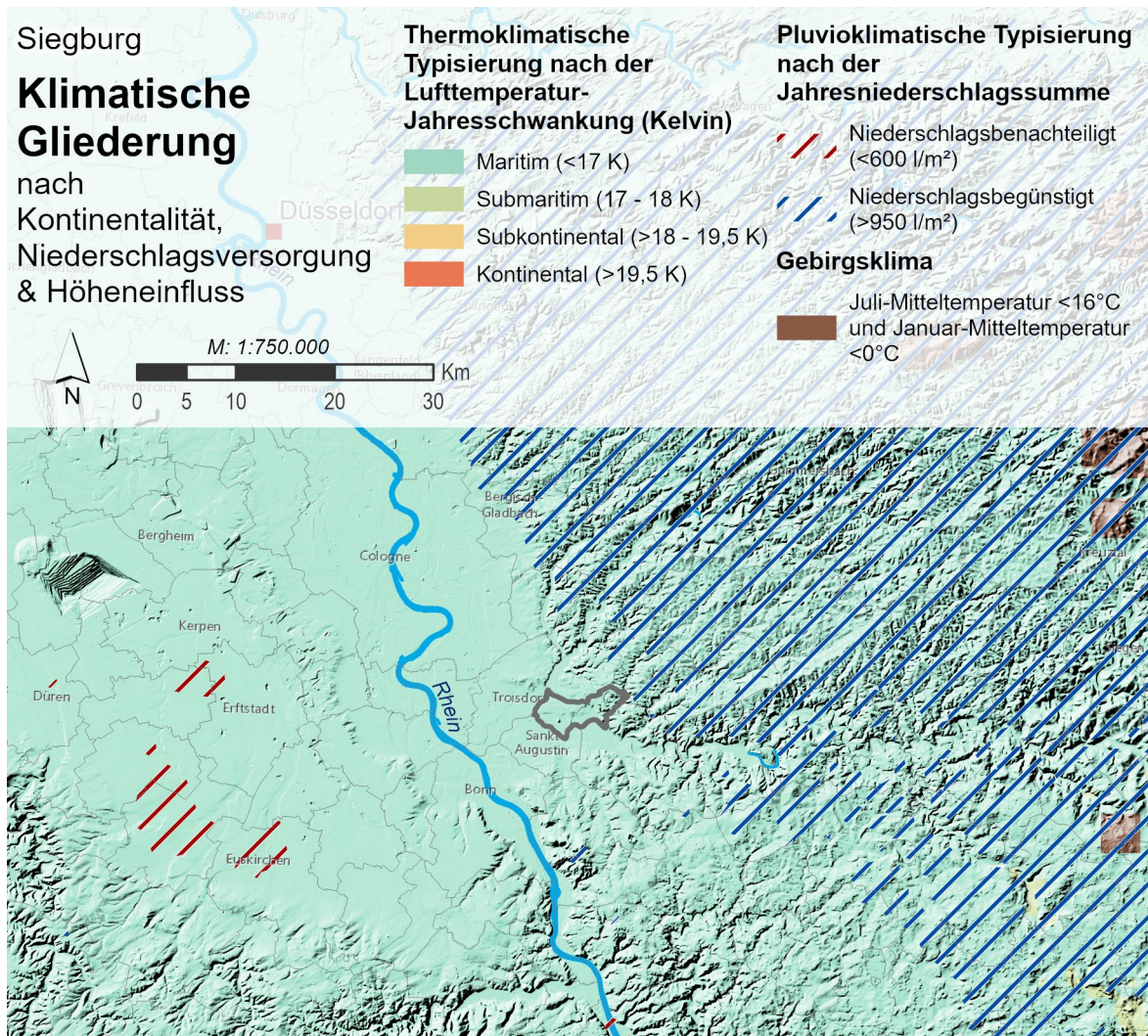


Abbildung 17: Klimatische Gliederung (1991-2020) der Region des Untersuchungsgebietes Siegburgs (eigene Darstellung nach [58] mit Daten von [59]).

Die Abbildung 18 der bioklimatischen Einflüsse in der Region des Untersuchungsgebietes bietet weitergehende eine Einschätzung der regionalen Bedingungen des Mesoklimas. Die Einstufung orientiert sich an den physiologischen Einflüssen auf eine durchschnittliche männliche Person, den „Klima-Michel“ [60]. Für Siegburg zeigt sich, dass es *vermehrt* zu Wärmebelastungen (Stufe 4 von 6) und gleichzeitig *selten* zu Kältereizen (Stufe 1 von 6) kommt. Verwiesen wird indes auf die lokalklimatischen Einflüsse der Köln und Bonn, deren stadtklimatischen Einflüsse nicht eigens in der Bewertung berücksichtigt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der bioklimatischen Reize sind in der farblichen Legende deutsche Großstädte ihrer

bioklimatischen Einordnung entsprechend verortet. Die Stadt Freiburg und die Stadt Rostock bilden die Extreme des bioklimatischen Reizspektrums innerhalb deutscher Städte ab.

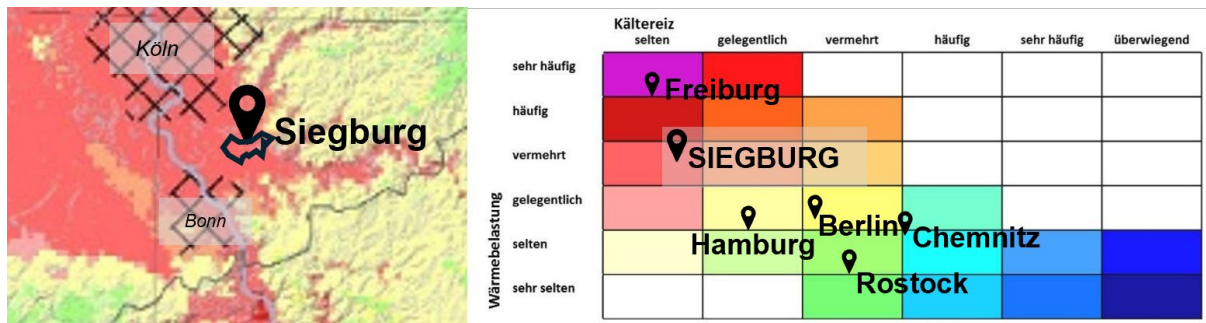


Abbildung 18: Bioklimakarte für den Zeitraum 1981-2010 [60]. Einstufung des DWD hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Bevölkerung, unterteilt in Wärmebelastung und Kältereiz. Zwecks Vergleichbarkeit wurden neben dem Untersuchungsgebiet Siegburg zusätzlich andere deutsche Großstädte in dem Diagramm ergänzt.

5.1.1 Temperatur und Niederschlag

In Abbildung 19 und Abbildung 20 wird die gemittelte Lufttemperatur in Relation mit der Niederschlagssumme gesetzt. Wie bereits bei der Bioklimakarte handelt es sich um sog. Bivariate-Darstellungen bei denen zwei Eingabedatensätze in einer Farbskala vereint werden. Zur Unterstützung beim Lesen der Karte wurden die Temperaturen mit einer Skala von 1 bis 4 codiert und die Niederschlagssummen mit „a“ bis „d“. Somit ist es möglich, Regionen in vier Bereiche zu kategorisieren: kalt-trocken (weiß - 1a); warm-trocken (pink - 4a); kalt-feucht (hellblau - 1d) und warm-feucht (blauviolett - 4d). Des Weiteren entstehen Übergangsbereiche, insgesamt werden 16 Abstufungen dargestellt. Die Werteskala ist derweil nicht gleichmäßig, sondern bildet Quartile (4 Klassen à 25 %), die die Einteilung aufgrund der numerischen Häufigkeit bildet. Dementsprechend entsteht eine gleichmäßige farbliche Darstellung, was der Lesbarkeit zuträglich ist, jedoch verschieden große absolute Wertebereiche umfasst (siehe Tabelle 6).

Das Untersuchungsgebiet von Siegburg befindet sich in einer relativ heißen Region mit 10,7 °C Jahresdurchschnittstemperatur bei gleichzeitig hohen Jahresniederschlägen (814 l/m²/Jahr). Entsprechend wird Siegburg mit 4c codiert. Der klimatische Übergangscharakter wird im Vergleich mit den angrenzenden Kommunen sichtbar. In Richtung des Rheintals nehmen die Niederschläge erkennbar ab.

Tabelle 6: Wertebereiche der verschiedenen Code-Kombinationen (1 bis 4 und a bis d) aus den nachfolgenden Abbildungen

Jahr				
Temperaturen	(a) 2,9-8,8 °C	(b) < 9,3 °C	(c) < 9,8 °C	(d) < 11,5 °C
Niederschlagssumme	(1) 487-689 l/m ²	(2) < 782 l/m ²	(3) < 892 l/m ²	(4) < 2477 l/m ²
Sommer				
Temperaturen	(a) 3,6-17 °C	(b) < 17,6 °C	(c) < 18,1 °C	(d) < 20 °C
Niederschlagssumme	(1) 154-206 l/m ²	(2) < 230 l/m ²	(3) < 267 l/m ²	(4) < 845 l/m ²

Abbildung 20 beschreibt die klimatischen Verhältnisse während der Sommermonate. Die Region von Siegburg sticht aufgrund der feuchteren Sommermonate im Bezug zur deutschlandweiten Betrachtung heraus. Ferner liegen die sommerlichen Lufttemperaturen 1,3 °C über dem allgemeinen Niveau.

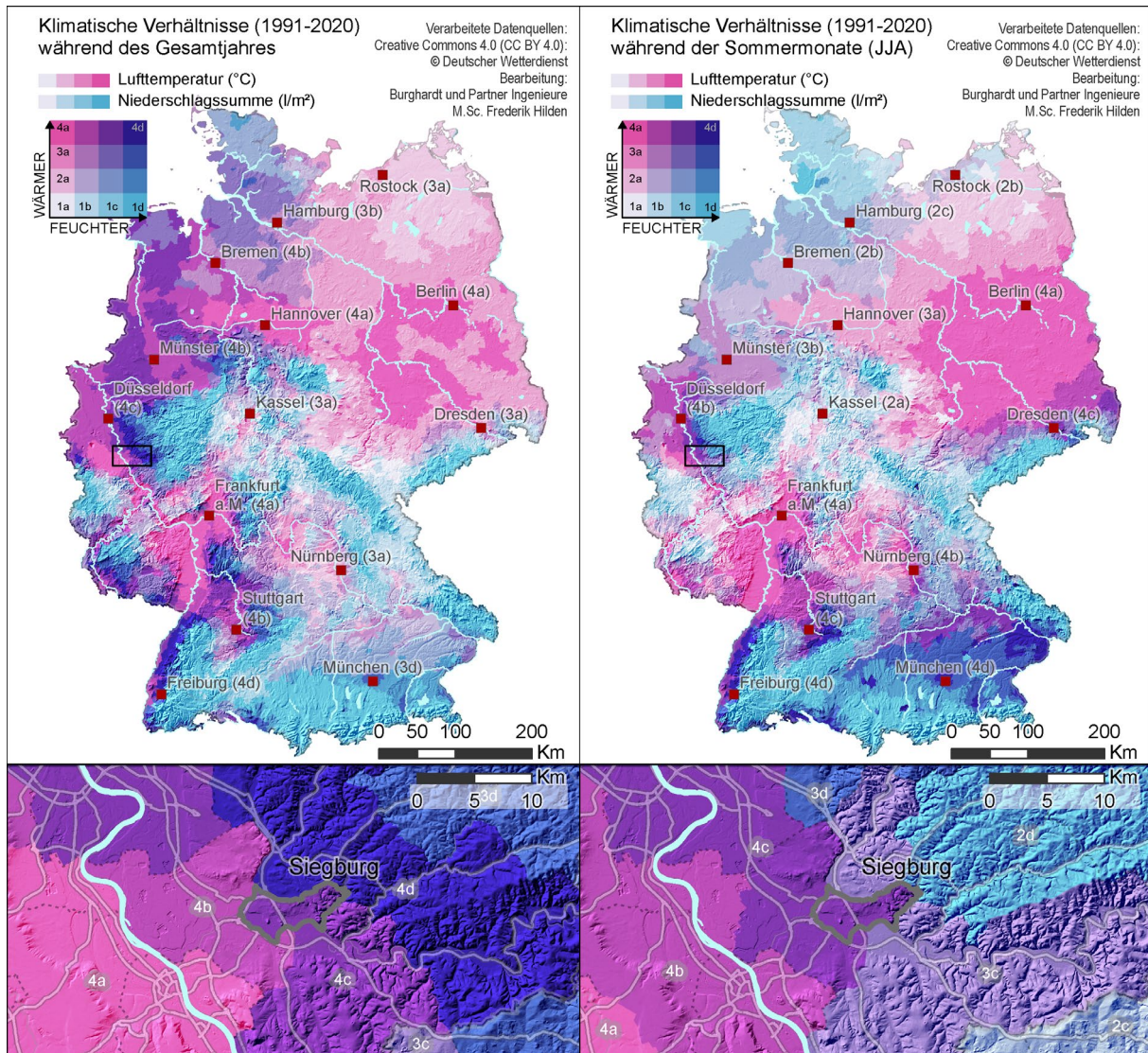


Abbildung 19: Darstellung der regionalen niederschlags- und temperaturbezogenen Unterschiede der deutschlandweiten Kommunen für das ganze Jahr für das langjährige Mittel (1991-2020).

Detailausschnitt der Region des Untersuchungsgebietes von Siegburg. (eigene Darstellung mit Daten von [59])

Abbildung 20: Darstellung der regionalen niederschlags- und temperaturbezogenen Unterschiede der deutschlandweiten Kommunen für die Sommermonate (Juni, Juli, August) für das langjährige Mittel (1991-2020).

Detailausschnitt der Region des Untersuchungsgebietes von Siegburg. (eigene Darstellung mit Daten von [59])

Historische Klimaveränderungen

Anhand der Daten der DWD-Messstation können die historischen Dynamiken seit dem Zeitalter der Industrialisierung nachvollzogen werden. Die jährlich gemittelten Lufttemperaturen in 2 m über Grund seit 1880 weisen auf eine einsetzende, beschleunigte Erwärmung der bodennahen Luftschicht ab den 1990er Jahren hin.

Die Tabelle 7 gibt einen Überblick der klimatischen Veränderungen anhand der ausgewerteten Parameter. Die Verständlichkeit der Werte wird durch die gemittelte Referenzbetrachtung im gesamten Bundesland NRW erleichtert.

Tabelle 7: Übersicht zu den ausgewerteten klimatischen Parametern innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Siegburg für die historischen Zeiträume 1971-2000 und 1991-2020 sowie im Vergleich mit Nordrhein-Westfalen

Siegburg	Historischer Zeitraum			NRW
	1971 bis 2000	1991 bis 2020	Vergleich (Δ) der 30-jährigen Mittel	1991 bis 2020
Lufttemperatur 2 m ü. Grund				
Gesamtjahr	10,0 °C	10,7 °C	+ 0,7 °C	9,2 °C
Sommermonate (JJA)	17,5 °C	18,3 °C	+ 0,8 °C	17,6 °C
Wintermonate (DJF)	3,0 °C	3,4 °C	+ 0,4 °C	1,2 °C
Klimatische Kenntage/Jahr				
Sommertage (LTmax $\geq$ 25 °C)	36	45	+ 8	41
Heiße Tage (LTmax $\geq$ 30 °C)	7	10	+ 2	9
Tropennächte (LTmin $\geq$ 20 °C)	0,3	0,4	+ 0,1	-
Frosttage (LTmin $<$ 0 °C)	60	55	- 5	84
Eistage (LTmax $<$ 0 °C)	8	6	- 2	20
Niederschlagssumme				
Gesamtjahr	808 l/m ²	814 l/m ²	+ 7 l/m ²	791 l/m ²
Sommermonate (JJA)	237 l/m ²	256 l/m ²	+ 19 l/m ²	241 l/m ²
Wintermonate (DJF)	184 l/m ²	192 l/m ²	+ 9 l/m ²	191 l/m ²
Klimatische Wasserbilanz				
Gesamtjahr	213 l/m ²	208 l/m ²	- 6 l/m ²	304 l/m ²
Sommermonate (JJA)	-31 l/m ²	-19 l/m ²	+ 11 l/m ²	-30 l/m ²
Wintermonate (DJF)	139 l/m ²	149 l/m ²	+ 10 l/m ²	185 l/m ²

Anmerkung: Aufgrund von gerundeten Werten kommt es mitunter zu Ungenauigkeiten bei den Änderungssignalen (Δ).

Es fällt auf, dass die Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur im Sommer mit +0,8 °C umfassender verläuft als in den Wintermonaten mit +0,4 °C. Dies äußert sich entsprechend in der historischen Häufigkeit an Hitzeereignissen. Innerhalb des, aus klimatologischer Sicht, kurzen Zeitraums von 20 Jahren hat der Klimawandel bereits zu einem signifikanten Anstieg der

Sommertage mit 25 °C und darüber um +8 Tage pro Jahr geführt. Siegburg ist demnach häufiger von Hitze betroffen als der Großteil der Regionen in NRW.

Die Parameter des Niederschlags weisen derweil nur geringfügige Zuwächse der Regensummen während der Sommer- und Wintermonate auf. Auch im Gesamtjahr gab es einen leichten Anstieg der Niederschlagssummen. Der Blick auf die klimatische Wasserbilanz in Siegburg verdeutlicht den Einfluss von Lufttemperatur und Niederschlag auf die Natur. Trotz der vergleichsweise höheren Niederschläge als im Durchschnitt von NRW äußert sich in der klimatischen Wasserbilanz von Siegburg eine geringere Verfügbarkeit von Wasser pro Quadratmeter. Zurückzuführen ist dies auf milderen Winter in Siegburg mit +2,2 C über dem bundeslandweiten Durchschnitt (siehe Tabelle 7).

Ein umfassenderes Bild der historischen klimatischen Veränderungen der letzten Jahre ergibt sich bei der Betrachtung der einzelnen Monate im Jahresverlauf (siehe Diagramm 1 und Tabelle 8). Hierfür wurden die flächendeckenden Raster zur Lufttemperatur, zum Niederschlag und zur klimatischen Wasserbilanz für die Verwaltungsgrenze von Siegburg ausgewertet.

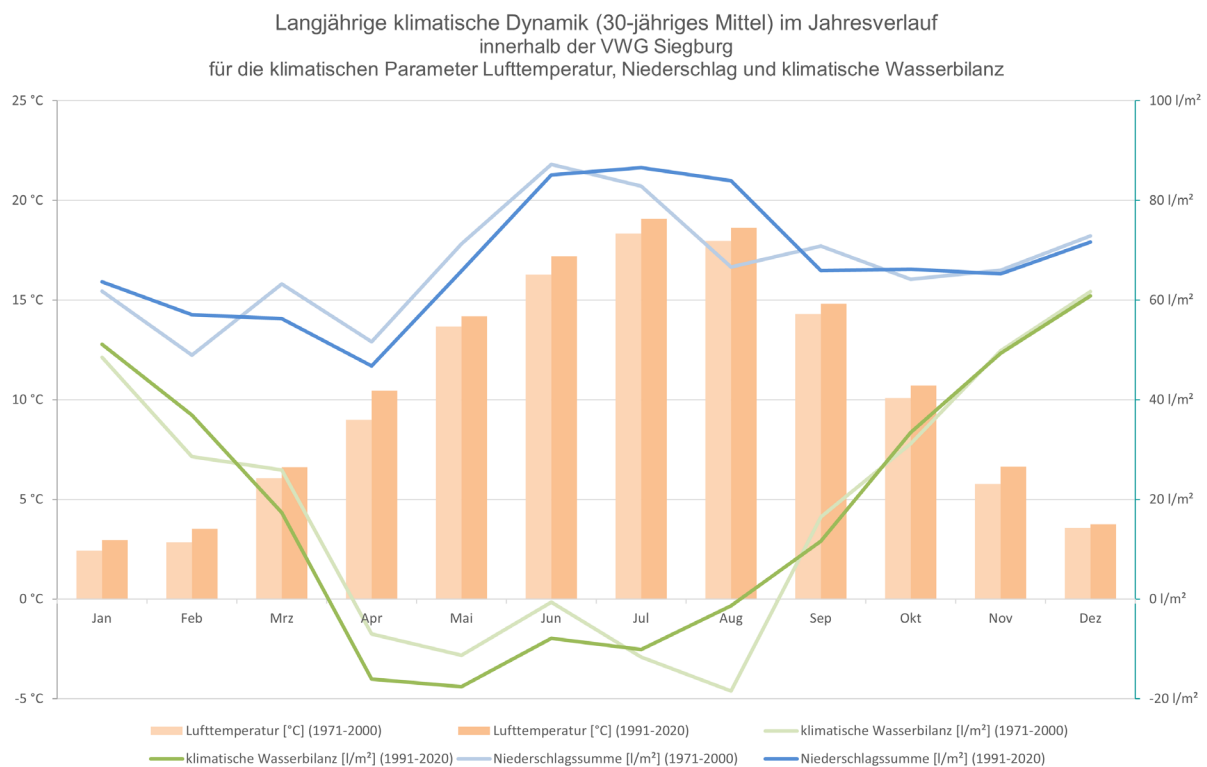


Diagramm 1: Historische Dynamik (1971 – 2000) der klimatischen Parameter Lufttemperatur (orange, in °C), Niederschlag (blau) und klimatische Wasserbilanz (grün, in l/m²) innerhalb der VWG Siegburg, aufgeschlüsselt nach Monaten. Eine größere Abbildung des Diagramms findet sich im Anhang.

In der Gesamtbetrachtung der drei klimatischen Parameter bestätigt sich die Tendenz hin zu wärmeren Jahresmitteln mit einem Erwärmungsschwerpunkt im April und zu trockeneren Frühlingsmonaten.

Der kühlfte Monat im jüngsten Mittel (1991-2020) ist der Januar (2,9 °C), der wärmste Monat ist der Juli (19 °C). Die ersten vier Monate verzeichnen in der Summe die geringsten Niederschläge (z.B. der April mit 47 l/m²), die Sommermonate die höchsten (z.B. der Juli mit 87 l/m²).

Tabelle 8: Auswertung der Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz für das 30-jährige Mittel (1971 – 2000), mit Darstellung des Änderungssignals zum jüngsten 30-jährigen Mittel (1991 – 2020).

		Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Ø
Klimatische Wasserbilanz [l/m²]	1971-2000	48	29	26	-7	-11	-1	-12	-18	17	31	50	62	213
<i>Änderungssignal</i>	<i>1991-2020</i>	3	8	-9	-9	-6	-7	2	17	-5	2	-1	-1	-6
Niederschlags-summe [l/m²]	1971-2000	62	49	63	52	71	87	83	67	71	64	66	73	808
<i>Änderungssignal</i>	<i>1991-2020</i>	2	8	-7	-5	-5	-2	4	17	-5	2	-1	-1	7
Lufttemperatur [°C]	1971-2000	2,4	2,9	6,1	9,0	13,7	16,3	18,3	18,0	14,3	10,1	5,8	3,6	10,0
<i>Änderungssignal</i>	<i>1991-2020</i>	0,5	0,7	0,6	1,5	0,5	0,9	0,7	0,7	0,5	0,6	0,9	0,2	0,7

Die klimatische Wasserbilanz fasst die thermischen und niederschlagsbezogenen Einflüsse zusammen und veranschaulicht, was nach Verdunstung mittelfristig für Natur und Mensch erhalten bleibt. Sowohl für die Landwirtschaft, aber auch für die städtische Vegetation und Grünstrukturen ist dieser Parameter daher relevant. Als Ergebnis der kombinierten Betrachtung erhält man i.d.R. eine entgegengesetzte Kurve zu den anderen zwei Parametern. Zwar regnet es im Sommer mehr, aber durch die höheren Lufttemperaturen kommt es ebenfalls zu einer höheren Verdunstung des gebundenen Wassers in den jeweiligen Landflächen, wodurch im Endeffekt weniger vom Niederschlag langfristig gespeichert wird. Die dargestellte klimatische Wasserbilanz für Siegburg basiert auf den Daten des DWD mit einem eigenen Berechnungsverfahren [27,28].

Nach Auswertung der historischen Daten für Siegburg lassen sich die klimatischen Verhältnisse als humides Klima zusammenfassen, welches sich u.a. durch eine positive klimatische Wasserbilanz kennzeichnet [61].

Die **Klimatische Wasserbilanz** veranschaulicht, welchen Einfluss die Temperaturdynamik auf die Nettoverfügbarkeit auf die Niederschlagssummen hat, indem die Verdunstungsrate (potenzielle Evapotranspiration) von Landflächen mit bilanziert wird. Prinzipiell ist die Verdunstung von Landflächen aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche sowie unterschiedlicher Temperaturen und Bodenwassergehalte kompliziert. Aus diesem Grund existieren verschiedene Verfahren zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz. Die meisten Berechnungen stellen Näherungswerte für die maximale Verdunstung bewachsener Landflächen dar [1].

Mesoklimatische Einflüsse

Die Beschaffenheit des Geländes und der Landnutzung in einer Region beeinflussen die Dynamik des Mesoklimas wesentlich. Raumbedeutsame Veränderungen der Landnutzung und der Oberflächenrauigkeit, wie im Kontext von großen Siedlungsgebieten führen zu einer Veränderung der bodennahen Lufttemperatur und zu einer Ausbremsung der bodennahen Anströmung.

In Abbildung 21 wird die langjährige Lufttemperatur der bodennahen Luftschichten in 2 m über Grund dargestellt. Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der

Sommermonate Juni, Juli und August für die Region Siegburg. Eine Darstellung im größeren Maßstab ist aufgrund der Auflösung von 1 km x 1 km nicht sinnvoll. Zwecks Orientierung wurde die Bebauung (schraffiert) und übergeordnete Verkehrswege in der Darstellung mitberücksichtigt.

Im Untersuchungsraum Siegburg wird der wesentliche Einfluss der Topografie auf die allgemeinen Lufttemperaturen sichtbar. Die Öffnung des tieferliegenden Rheintals in nördlicher Richtung geht einher mit höheren Lufttemperaturen. Im Vergleich weisen die höheren Lagen des Sieger- und Sauerlandes bis zu 3 °C geringere Temperaturen auf. Siegburg befindet sich in einer Übergangslage mit kühleren Lufttemperaturen in den höheren Lagen im Nordosten, was sich auf das allgemeine Temperaturniveau auswirkt (siehe Abbildung 21).

Im Durchschnitt des gesamten Verwaltungsgebietes Siegburgs wurden 18,3 °C im jüngsten langjährigen Mittel gemessen. Der überbaute Siedlungsraum befindet sich ausschließlich in den niederen Tallagen, mit Lufttemperaturen bis 18,5° C.

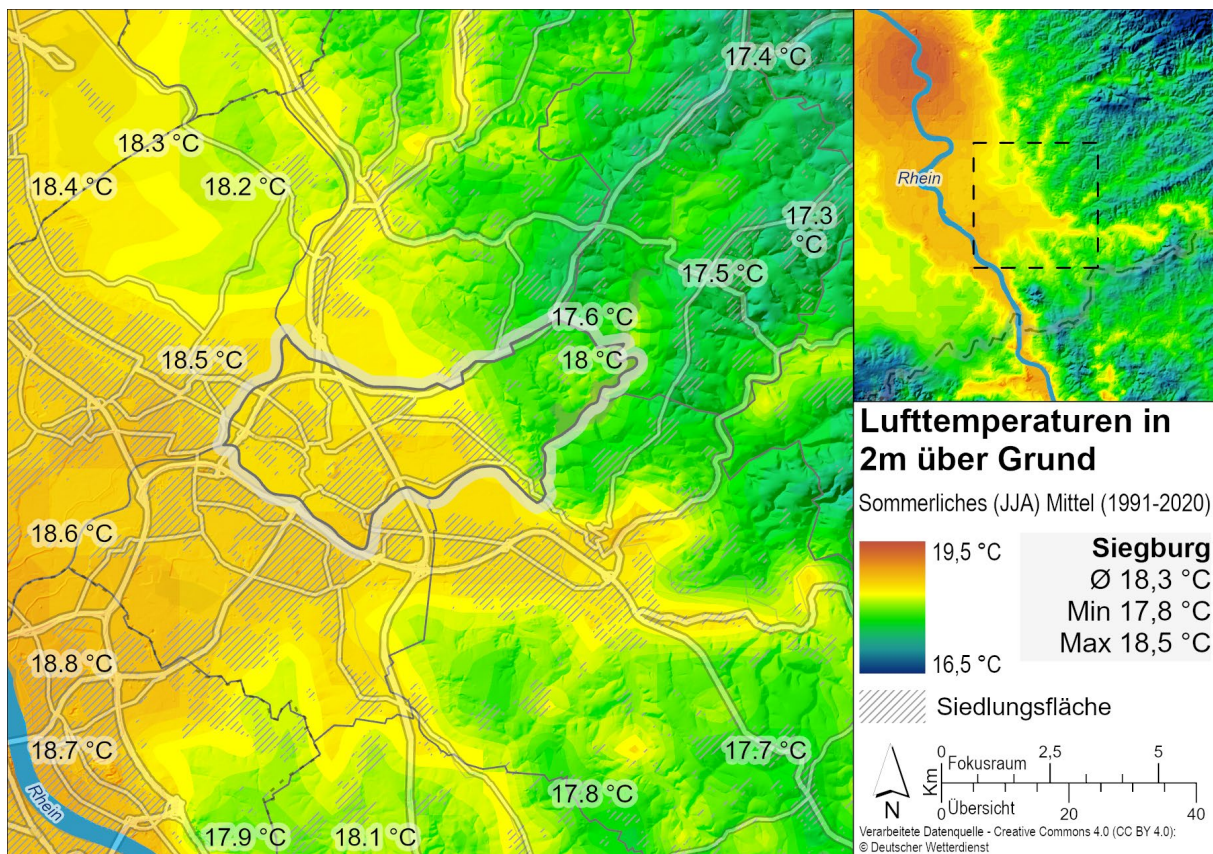


Abbildung 21: Darstellung der Lufttemperatur (2 m über Grund) in einer Auflösung von 1 km. Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der Sommermonate Juni, Juli und August.

5.1.2 Klimatische Kenntage

Da die Betrachtung der durchschnittlichen Monatstemperaturen nur wenig Aussagekraft zu den täglichen Spitzenbelastungen besitzt, werden mit den klimatischen Kenntagen zusätzliche Aussagen zu lokaltypischen Klimacharakteristika getroffen. Mit sog. Klimatischen Kenntagen (siehe Tabelle 9) lassen sich Klimaklassifikationen zuordnen, als auch Trends von klimatischen Veränderungen identifizieren und die damit einhergehende thermische Belastung

veranschaulichen. Die Erhebung orientiert sich an definierten Schwellenwerten, die bei Erreichen bzw. Überschreitung pro Tag erhoben werden [62].

Die erkennbare Entwicklung in Deutschland zeigt, dass sich die Temperaturmaxima bereits in Richtung extremer werdenden thermischen Belastungen verschiebt, während die Temperaturminima einen Trend zu milderer Belastungen aufweisen [63]. Die systematische Erhebung der klimatischen Kenntage gewinnt aus diesem Grund auch in kleineren Städten an Bedeutung.

Hohe Temperaturen, wie in den SOMMERTAGEN, HEIßE TAGEN und TROPENNÄCHTE dargestellt, haben zur Folge, dass sich das allgemeine Stresslevel für Menschen, Tiere und Pflanzen auf lange Sicht erhöht [64–66]. Bei gefährdeten Bevölkerungsgruppen kann es zu schweren gesundheitlichen Konsequenzen führen. Fällt die Temperatur nachts nicht unter 20 °C, ist der menschliche Körper nur noch bedingt in der Lage, sich von täglichen Belastungen zu regenerieren [66,67]. Treten die Ereignistage im Kontext mit sog. austauscharmen Wetterlagen auf, verstärkt sich die Belastung insbesondere in städtischen Gebieten weiter. Aufgrund der Wärmespeicherung versiegelter Flächen reduziert sich die Temperatur in den strahlungsfreien Stunden während der Nacht nur gering. Außerdem wird die Luftzirkulation aufgrund von Gebäuden und Infrastrukturen eingeschränkt. In Verbindung mit austauscharmen Wettersituationen, bei denen die Luftmassen nur begrenzt zirkulieren, können städtische Wärmeinseln (vgl. Kapitel 2.2) verstärkt werden. Dies führt zu höheren Temperaturen in den Städten und verschärft die Auswirkungen von Hitzewellen und Luftqualitätsproblemen [68]. Es ist davon auszugehen, dass austauscharme Wetterlagen zunehmen werden und im Zuge des Klimawandels länger anhalten [69]. Welche gesundheitlichen Konsequenzen hohe thermische Belastungen auf die Bevölkerung haben, zeigt sich bereits in den Großstädten. In Berlin etwa konnten bereits für den Zeitraum 2001-2010 bis zu 5 % aller Todesfälle mit Hitzeereignissen in Verbindung gebracht werden [70]. In den vergangenen 20 Jahren ist die Zahl der hitzebedingten Todesfälle in Europa um 30 % gestiegen mit bis zu 72.000 Fällen allein nach der Hitzewelle 2022 [71].

SOMMERTAGE, HEIßE TAGE und TROPENNÄCHTE treten v.a. in den Monaten Juni, Juli und August auf und geben besonders hohe thermische Belastungen an. Ein Tag wird gewertet, sobald die maximale Lufttemperatur in 2 m über Grund im Tagesverlauf die Marke von 25 °C bzw. 30 °C erreicht oder überschreitet oder die Temperatur in den nächtlichen Stunden mit geringem bis keinem solaren Strahlungsantrieb zwischen 18 und 6 Uhr nicht unter 20 °C fällt [72].

Tabelle 9: Typische temperaturbezogene Kenntage mit ihren zugehörigen Definitionen, die im Rahmen der Stadtklimaanalyse Siegburg ausgewertet wurden

Kenntag	Definition
Sommertag	$LT_{\text{MAX}} \geq 25 \text{ °C}$
Heißer Tag	$LT_{\text{MAX}} \geq 30 \text{ °C}$
Tropennächte	$LT_{\text{MIN}} \geq 20 \text{ °C}$
Frosttag	$LT_{\text{MIN}} < 0 \text{ °C}$
Eistag	$LT_{\text{MAX}} < 0 \text{ °C}$

Die Anzahl der sommerbezogenen klimatischen Kenntage hat sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich erhöht. Auch für Siegburg zeigt sich im Vergleich der zwei langjährigen Mittel 2000 und 2020 einen Anstieg der SOMMERTAGE und HEIßE TAGE (siehe Diagramm 2). Derweil

sind TROPENNÄCHTE bisher ein Phänomen, dass lediglich etwa jedes dritte Jahr (0,4 TROPENNÄCHTE / Jahr) auftritt.

Als ein Ergebnis der Auswertung bestätigt die steigende Anzahl an klimatischen Kenntagen in Siegburg die grundsätzliche Beobachtung, dass die Sommer tendenziell mit extremer werdenden Belastungen einhergehen [16]. Die geringe Ausprägung von Tropennächten steht diesem Trend bisher entgegen und zeigt, dass die nächtliche Abkühlung auch während der Sommermonate erhalten bleibt.

Die Betrachtung der FROSTTAGE und EISTAGE verdeutlicht die starke Veränderungsdynamiken während der Wintermonate (siehe Diagramm 2) [26,27], die kältebedingte Belastung auf den menschlichen Körper geht für Siegburg deutlich zurück.

Während die wachsende Anzahl von hitzebezogenen Ereignistagen eine direkte Mehrbelastung auf die Bevölkerung bedeutet, ist das Ausbleiben von kältebezogenen Ereignistagen für die Bevölkerung eher indirekt spürbar (Vegetationszyklen, Schädlingswellen etc.) [28].

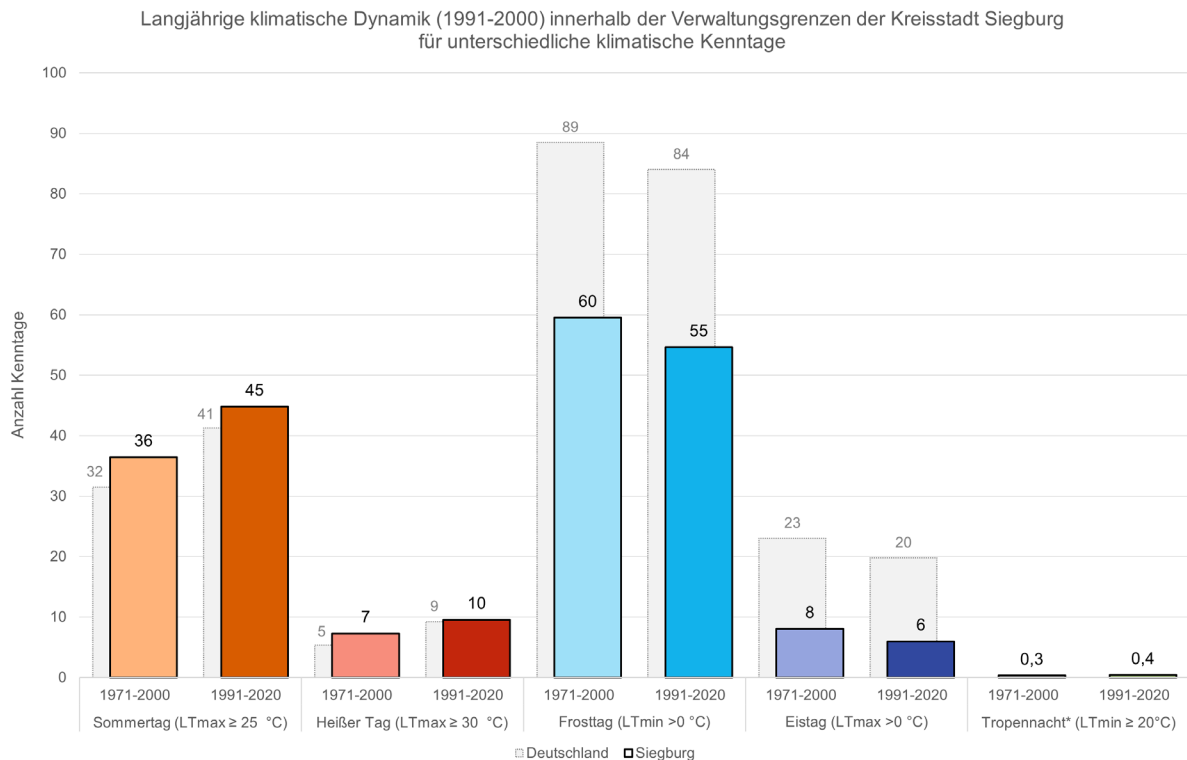


Diagramm 2: Darstellung der klimatischen Kenntage des jüngsten 30-jährigen Mittels für die Kreisstadt Siegburg (bunte Säulen) und im deutschlandweiten Vergleich (graue Säulen). Bei den hitzebezogenen Kenntagen (Sommertage und Heiße Tage) liegt Siegburg nur leicht über dem deutschen Durchschnitt. Bei den frostbezogenen Kenntagen (Frosttage und Eistage) liegt Siegburg hingegen deutlich unter dem deutschen Durchschnitt. Auf Grund der von den übrigen Kenntagen abweichenden Erfassungsmethode für Tropennächte liegen hier keine Durchschnittswerte für Deutschland vor. Eine größere Abbildung des Diagramms findet sich im Anhang.

Typischer Heißer Tag

Der TYPISCHE HEIßE TAG beschreibt die Tagesmaximal und -minimaltemperaturen während eines HEIßEN TAGES. In der Auswertung werden alle Tage mit einer Lufttemperatur von 30 °C und darüber ausgewertet und auf die Zeiträume von 30 Jahren gemittelt. Als Ergebnis ist abzulesen, welche Intensität die HEIßE TAGE haben, und in welchem Umfang die nächtliche

Abkühlung wirkt (siehe Tabelle 10). Hierdurch können in einem späteren Zeitpunkt die bodennahen Lufttemperaturen an einem TYPISCHE HEIßE TAG modelliert werden.

Anhand der Zeitschritte in Abständen von 10 Jahren der langjährigen Mittel von 1993 bis 2023 lässt sich für Siegburg ein Anstieg der maximalen Lufttemperaturen von 31,4 °C auf 32,19 °C um knapp +0,8 °C feststellen. Die nächtliche Abkühlung zeigt ebenfalls, in Form der Tagesmindesttemperaturen, dass es hier zu einem Anstieg um +0,2 °C kommt, dieser ist jedoch nicht so umfassend, wie am Tag.

Tabelle 10: Historische Entwicklung der typischen Heißen Tage für Siegburg

30-jähriges Mittel	LTmax	LTmin	30-jähriges Mittel	LTmax	LTmin
1964-1993	31,40 °C	15,83 °C	1984-2013	31,76 °C	15,98 °C
1974-2003	31,55 °C	15,88 °C	1994-2023	32,19 °C	16,03 °C

5.1.3 Windverhältnisse

Als Wind wird Luft bezeichnet, welche durch Luftdruckunterschiede in Bewegung gesetzt wird. Die Anströmungsrichtung bzw. Windrichtung benennen die Himmelsrichtung, aus der der Wind weht. Insbesondere die Beschaffenheit der Oberfläche und das Relief wirken sich auf bodennahe Windverhältnisse aus. So beeinflusst ebenfalls eine erhöhte Oberflächenrauigkeit in bebauten Umgebungen im Kontext von Großstädten die Windgeschwindigkeiten nachhaltig bis in Höhen von bis zu 500 m [29]. Für die Stadt- und Regionalplanung sind Kenntnisse über Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen relevant, um für eine vorteilhafte Belüftung dicht besiedelter Gebiete zu sorgen. So kann thermischen Belastungen und Luftverschmutzung entgegengewirkt und dadurch auch die Lebensqualität und Gesundheit der Bewohnerinnen und Bewohner positiv beeinflusst werden [73,30].

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit den Windverhältnissen und insbesondere den Windrichtungen und -geschwindigkeiten in Siegburg und Region sowie ihren Implikationen für die Stadt- und Regionalplanung. Dazu wird zunächst eine allgemeine Übersicht über die Windverhältnisse und anschließend ein detaillierterer Überblick über lokale Besonderheiten in Bezug auf Windgeschwindigkeit und Windrichtung gegeben.

In **Windrosen** werden Windstärke und -richtung oft auf Grundlage einer kreisförmigen 360-Grad-Skala grafisch dargestellt. Dabei orientiert sich die Skala am geographischen Norden, welcher sich bei 0 ° befindet. Osten ist bei 90 °, Süden bei 180 ° und Westen bei 270 °. Während die Ausrichtung der Fläche Auskunft über die relative Verteilung der Anströmungsrichtungen gibt, zeigt die Farbgebung die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten an.

Abbildung 22 stellt die lokalen Windverhältnisse im durchschnittlichen Jahresmittel für den Zeitraum 1980 bis 2000 dar in einer Auflösung von 200 m mit Fokus auf die Gemarkung von Siegburg sowie einer regionalen Übersicht der Windgeschwindigkeiten. Die Farbskala signalisiert die Windgeschwindigkeit mit einem blauvioletten Ton für Windgeschwindigkeiten von 1 m/s und geringer, einem grüngelben Farbton für Geschwindigkeiten um die 3 m/s, bis hin zu einem Rotton, welcher für Windgeschwindigkeiten von 5 m/s und darübersteht.

Die Stadt Siegburg umfasst mit ihrer Ost-West-Ausdehnung durchschnittliche Windgeschwindigkeiten von 2,2 m/s im niedrigeren Westen bis zu 3,7 m/s im höher gelegenen Osten. Der

Großteil der Siedlungsflächen befinden sich im windärmeren Bereich von Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s. Der Durchschnitt für die Gemarkung Siegburg wird mit 2,9 m/s angegeben.

Die Übersichtskarte verweist auf heterogene Windverhältnisse in der näheren Umgebung Siegburgs. Die stündlich aufgelösten Messdaten des DWD liegen für die Stationen „Flughafen Köln/Bonn“ und „Königswinter-Heiderhof“ vor, welche jeweils etwa 8 km von Siegburgs Innenstadt (Rathaus) entfernt sind. Aufgrund der Heterogenität der Windgeschwindigkeiten wurden für die weitere Auswertung der Windverhältnisse beide Stationen ausgewertet, um die lokalen Bedingungen in Siegburg zu ermitteln.

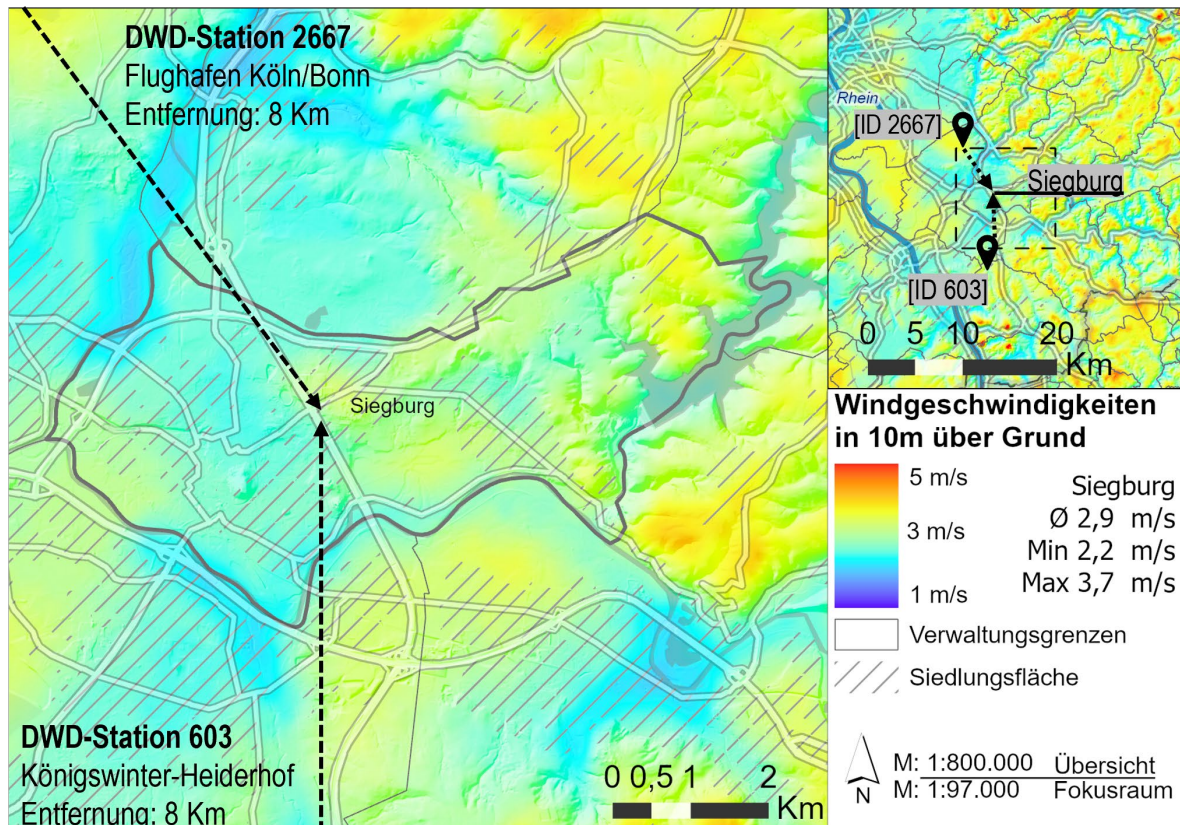


Abbildung 22: Darstellung der lokalen (Fokusraum) und regionalen (Übersicht) Windverhältnisse des Untersuchungsgebietes Siegburg für das langjährige Mittel 1980-2000. In der Farbskala geben blau-violette Töne Windgeschwindigkeiten ab 1 m/s an, gelbrote Töne zeigen Windgeschwindigkeiten bis 5 m/s; die Siedlungsflächen der umliegenden Gemeinden werden schraffiert dargestellt (eigene Darstellung mit Daten von [29]).

Eine weitere Ausdifferenzierung der lokalen Windverhältnisse bieten die stündlich aufgelösten Messdaten der Windrichtung und -geschwindigkeit. Wie in Diagramm 3 erkennbar, werden die Windgeschwindigkeiten u.a. maßgeblich von thermischen Einflüssen gesteuert. Windgeschwindigkeiten variieren zwischen der Tagsituation mit einem thermischen Strahlungsantrieb und die Nachtsituation ohne solaren Input. In den Nachtstunden zwischen 22-4 Uhr dominieren Schwachwindsituationen von 0-2 m/s und ermöglichen bspw. den Abfluss von Kaltluft. Ferner führen die allgemeinen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen dazu, dass im Winter und Frühling die Windstärken höher liegen als im Sommer und Herbst.

Die Auswertung der regional verfügbaren Datenquellen vom Flughafen Köln/Bonn und Königswinter-Heiderhof ergab sehr heterogene Windverhältnisse in der langjährigen Betrachtung. Im

Vergleich mit weiteren Quellen, wie den Wettermodelldaten des Meteorologiebüros „meteo-blue“ zeigen sich vergleichbare regionale Unterschiede [74].

Von Planungsrelevanz sind insbesondere die Sommermonate. Das Abkühlungspotenzial wirkt in Form von zwei Phänomenen. Zunächst bewirkt die Anströmung kälterer Luftmassen, dass wärmere Regionen ventiliert werden. Ferner hilft Wind dem menschlichen Körper unmittelbar bei der Kühlung zu unterstützen, indem er Wärme abträgt [75]. Das thermische Empfinden wird durch die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) berechnet und dargestellt [76]. Bereits die Zunahme der Windgeschwindigkeit um 0,5 m/s kann durch die gefühlte Temperatur um fast 6 °PET gesenkt werden [75].

In einer bebauten Umwelt, wie Städten, treten allgemein geringere Windgeschwindigkeiten auf als im Umland [73]. Gleichzeitig sind im Sommer die windschwachen Situationen geringer als in den übrigen Jahreszeiten, wie auch die Windgeschwindigkeiten in der Region Siegburg zeigen (siehe Abbildung 22). Gepaart mit den höheren Lufttemperaturen und direkter solarer Strahlung führen geringe Windgeschwindigkeiten zu einer gefühlten Temperatur über der real gemessenen Lufttemperatur in °C. Dies bewirkt schlussendlich eine stärkere physiologische Belastung auf den Körper, welche bei vulnerablen Bevölkerungsgruppen zu schwerwiegenden gesundheitlichen Konsequenzen mit sich bringt [32].

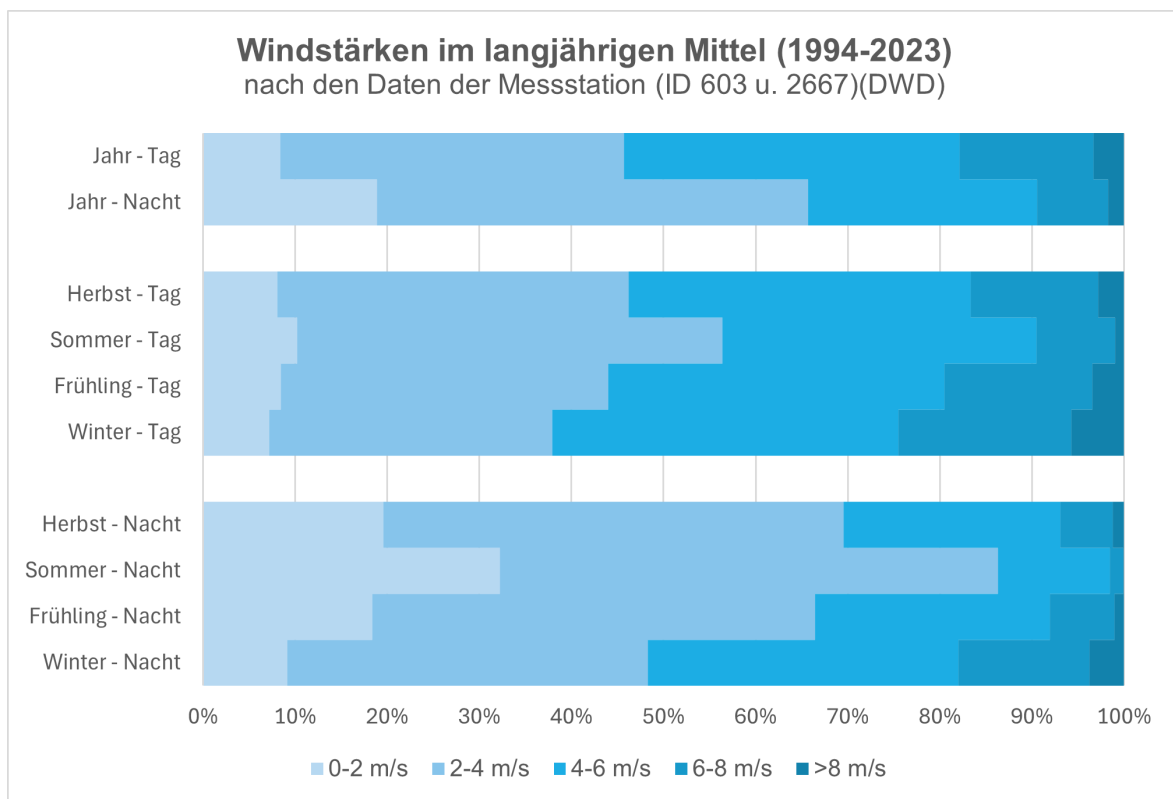


Diagramm 3: Darstellung der Windstärken in Abhängigkeit zu den Jahreszeiten und Tages- und Nachtzeiten an den DWD-Stationen (ID 603 und 2667) in Siegburg.

Die Windrosen in Diagramm 4 stellen die allgemeinen Windverhältnisse der beiden DWD-Messstationen dar. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Windrichtungen trotz der räumlichen Nähe deutlich. Während die Messstation am Flughafen Köln/Bonn eine eindeutige Hauptkomponente aus Südwest (120°/150°) aufweist, aus der der Wind in 32 % der Fälle weht, verteilen sich die Anströmungsrichtungen an der Station in Königswinter-Heiderhof auf die Ost-Süd-West-Windrichtungen von 120° bis 300°.

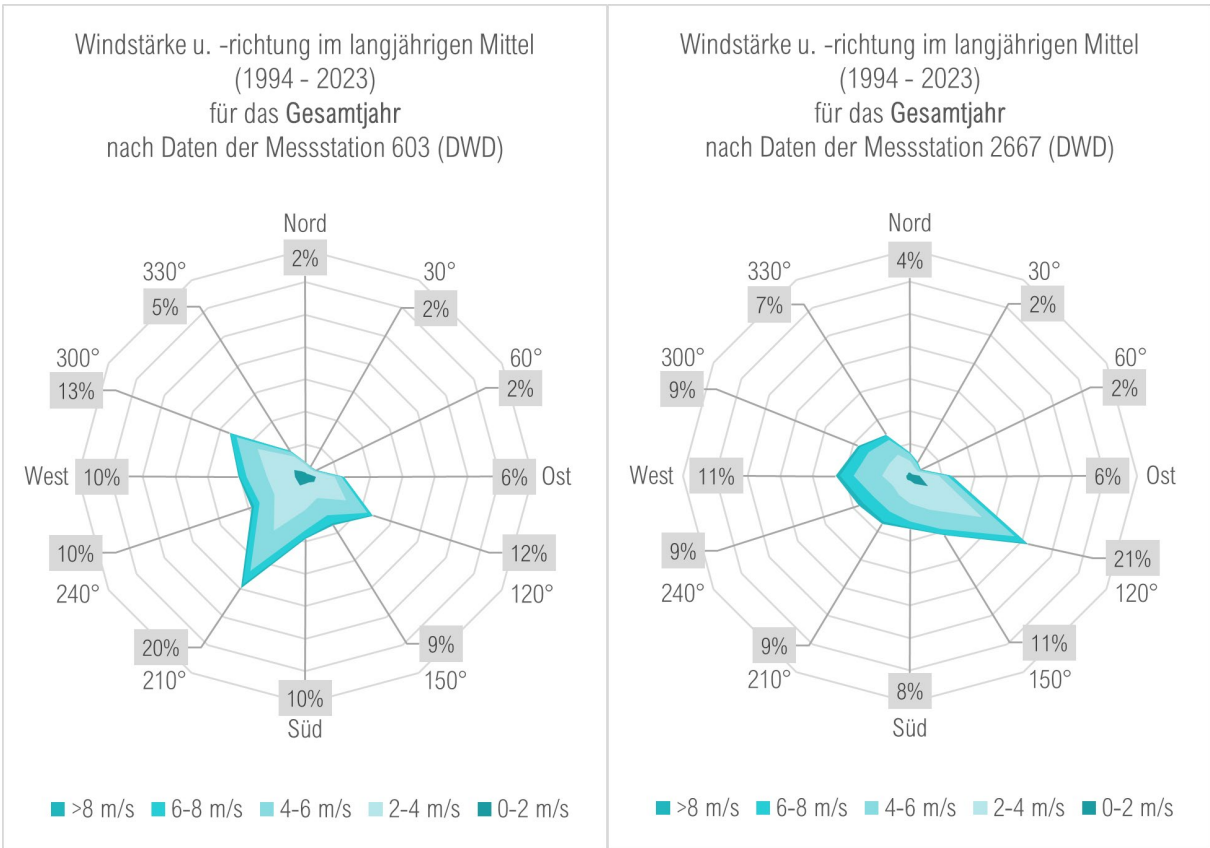


Diagramm 4: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an den DWD-Messstationen „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667, rechts) und „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603, links) im Jahresdurchschnitt (eigene Darstellung nach Daten von [29]).

Da die Windverhältnisse in den jeweiligen Jahreszeiten und in den Tageszeiten (siehe Diagramm 5 bis Diagramm 8) Unterschiede aufweisen, werden die Windrosen für die Teilbereiche dargestellt und in Tabelle 11 in Hauptkomponenten aufgeschlüsselt.

Tabelle 11: Dynamik der Windhauptkomponenten im Jahresverlauf für die Tagessituationen (oben) und die Nachtsituation (unten) an den ausgewerteten DWD-Stationen „Königswinter-Heiderhof“ und „Flughafen Köln/Bonn“

Tagesbetrachtung	Königswinter-Heiderhof (ID 603)	Flughafen Köln/Bonn (ID 2667)
Winter (DJF)	Südsüdwest (210°) bis Ostsüdost (120°)	Ostsüdost (120°)
Frühling (MAM)	Westnordwest (300°)	Homogene Verteilung ohne dominante Windkomponente
Sommer (JJA)	Westnordwest (300°)	Homogene Verteilung ohne dominante Windkomponente
Herbst (SON)	Südsüdwest (210°) bis Ostsüdost (120°)	Ostsüdost (120°)
Nachtbetrachtung	Königswinter-Heiderhof (ID 603)	Flughafen Köln/Bonn (ID 2667)
Winter (DJF)	Südsüdwest (210°)	Ostsüdost (120°)
Frühling (MAM)	Südsüdwest (210°)	Ostsüdost (120°)
Sommer (JJA)	Südsüdwest (210°)	Ostsüdost (120°)
Herbst (SON)	Südsüdwest (210°)	Ostsüdost (120°)

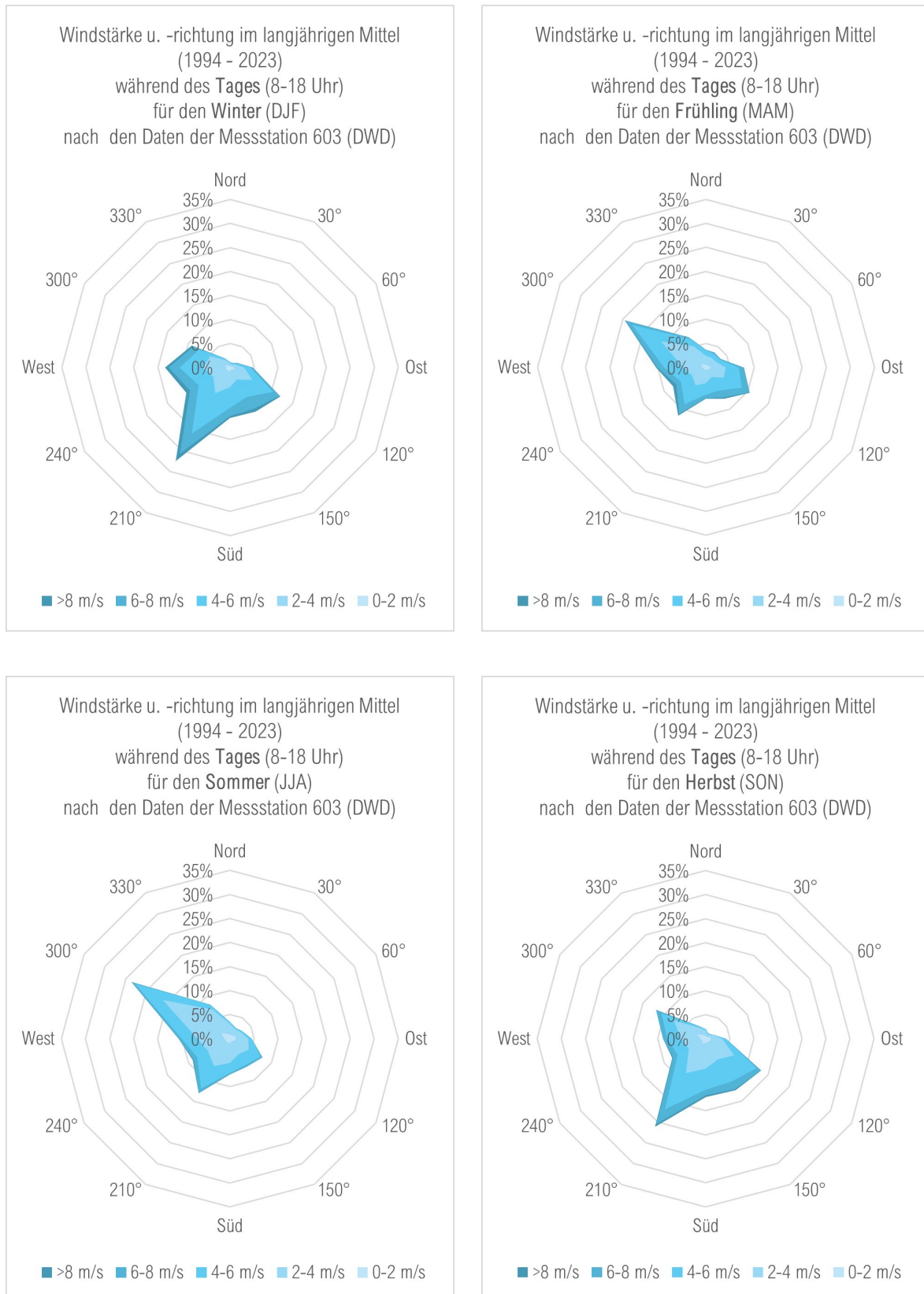


Diagramm 5: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Tagessituation (8-18 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [29])

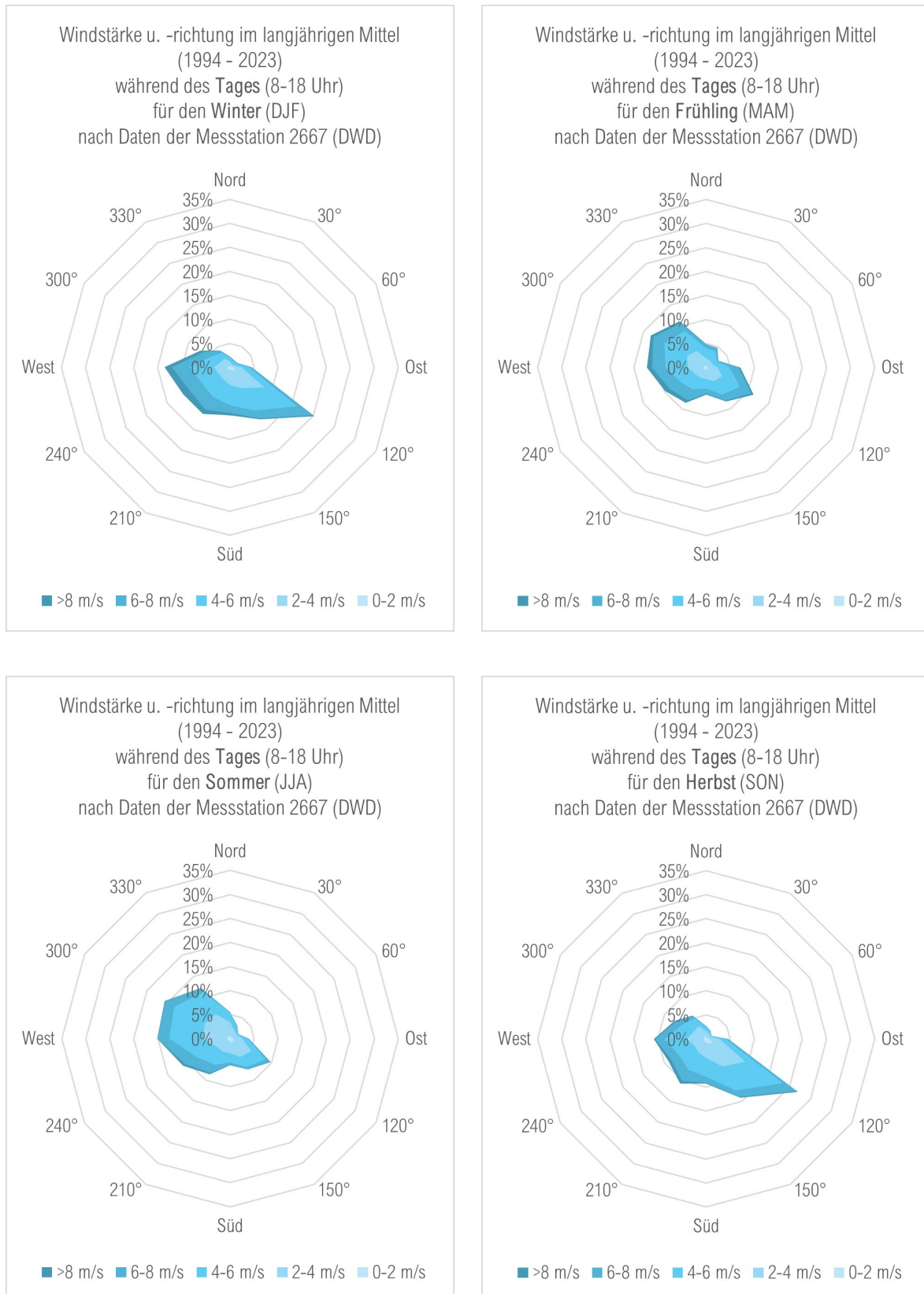


Diagramm 6: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Tagessituation (8-18 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [29])

Anders als die Tagessituation zeichnet sich die Nachtsituation i.d.R. durch geringere Windgeschwindigkeiten und -richtungen aus, da die thermischen Einflüsse weniger stark wirken und im Wesentlichen durch die Abstrahlung der erwärmten Oberfläche verursacht werden. Dies führt zu bodennahen Windverhältnissen, die mitunter stark von der Tagessituation divergieren.

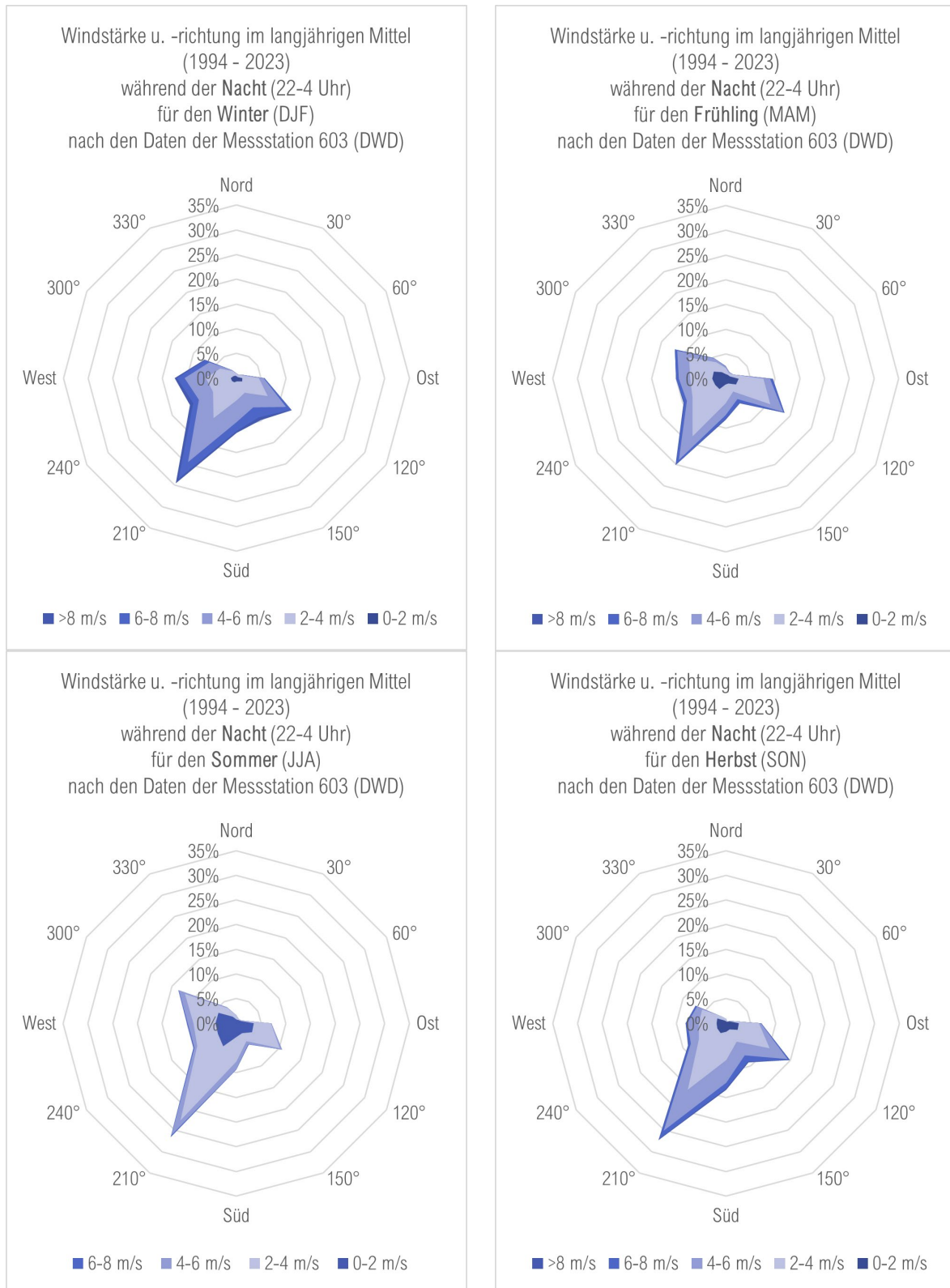


Diagramm 7: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Nachtsituation (22-04 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [29])

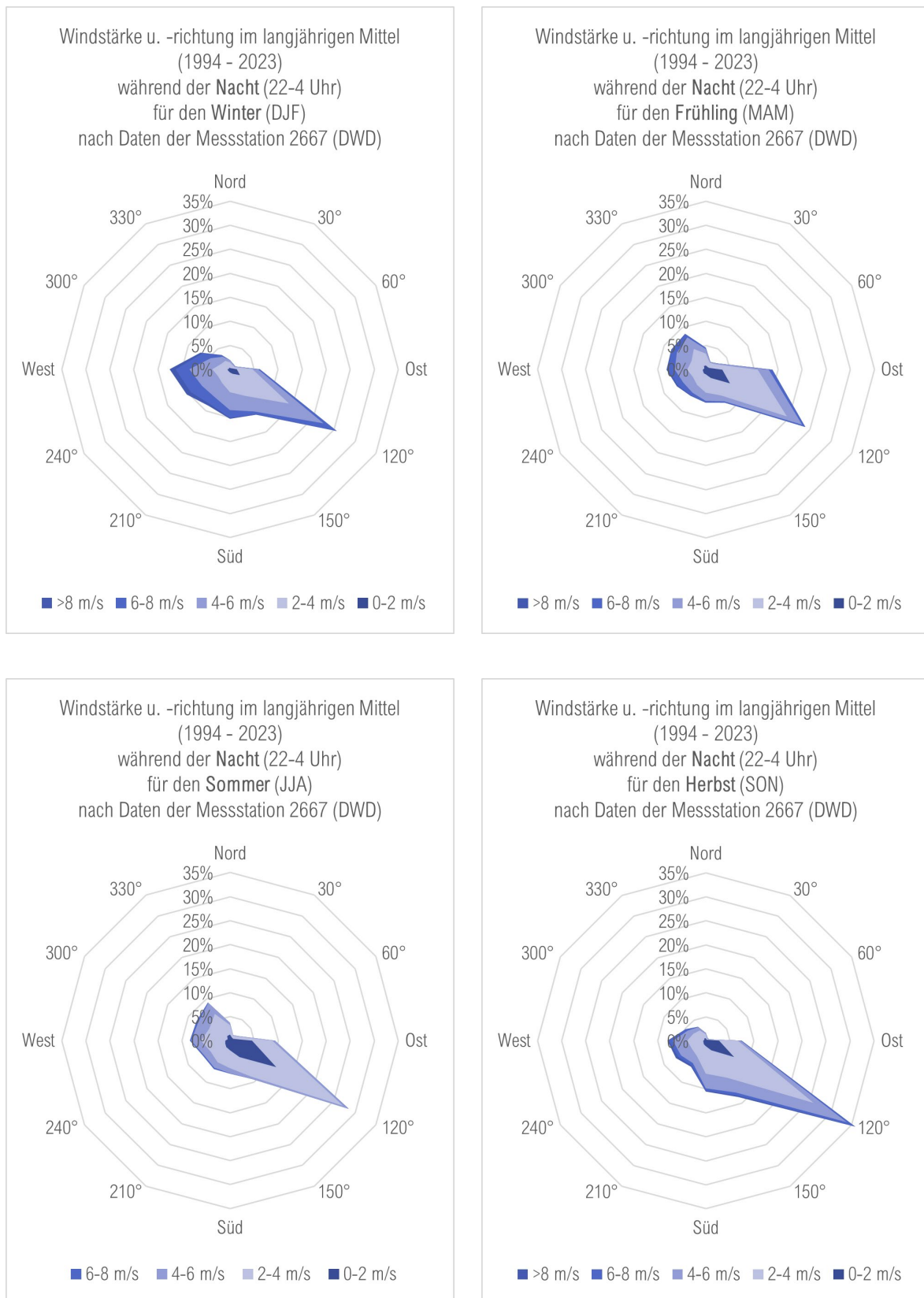


Diagramm 8: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Nachtsituation (22-04 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [29])

Hinweis

Der Übersichtlichkeit halber werden innerhalb der nachfolgenden Kapitel nur Kartenauszüge aller Karten- und Planwerke dargestellt, die Beschreibung und Bewertung erfolgt aber für den gesamten Raum.

Zusätzlich liegen die beschriebenen Karten- und Planwerke als separate Dokumente im A3-Format flächendeckend für den administrativen Raum der Kreisstadt SIEGBURG vor.

Die Hauptansicht umfasst eine Übersicht des Siedlungsraums von Siegburg, zusätzlich zeigt der Detailausschnitt die INNENSTADT sowie Anschnitte der angrenzenden Stadtteile.

Im PDF können diese über die unterschiedlichen Dokumentebenen individuell zu- und weggeschaltet werden.

Neben der kartographischen Darstellung enthält jede Karte bzw. jedes Planwerk eine technische Beschreibung des Inhalts sowie die üblichen Angaben zur Datenherkunft.

5.2 Topographische Analysen

5.2.1 BlueSpot-Analysen

Bei topographischen Einzugsgebieten handelt es sich um räumliche Einheiten, die sich an der Form der Erdoberfläche orientieren. Ein Einzugsgebiet wird über einen gemeinsamen Oberflächenabfluss (inkl. Grundwasser) definiert. Je nach Fokus können Einzugsgebiete unterschiedlicher Ordnungen berechnet werden.

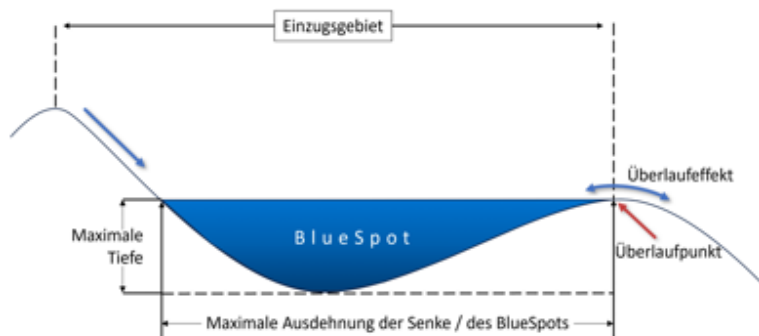


Abbildung 23: Schematische Darstellung eines BlueSpots und der definierenden Parameter.

BlueSpots sind Bereiche, die i.d.R. eine topographische Senke / Mulde darstellen und die bei stärkerem Wassereintrag durch abfließendes Oberflächenwasser gefüllt werden. Übersteigen die eingebrachten Wassermassen das Fassungsvermögen des BlueSpots erfolgt ein Überlauf (Spillover) zu Lasten des in der Topographie hierarchisch nachfolgenden (und somit tiefer liegenden) Bereichs (siehe Abbildung 23). Für den Untersuchungsraum wurden diese potentiellen Überschwemmungsbereiche auf Informationsgrundlage der vorherrschenden topographischen Bedingungen, mittels des Digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von einem Meter (DGM1), ermittelt. Unterirdische Kanalnetze und die natürliche Wasseraufnahmefähigkeit von Vegetationsflächen (Infiltration) wurden nicht berücksichtigt. Damit handelt es sich um eine „Worst-Case“ Analyse, die für eine Starkregensituation angenommen werden kann, da hierbei i.d.R. das Kanalnetz nach kurzer Zeit kaum noch Wasser aufnehmen kann bzw. durch z. B. Treibgut o. ä. verstopft wird.

Ist die Kapazität einer Senke erreicht, wird das überschüssige Wasser entsprechend der Fließpfade (Abflusspfade) weitergegeben. Für jede Senke / Mulde wird das dazugehörige Oberflächen-Einzugsgebiet (kleinräumiger Fokus) berechnet. Der großräumige Fokus beschreibt das übergeordnete Oberflächen-Einzugsgebiet, welches sich über den administrativen Bereich der Stadt oder Gemeinde hinaus erstreckt.

Das BlueSpot Mapping beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung planungsrelevanter Informationen im Kontext der Starkregenvorsorge, mit dessen Hilfe vorausschauend das Thema Starkregen in der frühen Phase der Stadtentwicklung berücksichtigt werden kann. Dabei geht es nicht ausschließlich um die Identifikation von potentiellen Risikobereichen die im Zuge der Stadtentwicklung besonderer Aufmerksamkeit bedürfen, sondern auch um den Aspekt der Prävention, bspw. als Unterstützung bei der Planung von Retentionsräumen oder Regenrückhaltebecken.

Nachfolgend werden zwei unterschiedliche Themenkarten für die berechneten BlueSpots beschrieben. Zum einen die vorkommenden Tiefenausprägungen und zum anderen das Überlaufverhalten der BlueSpots.

Tiefenausprägungen der BlueSpots

Insbesondere die Darstellung der Tiefenausprägung verdeutlicht die oft vorhandene topographische Heterogenität der BlueSpot Flächen auf dem Stadtgebiet von Siegburg (siehe Abbildung 24). So können bspw. Tiefgarageneinfahrten oder Muldenausprägungen im Kontext einer Brückensituation etc. erfasst werden.

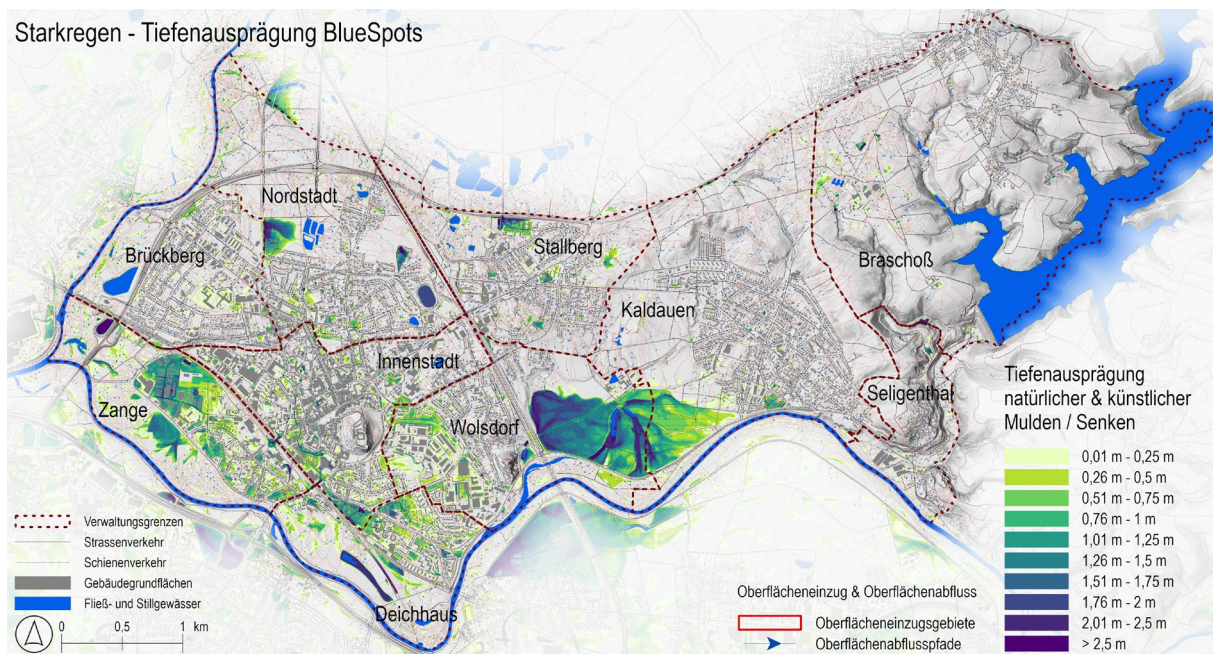


Abbildung 24: Themenkarte Starkregen – BlueSpot-Analyse: Tiefenausprägungen natürlicher und künstlicher Mulden und Senken. Flächige Darstellung für den administrativen Raum von Siegburg, die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgte über den administrativen Raum von Siegburg hinaus. Die farbliche Codierung gibt unterschiedliche Tiefenausprägungen der BlueSpots wieder, von 0,01 m (hellgrün) bis >2,5 m (dunkelviolett). Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Tiefenausprägungen von 0,01 m bis 0,5 m kommen im Siegburger Siedlungsgebiet häufig bei kleineren Flächen im bebauten Raum vor. So weisen bspw. die Flächen im Industrie- und Gewerbegebiet entlang der HAUPTSTRAßE in SELIGENTHAL und die behördlich genutzten Gebäude entlang der Straße SIEGELSKNIPPEN in BRASCHOB diese Eigenschaften auf. Tiefer ist u.a. ein größerer Bereich südlich ZUR ALTEN FÄHRE in KALDAUEN. In unmittelbarer Nähe befindet sich eine der größten und tiefsten Mulden im unbebauten Raum zwischen KALDAUEN und WOLSDORF (bis > 2,5 m Tiefe). In diese Mulde fließt das meiste Niederschlagswasser aus dem Westen von KALDAUEN, dem Osten von WOLSDORF und dem Süden von STALLBERG ab.

ZANGE und DEICHHAUS (zum Teil im Detailausschnitt deutlicher ersichtlich, siehe Abbildung 25) weisen mehr und tiefere Mulden auf. Besonders der Osten der beiden Stadtteile ist geprägt durch Mulden und Senken bis 2,5 m. Dazu gehören Flächen nördlich der LINDENSTRAßE in ZANGE und eine größere Fläche im unbebauten Raum im Süden von DEICHHAUS, welche parallel zur SIEG verläuft. Auch im südwestlichen Außenbereich von ZANGE befinden sich mehrere Senken; u.a. eine größere, die bis zu 2,0 m tief ist. In WOLSDORF (ebenfalls teilweise im Detailausschnitt detaillierter sichtbar) ist insbesondere der Südwesten von vergleichsweise tiefen Senken (0,01 m bis 1,25 m) durchzogen. Dabei handelt es sich insbesondere um das Industrie- und Gewerbegebiet nördlich und südlich der WILHELM-OSWALD-STRAßE.

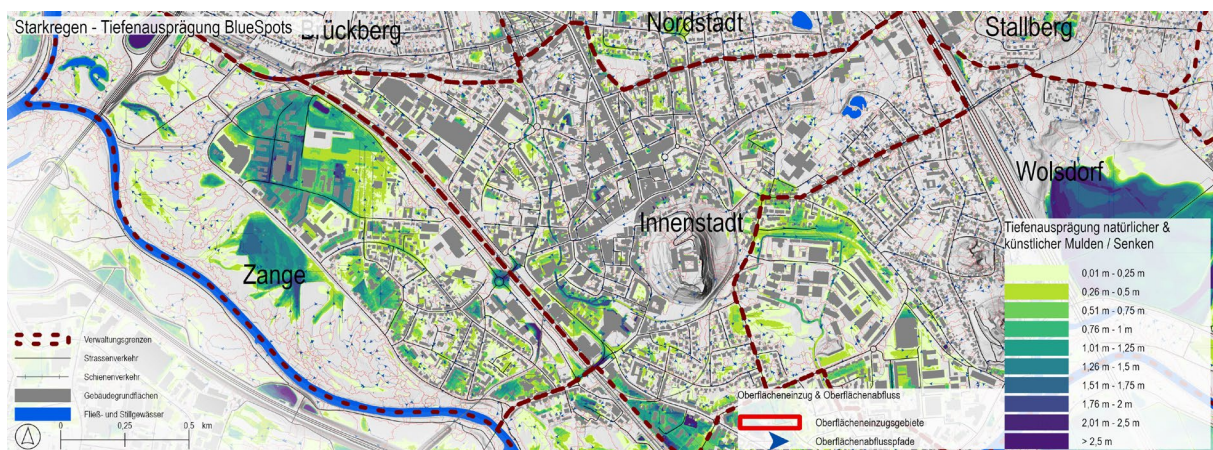


Abbildung 25: Themenkarte Starkregen, Innenstadtbereich – BlueSpot-Analyse: Tiefenausprägungen natürlicher und künstlicher Mulden und Senken.

In der Innenstadt (siehe Abbildung 25) weist insbesondere das Gewerbegebiet südlich der FRANKFURTER STRAßE, welches direkt an den mit tiefen Mulden und Senken durchzogenen Westen von DEICHHAUS angrenzt, besonders tiefe Bereiche auf (bis zu 2,0 m). Die anderen im Westen der Innenstadt gelegenen Industrie- und Gewerbegebiete fangen ebenfalls Niederschlagswasser auf, sind jedoch weniger tief (meistens bis zu 1,0 m). Ähnliche Tiefen prägen auch die restlichen Senken und Mulden der dicht bebauten Innenstadt. Lediglich der Osten ist von seichteren Senken geprägt.

In den nordwestlich gelegenen Stadtteilen BRÜCKBERG, NORDSTADT und STALLBERG sind insgesamt weniger Mulden und Senken vorhanden. Der Großteil dieser sind ebenfalls seichter (meist zwischen 0,01 m bis 0,75 m). Im bebauten Bereich gibt es einige Ausnahmen mit tieferen Mulden und Senken (häufig nicht tiefer als 1,5 m). Dazu gehören Freiflächen der Bebauung entlang der WEIERSTRAßE und HEPPEKAUSENSTRAßE in NORDSTADT, entlang der GARTENSTRAßE und AGGERSTRAßE in BRÜCKBERG sowie nördlich AM GRAFENKREUZ und KALDAUER STRAßE in STALLBERG. Auch die WINTERBERGSTRAßE in STALLBERG weist ähnliche Tiefen auf, wobei im angrenzenden unbebauten Raum noch tiefere Flächen vorhanden sind. Gleiches gilt

für die Waldflächen nördlich der Straße STEINBAHN, den MICHAELSGARTEN, den NORDFRIEDHOF und das WALTER-MUNDORF-STADION in NORDSTADT (bis zu 2,5 m bzw. > 2,5 m).

Die Freiflächen im unbebauten Außenbereich von Siegburg sind bezogen auf die Tiefenprägung der BlueSpots sehr heterogen geprägt. Der nördliche Teil des Stadtgebietes ist bis auf einige bereits beschriebene Ausnahmen eher seicht (meist zwischen 0,01 m bis 1,0 m). Tiefer sind überwiegend die beschriebenen Freiflächen im Süden (bis zu > 2,5 m).

Überlaufverhalten der BlueSpots

Niederschlagsmengen bis 20 mm und bis 30 mm werden im Siegburger Siedlungsgebiet (siehe Abbildung 26) häufig durch kleine Flächen im bebauten Raum aufgenommen. Sie befinden sich typischerweise in direkter Umgebung einzelner Gebäude oder entlang von Straßen. In SELIGENTHAL sind das bspw. punktuelle Flächen im Industrie- und Gewerbegebiet entlang der HAUPTSTRAßE, wobei das Wasser nach einem Spillover in Richtung SIEG abfließt. Ähnlich ist die Situation in KALDAUEN. Hier fließt das Wasser (bis 20 mm) bspw. aus einem vergleichsweise größeren Bereich südlich ZUR ALTEN FÄHRE nicht nur in die SIEG ab, sondern auch in eine der größten und tiefsten Mulden im unbebauten Raum zwischen KALDAUEN und WOLSDORF (kein Überlauf bis 100 mm). Aus den Mulden in BRASCHOLß, die ein eher geringes Fassungsvermögen aufweisen, fließt das Wasser häufig in Richtung WAHNBACHTALSPERRE oder einen ihrer Zuflüsse wie BLEIBACH.

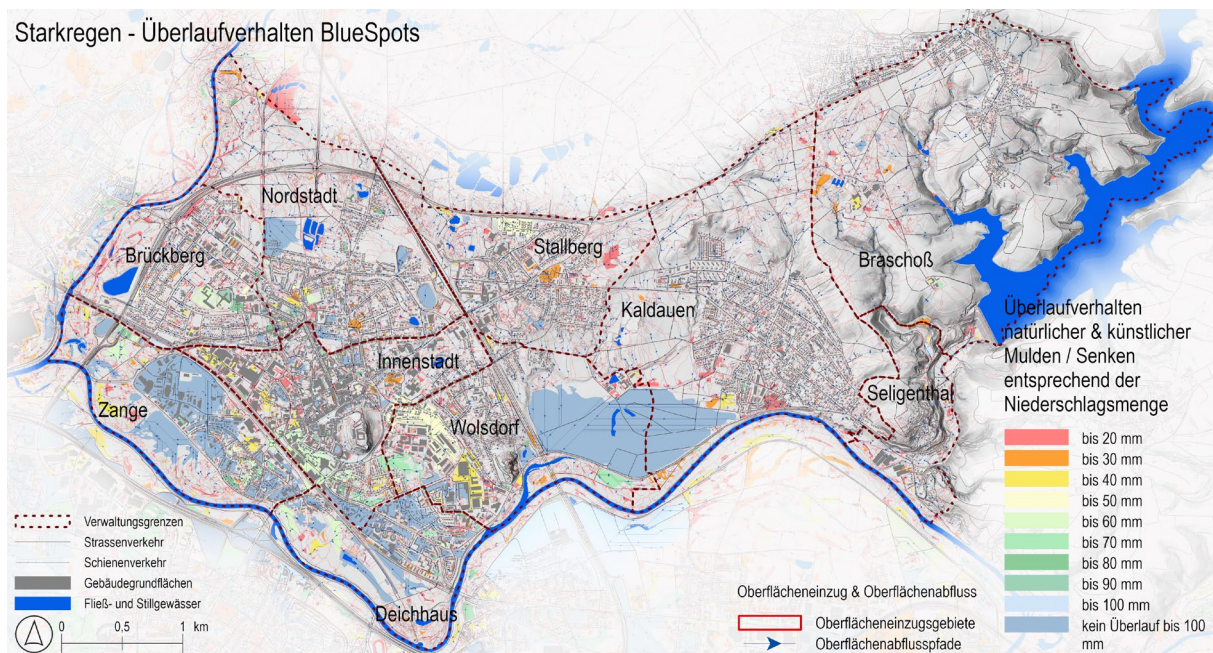


Abbildung 26: Themenkarte Starkregen – BlueSpot-Analyse: Überlaufverhalten nach Niederschlagsmengen. Flächige Darstellung für den administrative Raum von Siegburg, die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgte über den administrativen Raum von Siegburg hinaus. Die farbliche Codierung gibt unterschiedliche Niederschlagsmengen [mm/cm] wieder, die den BlueSpot zum Überlaufen bringen, von < 20 mm (rot) bis kein Überlauf < 100 mm (rauchblau). Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Die südwestlich gelegenen Stadtteile ZANGE und DEICHHAUS weisen weitaus mehr Mulden unterschiedlicher Überlaufverhalten auf. Beinahe der gesamte bebaute und unbebaute Bereich um ZANGE und DEICHHAUS ist geprägt durch Flächen, die bis 100 mm nicht überlaufen. Besonderes Augenmerk gilt diesen Siedlungsbereichen, die in Extremsituationen als Mulden mit einem sehr hohen Fassungsvermögen fungieren. Die restlichen Flächen in ZANGE und DEICHHAUS sind sehr heterogen geprägt. Der GERHART-HAUPTMANN-WEG und die BUNZLAUER STRASSE in DEICHHAUS sowie die Freiflächen um die Bebauung entlang dieser Straßen dienen bspw. als Senken bis 20 mm und bis 30 mm. Bis 40 mm Niederschlag kann auf einer Freifläche unweit der SIEG in DEICHHAUS und um die Bebauung (Gewerbe und Wohnnutzung) im Bereich HOHENZOLLERNSTRASSE und KATHARINENSTRASSE in ZANGE gestaut werden, wobei Senken in Wohngebieten immer ein Risiko darstellen. Zwischen bis 60 mm und bis 90 mm stauen sich u.a. in ZANGE um die Gebäude entlang der PETERSTRASSE und SIEGSTRASSE. Sie sind noch detaillierter im Detailausschnitt Bereich Innenstadt (siehe Abbildung 27) zu sehen.

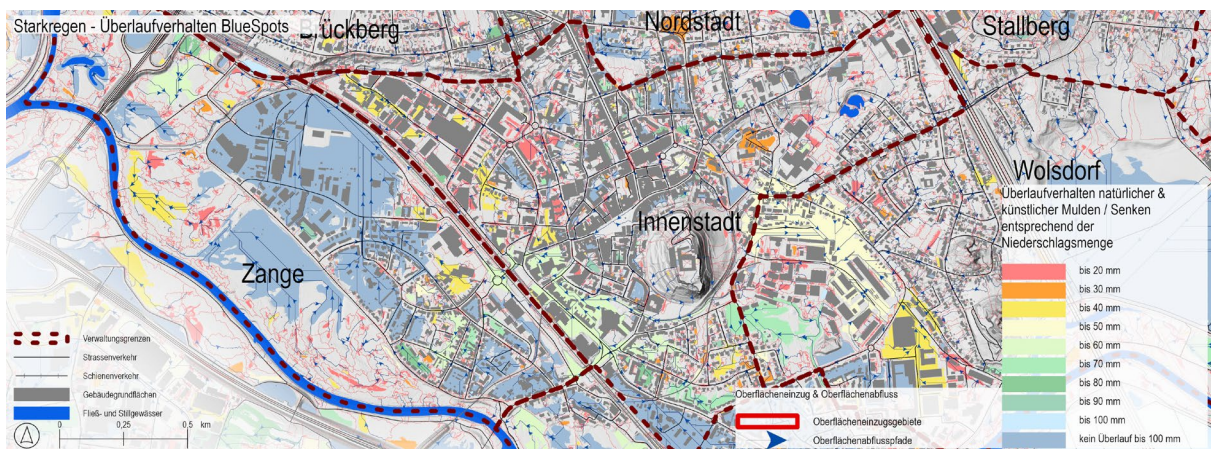


Abbildung 27: Themenkarte Starkregen, Innenstadtbereich – BlueSpot-Analyse: Überlaufverhalten nach Niederschlagsmengen.

In der Innenstadt (siehe Abbildung 27) stellt ein Großteil der südlichen Flächen Senken mit demselben Überlaufverhalten (60 mm und bis 90 mm) dar. Viele Zwischenräume der dichten Bebauung der nördlichen INNENSTADT dienen entweder als Senken zwischen bis 20 mm und bis 40 mm (bspw. Industrie- und Gewerbegebiet entlang der INDUSTRIESTRASSE) oder als Flächen, die bis 100 mm nicht überlaufen. Zu den letztgenannten gehören Flächen entlang der VON-STEPHAN-STRASSE, CECILIENSTRASSE sowie das Seniorenzentrum an der FRIEDRICH-EBERT-STRASSE. Vulnerable Bevölkerungsgruppen sind bei Hochwasser besonders gefährdet, u.a. da sie häufig in ihrer Mobilität behindert sind. Hier besteht ein besonderer Auftrag an die Stadtplanung, dies in der Abwägung bzw. in einem inklusiven und barrierefreien Design zu berücksichtigen – in der räumlichen Planung wie auch der Erstellung von Notfallplänen.

Ebenfalls in der Detailansicht zu sehen ist WOLSDORF. Neben der bereits beschriebenen großen Senke zwischen KALDAUEN und WOLSDORF (kein Überlauf bis 100 mm), ist insbesondere der Südwesten von weiteren Senken durchzogen. Ein großer Bereich läuft bei 40 mm (Industrie- und Gewerbegebiet südlich der WILHELM-OSWALD-STRASSE) bzw. 50 mm (Industrie- und Gewerbegebiet nördlich der WILHELM-OSWALD-STRASSE) über. Südlich davon fassen Senken Niederschlagsmengen bis 70 mm und laufen stellenweise bis 100 mm nicht über. Zwischen den Gewerbeflächen und der Wohnbebauung insb. im nordöstlichen Teil) tauchen immer wieder Mulden auf, die Niederschlag bis 20 mm auffangen können.

In den nordwestlich gelegenen Stadtteilen BRÜCKBERG, NORDSTADT und STALLBERG sind insgesamt weniger Mulden und Senken vorhanden. Neben den kleineren Flächen, die Niederschläge bis 20 mm aufnehmen, befindet sich ein solcher Hotspot an der UHLRATHER STRAßE in BRÜCKBERG. Bis 30 mm sammeln sich u.a. großflächig zwischen KALDAUER STRAßE und ZEITHSTRAßE in STALLBERG und fließt bei einem Spillover zum Teil in Richtung einer Senke um die WINTERBERGSTRAßE (bis 50 mm). In der NORDSTADT laufen Niederschläge bis 30 mm in eine Senke an der Kreuzung der SCHILLERSTRAßE und GOETHESTRAßE sowie nördlich des SCHILFWEG. Bis 40 mm Niederschlag sammeln sich in NORDSTADT u.a. südlich des SCHILFWEG sowie nördlich des Sportfeldes an der WALDSTRAßE und fließen bei einem Spillover in das nahe gelegene Sportfeld (bis 60 mm). In BRÜCKBERG fließen Niederschläge zwischen bis 60 mm und bis 80 mm in Senken um das Sportfeld, die Justizvollzugsanstalt und Gewerbeflächen nördlich der AGGERSTRAßE. Insbesondere für die Justizvollzugsanstalt sollten Maßnahmen für den Fall ergriffen werden, dass es zu extremen Niederschlagsereignissen kommt. Zu den Mulden und Senken bis 100 mm Niederschlag bzw. ohne Überlauf bis 100 mm gehören in BRÜCKBERG der TRERICHSWEIHER und in der NORDSTADT eine Fläche nördlich der STEINBAHN und im ENTENWALD, Flächen entlang der WEIERSTRAßE, eine Fläche am NORDFRIEDHOF und das WALTER-MUNDORF-STADION. In STALLBERG gehören zu diesen Flächen die Wasserflächen im GAGELBESTAND und im WALD SEIDENBERG sowie ein Bereich westlich der Straße FICHTENBERG.

Die Freiflächen im unbebauten Außenbereich von SIEGBURG sind bezogen auf ihr Überlaufverhalten sehr heterogen geprägt. Senken, die Niederschlagsmengen bis 20 mm und bis 30 mm aufnehmen können, befinden sich überwiegend im nördlichen Teil des Stadtgebietes. Höhere Niederschlagsmengen (insb. bis 60 mm und kein Überlauf bis 100 mm) werden von Mulden und Senken im Süden des unbebauten Stadtgebietes erfasst.

5.3 Bebauungsanalysen

5.3.1 Baulich-Räumliche Offenheit

Der sogenannte SkyView-Faktor (SVF) dient als Indikator für die baulich-räumliche Offenheit (siehe Abbildung 28). Als dimensionsloser Wert erfasst er den Grad der Offenheit gegenüber dem Himmel. Der Wert 0 indiziert eine vollständige Geschlossenheit, während der Wert 1 eine vollständige Offenheit anzeigt. Die Einschränkungen des Sichtfeldes durch Vegetationsstrukturen wie Stadtbäume oder generell einzelnen Gehölzen und Wäldern werden in der Berechnung der baulich-räumlichen Offenheit nicht berücksichtigt.



Abbildung 28: Schematische Darstellung der Baulich-Räumlichen Offenheit (SkyView-Faktor). Der SVF wird durch einen Wertebereich zwischen Null (vollständige Geschlossenheit) und Eins (vollständige Offenheit) beschrieben.

Der SVF ist ein Maß, das zum besseren Verständnis der Beziehung zwischen den Parametern der Hitzeinsel, Wärme und des Energieaustauschs in der städtischen Umgebung beiträgt. Einerseits wird der Grad der Offenheit durch die Höhe der Bebauung und der Dichte der Bebauung zueinander beeinflusst, andererseits treten Einschränkungen auch auf natürliche Weise im Kontext topographischer Gegebenheiten (z. B. durch Hügel, Senken) auf.

Durch die kombinierte Betrachtung von Höhe und Entfernung der Bebauung zueinander können aus städtebaulicher Sicht Interpretationen zur Stadtmorphologie abgeleitet werden.

Im unbebauten Außenbereich wird der SVF allein durch topographische Differenzen eingeschränkt. Die Spanne des SVF reicht hier somit von auf freiem Feld weitgehend uneingeschränkt bis hin zu leicht beeinträchtigt, wie es z.B. um die Uferbereiche der WAHNBACHTALSPERRE ersichtlich ist. Siegburg liegt in Ausläufern des BERGISCHEN LAND, wobei sich die hügelige Landschaft insbesondere im Osten um BRASCHOß und SELIGENTHAL bemerkbar macht. Diese zeigt sich anhand von SVF-Werten zwischen 0,9 und 0,6 in hügeligeren Bereichen. Im Großteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Außenreichs SIEGBURGS ist der SVF nur minimal eingeschränkt, was einer generell hohen baulich-räumlichen Offenheit entspricht.

Wesentlich stärker variiert der SVF im bebauten Raum, wo er zusätzlich zu den topographischen Gegebenheiten auch von diversen Baukörpern beeinflusst wird. Abhängig von der Bebauungsdichte und der Größe der Baukörper nimmt die baulich-räumliche Offenheit ab. Dies schlägt sich in einer entsprechend niedrigen Bewertung des SVF nieder. In den östlich, eher ländlich gelegenen Stadtteilen von Siegburg BRASCHOß und SELIGENTHAL, wird der SVF stärker eingeschränkt, als auf dem Offenland (siehe Abbildung 29). Der Grad der baulich-räumlichen Offenheit bewegt sich dort jedoch aufgrund der geringen Größe und hohen Anzahl der vorhandenen Freiflächen insgesamt noch in der oberen Hälfte der SVF-Skala. Lediglich die Bebauung um Hauptverkehrsachsen wie die ZEITHSTRAßE in BRASCHOß weisen eine geringere baulich-räumliche Offenheit auf.

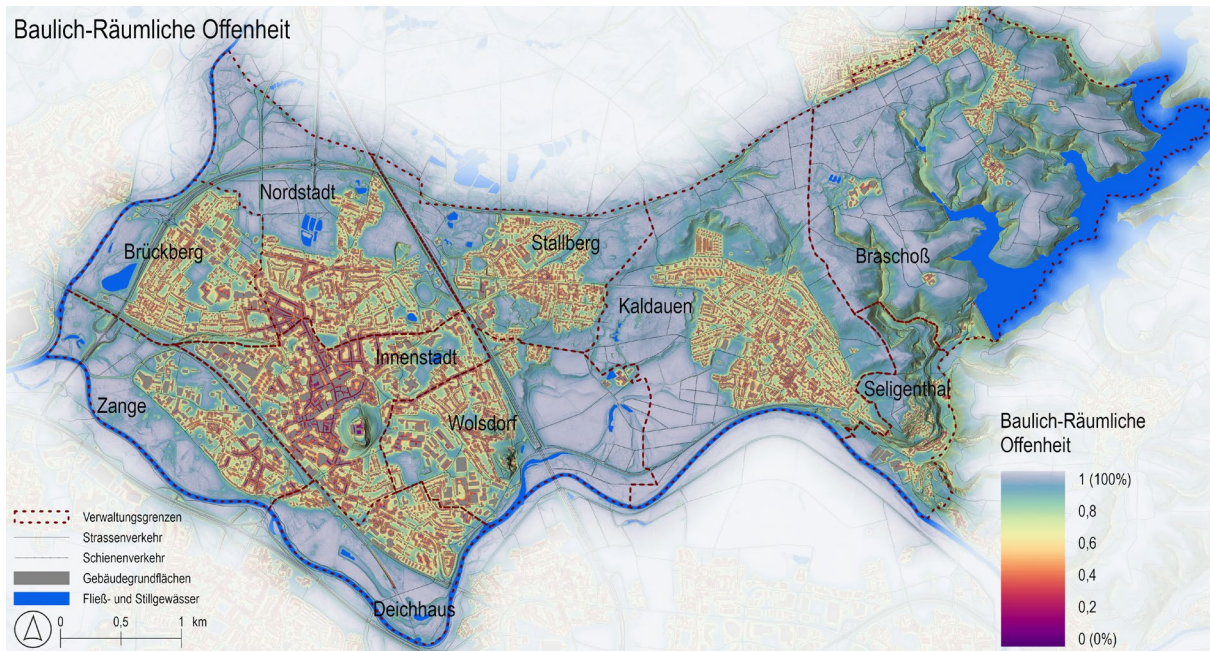


Abbildung 29: Themenkarte Baulich-Räumliche Offenheit: Grad der baulich-räumlichen Offenheit auf Grundlage von Bebauung und Topographie. Flächige Darstellung für den administrativen Raum von Siegburg. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedliche Offenheit wieder. Ein stark eingeschränktes Sichtfeld stellt eine niedrige baulich-räumliche Offenheit (dunkelviolet) dar, offene Bereiche werden in blassblau dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

In den weiter westlich gelegenen Stadtteilen schließen sich wohnlich geprägte lockere Bebauungen mit Einfamilienhäusern, kleineren Wohneinheiten und teilweise Industrie- und Gewerbegebieten an. Sie unterscheiden sich von der dichten Bebauung der innerstädtischen Stadtteile, sind aber auch weniger dörflich geprägt als SELIGENTHAL und BRASCHOß. Dazu gehören die vorstädtisch geprägten Stadtteile KALDAUEN, WOLSDORF, DEICHHAUS und STALLBERG mit SVF bis 0,2. Hier wirken sich Freiflächen im Sinne von Offenflächen, Spielplätzen und Parkanlagen wie der großflächigen Sportanlage um den WEIßDORNWEG in KALDAUEN, den Freiflächen und Sportanlagen entlang der STALLBERGER JÄGERSTRAßE und der Freifläche entlang der ALFRED-KELLER-STRAßE in WOLSDORF vorteilhaft auf den SVF aus. Die Siedlungsflächen, die primär von kleinteiliger Wohnbebauung geprägt sind, schneiden bei der Bewertung des SVF besser ab, als viele innerstädtische Wohngebiete. Die Industrie- und Gewerbegebiete im Gemeindegebiet weisen grundsätzlich sehr gute SVF-Werte auf. Beispielsweise kommen die Werte des SVF im WOLSDORFER Industriegebiet nur selten unter den Wert 0,2.

Die eher dichter bebauten Stadtteile INNENSTADT, ZANGE, BRÜCKBERG und NORDSTADT (siehe Abbildung 29) weisen teilweise SVF-Werte bis 0 auf, wobei die Bebauung innerhalb dieser Stadtteile heterogen ist und auch Bereiche vorkommen, deren baulich-räumliche Offenheit weniger eingeschränkt ist. Insbesondere im innerstädtischen Bereich ist die baulich-räumliche Offenheit aufgrund der Anzahl und Bebauungsdichte der Gebäude weitflächiger eingeschränkt als dies in den umliegenden Orten der Fall ist. Das betrifft insbesondere die INNENSTADT um die KAISERSTRAßE und ihre Querstraßen wie HOLZGASSE und MARKT, was sich in den Gebäudeszwischenräumen und Straßenzügen nachteilig auf den SVF auswirkt (siehe Abbildung 29). Die Bebauung um die AGGERSTRAßE und GARTENSTRAßE, welche sich auf die Stadtteile NORDSTADT und BRÜCKBERG erstrecken, sind weitere Beispiele für Bereiche mit sehr niedrigen SVF-Werten. Besonders gering ist die baulich-räumliche Offenheit auch in Zange entlang der

KATHARINENSTRAßE und angrenzenden Gebäuden sowie entlang der PETERSTRAßE und der LUDWIGSTRAßE. Auch hier wirken sich Freiflächen vorteilig auf den SVF aus, sie sind hier jedoch in geringerem Ausmaß vertreten als in den vorstädtisch und ländlich gelegenen Stadtteilen. Der Michaelsberg sticht dabei eindeutig heraus. Zum einen da seine baulich-räumliche Offenheit sehr hoch ist und zum anderen, weil um die Bebauung (Abtei, Kirche etc.) der SVF einen der höchsten SVF-Werte in ganz Siegburg aufweist. Siedlungsflächen, die primär von kleinteiliger Wohnbebauung geprägt sind schneiden bei der Bewertung des SVF besser ab. Dies trifft beispielsweise auf das Gebiet südlich der SEEHOFSTRAßE in NODSTADT und westlich der MOLTKESTRAßE in BRÜCKBERG zu. Die Industrie- und Gewerbegebiete weisen ähnliche / sehr gute SVF-Werte aufweisen, wie auch in den anderen Stadtteilen.



Abbildung 30: Themenkarte Baulich-Räumliche Offenheit, Innenstadtbereich: Grad der baulich-räumlichen Offenheit auf Grundlage von Bebauung und Topographie

5.3.2 Mittlere Baumassenvolumendichte

Die Baumassenvolumendichte beschreibt innerhalb des Siedlungsraums das Verhältnis der Baumassen und der baulichen Dichte der Gebäude zueinander (siehe Abbildung 31).

Die Analyse erfolgt auf Grundlage eines Rasters mit einer Auflösung von 1,0 m. Entsprechend werden alle Gebäude in ein regelmäßiges Punktraster konvertiert. Bei der durchgeführten Berechnung der Punkt-

dichte werden bei allen Punkten die Informationen der jeweiligen Gebäudehöhen sowie die Nachbarschaft in einem Umkreis von 56,419 m (1 ha um jede Rasterzelle) berücksichtigt, wodurch das Ergebnis auf 1 ha bilanziert wird (Mittlere Baumassenvolumendichte).

Die Bauvolumendichte ermöglicht somit die Interpretation des 3-dimensionalen Raums im Kontext der Nachbarschaft von Gebäuden, Volumina sowie des Freiraums der nicht überbauten Flächen. Ergänzend erfolgt eine statistische Auswertung des 90. Perzentil der mittleren Baumassenvolumendichte für die räumliche Ebene der Stadtbezirke.

Auf den Untersuchungsraum bezogen liegt ein Großteil des bebauten Stadtgebietes bei einer Baumassenvolumendichte von $\leq 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ – $\leq 2,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ (siehe Abbildung 32). In den kleinflächigen Stadtteilen (insb. BRASCHÖß und SELIGENTHAL) weicht die bauliche Verdichtung der jeweiligen Ortskerne nur minimal von der Baumassenvolumendichte ihres direkten Umfeldes ab. In SELIGENTHAL liegen die Höchstwerte um $\leq 4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ und werden punktuell im Bereich des Gewerbegebietes entlang der HAUPTSTRAßE erreicht. Die momentan behördlich genutzten Gebäude entlang der Straße SIEGELSKNIPPEN in BRASCHÖß zeigen eine Baumassenvolumendichte von bis zu $\leq 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$.

In den meisten Bereichen von STALLBERG, DEICHHAUS und KALDAUEN sind Abweichungen der Baumassenvolumendichte im Rahmen von $\leq 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ – $\leq 4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ vorherrschend. Sie ähneln also den Werten der kleinflächigen Gemeindeteile (BRASCHÖß und SELIGENTHAL). Die höheren Werte treten hier jedoch flächiger und nicht nur punktuell auf. Das liegt daran, dass die Wohngebiete hier einen eher vorstädtischen Charakter besitzen und dichter bebaut sind, als in den eher ländlich geprägten im Osten angrenzenden Stadtteilen. Baumassenvolumendichten zwischen $\leq 4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ und $\leq 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ werden um mehrere Wohnblocks u. a. entlang der FRANKFURTER STRAßE, MOZARTSTRASSE und BRUCKNERSTRASSE in DEICHHAUS sowie ZUR ALTEN FÄHRE und AM SONNENHANG in KALDAUEN erreicht. Auch das Ärztehaus an der HAUPTSTRASSE, das Hotel am HÖHENWEG und die Sporthalle am ROTDORNWEG in KALDAUEN setzen sich von der umgebenden weniger dicht bebauten Wohnumgebung ab. In STALLBERG konzentrieren sich höhere Werte der Baumassenvolumendichte weitläufig um den Kreisverkehr, an dem sich u. a. die ZEITHSTRASSE und KALDAUER STRASSE treffen. Außerdem weisen hier gewerblich genutzte Gebäude und Sportstätten z.B. an der ZEITHSTRASSE, JÄGERSTRASSE und AM REITERHOF Werte um $\leq 4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ bis $\leq 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ auf.

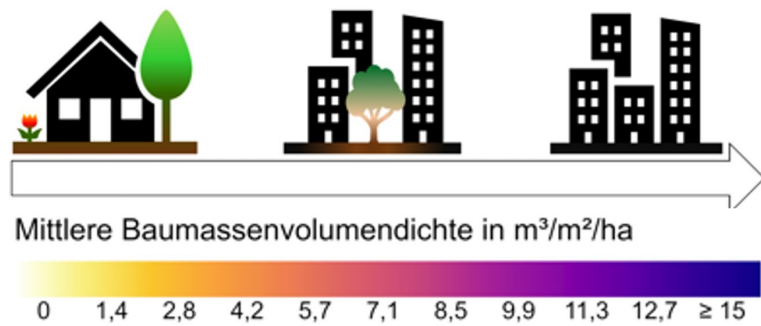


Abbildung 31: Schematische Darstellung unterschiedlicher Baumassenvolumendichten, über die sich Rückschlüsse auf die Baumassen und die bauliche Dichte der Gebäude innerhalb des Siedlungsraums zueinander ableiten lassen.

In den restlichen Stadtteilen unterliegen die Abweichungen höheren Schwankungen. Die Werte unterscheiden sich insbesondere in Wohngebieten, Industrie- und Gewerbegebieten und innerstädtischen Bereichen. Die Baumassenvolumendichte variiert hier insgesamt zwischen rund $\leq 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ – $\geq 15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$.

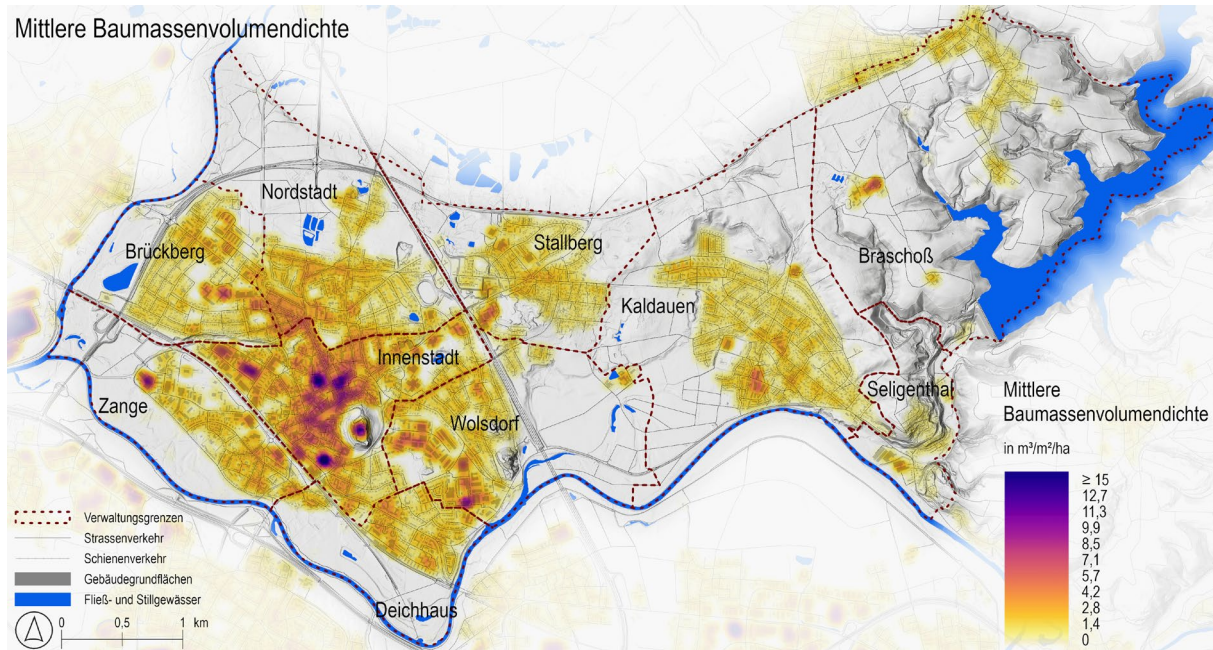


Abbildung 32: Themenkarte Baumas­sen – Mittlere Baumas­sen­volumen­dichte. Die mittlere Baumas­sen­volumen­dichte [m^3/m^2 je ha] wird flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedliche Werte wieder. Eine niedrige Baumas­sen­volumen­dichte wird in hellgelb und eine hohe Baumas­sen­volumen­dichte in dunkelviolett dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Wohngebiete in WOLSDORF, BRÜCKBERG, ZANGE und NORDSTADT weisen häufig Baumas­sen­volumen­dichten mit $\leq 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ – $\leq 2,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ sowie $\leq 4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ – $\leq 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ auf. Die niedrigeren Werte kommen häufig an den Siedlungsrändern vor und belaufen sich beispielsweise auf die Gebäude am SIEGDAMM in ZANGE, die Siedlung westlich der MOLTKESTRASSE / IM URNENFELD in BRÜCKBERG, einen Großteil der Fläche südlich der SEEHOFSTRASSE der NORDSTADT und die Häuser entlang des LÄRCHENWEG von WOLSDORF. Höhere Werte zeigen sich insbesondere weitläufig in Wohngebieten der NORDSTADT. Dort ist bspw. die Umgebung der LUISENSTRASSE und BREITE STRASSE weitläufig von hohen Baumas­sen­volumen­dichten betroffen. Ebenso weisen in BRÜCKBERG nördlich der LUISENSTRASSE viele Wohnblocks Baumas­sen­volumen­dichten bis $\leq 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ auf. In WOLSDORF weist die Kirche ST. DREIFALTIGKEIT und die umgebenden Anlagen (u. a. mit Kinderheim) die höchsten Werte innerhalb der Wohngebiete auf. In ZANGE entlang der KONRAD-ADENAUER-ALLEE befinden sich u.a. ein Parkhaus und Bildungseinrichtungen, die vergleichsweise hohe Werte aufweisen. ZANGE ist, ähnlich wie NORDSTADT, durchweg von höheren Baumas­sen­volumen­dichten in den Wohngebieten geprägt. Stärkere Anstiege der Baumas­sen­volumen­dichte ($> 5,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$) sind seltener, treten jedoch sowohl punktuell als auch gebietsgebunden auf. Im Gewerbegebiet im Westen von ZANGE kommen punktuell Baumas­sen­volumen­dichten bis $\leq 11,3 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ vor. Etwas niedriger, aber dafür großflächiger fallen die Baumas­sen­volumen­dichten des Industrie- und Gewerbegebietes südlich der DAMMSTRASSE / PILGRIMSWEG in WOLSDORF aus. Das Gewerbegebiet von BRÜCKBERG entlang der MARCEL-CHARPANTIER-STRASSE setzt sich bezogen auf die Baumas­sen­volumen­dichte auch von der Wohnumgebung ab.

Im Großteil der INNENSTADT (siehe Abbildung 33) betragen die Baumassenvolumendichten zwischen $\leq 2,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ und $\leq 7,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$. Die Ansicht Innenstadt unten in der Karte zeigt die Situation hier im Detail. Der weitläufige Bereich um den Michaelsberg ist großflächig am dichtesten bebaut und weist Werte bis $\leq 11, \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ vor. Beispiele für eine punktuelle Erhöhung der Baumassenvolumendichte in der SIEGBURGER INNENSTADT bis $\geq 15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{ha}$ sind gewerblich genutzte Flächen entlang INDUSTRIESTRAßE, das Klinikum und weitere gesundheitsrelevante Einrichtungen an der RINGSTRAßE, das Shoppingcenter und weitere Gewerbeflächen an der CECILIENSTRAßE, behördlich genutzte Gebäude an der WILHELMSTRAßE und das Kloster MICHAELSBERG. Insgesamt setzt sich die Innenstadt von Siegburg deutlich von den anderen Stadtteilen ab. Sie ist eindeutig und großflächig dichter bebaut. Die höchsten Werte treten hier nicht nur in industriell und gewerblich genutzten Bereichen, sondern weitläufig über den Stadtteil verteilt auf.

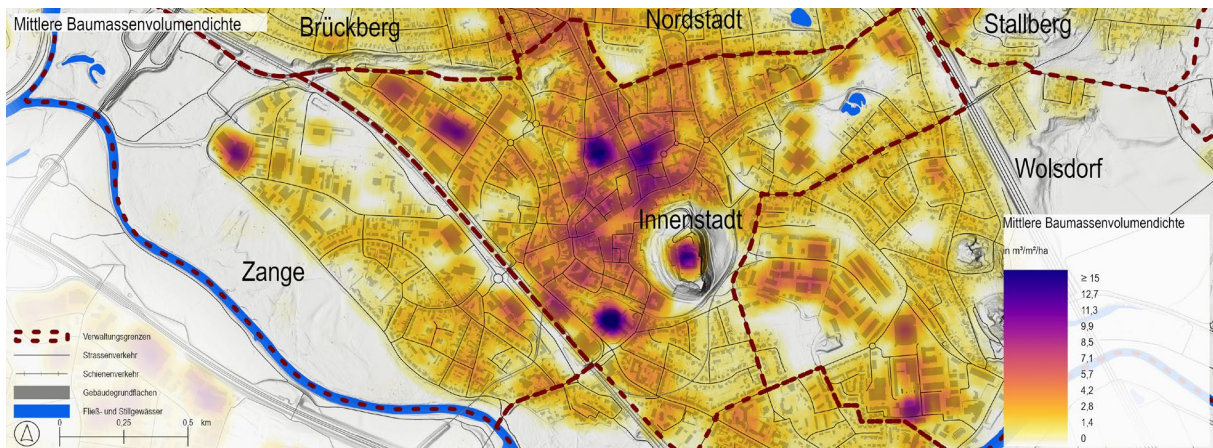


Abbildung 33: Themenkarte Baumassen – Mittlere Baumassenvolumendichte, Innenstadtbereich

5.4 Vegetationsanalysen

5.4.1 Vegetationserfassung

Die Vegetationsstrukturen werden auf Grundlage digitaler Orthophotos (DOP) mit integrierten Nahinfrarotkanal bei einer räumlichen Auflösung von 20 cm erstellt. Dabei reflektiert der hohe Chlorophyllanteil vitale Grünstrukturen den Nahinfrarotbereich (NIR) ungefähr sechsmal besser als die Wellenlängen, speziell die Grünen, des sichtbaren Spektrums (siehe Abbildung 34). Über die Auswertung des IR-Bandes von Luftbildern in Vollbelaubung kann so eine dezidierte Erfassung der Vegetationsstrukturen im öffentlichen wie auch privaten Raum erfolgen, wodurch das gesamtstädtische Grün erfasst wird.

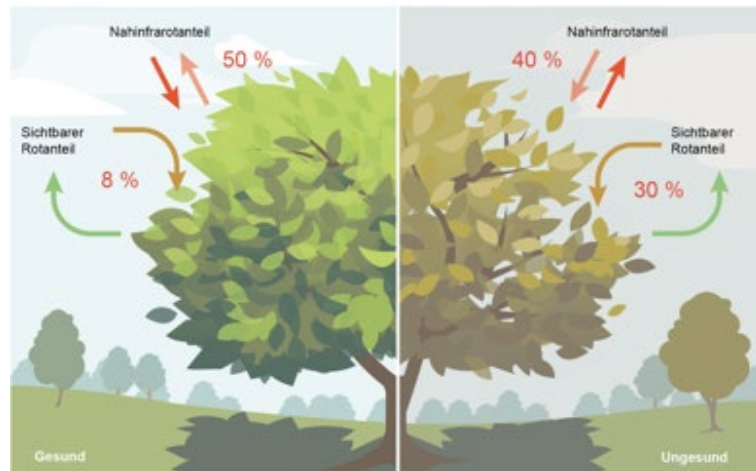


Abbildung 34: Schematische Darstellung zur Erfassungsmethodik von Vegetation. Auf Grund eines höheren Chlorophyllanteils (Blattgrün) reflektieren vitale Grünstrukturen stärker im Nahinfrarotbereich als geschädigte, während gleichzeitig der Rotbereich des sichtbaren Lichts weniger stark reflektiert wird.

Zur Identifikation aller vitalen Vegetationsstrukturen wird der NDVI („Normalized Difference Vegetation Index“) sowie der CI-Green („Green Chlorophyll Index“) genutzt. Dabei können potentiell verfälschende Einflüsse durch Schattenwürfe von Gebäuden, durch Topographie oder auch von Bäumen reduziert werden.

Ergänzende Flächennutzungen (außerhalb des Siedlungsraums), die nativ vegetationsdominiert sind (z. B. Wälder, Offenland etc.) werden zusätzlich gekennzeichnet und überlagert.

Die verwendeten Luftbilder stammen aus dem Jahr 2023.

Zusätzlich werden höhere Vegetationsstrukturen dezidiert, mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 m auf Grundlage des digitalen Oberflächenmodells (DOM) flächendeckend erfasst. Damit ist es zusätzlich möglich das Grünvolumen innerhalb des urbanen Raums sichtbar zu machen.

Mittlere Vegetationsdichte

Der berechnete mittlere Vegetationsanteil pro Hektar ergibt sich aus der flächenspezifischen Umkreisanalyse mit der Größe von einem Hektar. Diese Darstellung ermöglicht eine detaillierte und flächendeckende Quantifizierung der Vegetationsverteilung, die sowohl den Grad der Durchgrünung im urbanen und periurbanen Raum sichtbar macht.

Der unbebaute Außenraum zeichnet sich überwiegend durch eine Vegetationsdichte von $\leq 100\%$ aus. Dabei zeigt die Linienschraffur die Offenlandflächen und die Gitterschraffur die Wälder an.

Hinsichtlich der Flächendurchgrünung ergibt sich ein heterogenes Gesamtbild des städtischen Raums (siehe Abbildung 35). Die östlich gelegenen Stadtteile BRASCHOW und SELIGENTHAL zeichnen sich überwiegend durch eine Vegetationsdichte von $\leq 40\%$ bis $\leq 60\%$ aus. Lediglich im Gewerbegebiet im Süden von SELIGENTHAL und um die Verwaltungsgebäude an der Straße SIEGELSKNIPPEN außerhalb von BRASCHOW beläuft sich die Vegetationsdichte punktuell auf bis zu $\leq 10\%$.

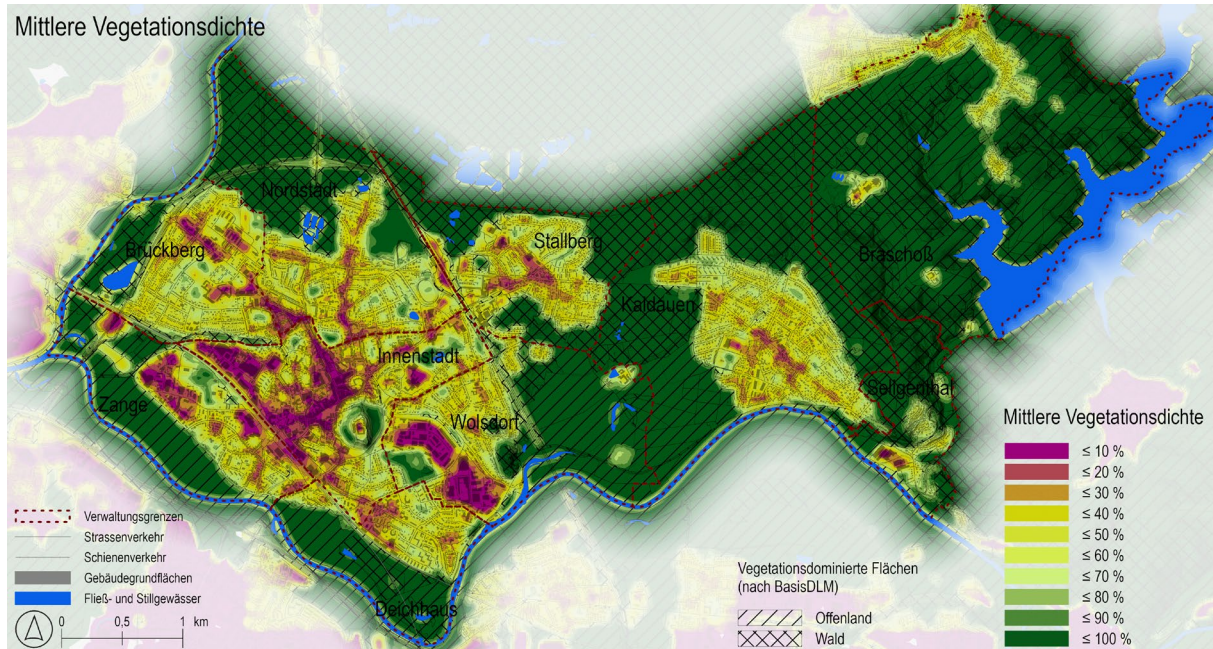


Abbildung 35: Themenkarte Vegetationserfassung – Mittlere Vegetationsdichte: Vegetationsanteil. Die mittlere Vegetationsdichte pro Hektar wird flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedlichen Dichten wieder. Ein niedriger Vegetationsanteil wird in violett und ein hoher Vegetationsanteil in dunkelgrün dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Je dichter sich die Stadtteile an der INNENSTADT befinden, umso mehr sinkt ihr Anteil an einer hohen Flächendurchgrünung. Die Vegetationsdichte in KALDAUEN erinnert insbesondere im Norden an die der ländlicheren Stadtteile. Es gibt jedoch mehrere Bereiche mit einer Durchgrünung zwischen $\leq 20\%$ und $\leq 30\%$. Dazu gehören insbesondere Flächen um die HAUPTSTRAßE. Ein Teil der Sportflächen nördlich des WEIßDORNWEG beläuft sich auf $\leq 10\%$. Es wird jedoch auch deutlich, dass die Vegetationsdichten von innerstädtischen Grünflächen deutlich höher sind. Beim Spielplatz südlich des WEIßDORNWEG belaufen sie sich auf $\leq 70\%$ bis $\leq 90\%$. Ähnlich geprägt ist auch DEICHHAUS bezogen auf seine Flächendurchgrünung, wobei die geringsten Vegetationsdichten insbesondere im Westen um die FRANKFURTER STRAßE und die HÄNDELSTRAßE auftreten und die höchsten Werte um die Freiflächen entlang der JOSEF-MOHR-STRAßE.

Da der Vegetationsanteil direkt mit der Art der Flächennutzung und der Bau- und Raumgestaltung zusammenhängt, sind Unterschiede im Durchgrünungsgrad des urbanen Raums ersichtlich. Dies zeigt sich noch deutlicher in den stärker verdichteten Stadtteilen. Gewerbe- und Industriegebiete wie z.B. im Süden von WOLSDORF sowie im Nordwesten von ZANGE und der INNENSTADT charakterisieren sich im Zuge ihrer hohen Flächenversiegelung durch ein geringes Vegetationsvorkommen, welches in entsprechend niedrigen Prozentsätzen ($\leq 10\%$ bis $\leq 20\%$) ausgedrückt wird. Die Durchgrünung der weiteren urbanen Flächen variiert in ihrer Ausprägung: Insbesondere in der Nähe der INNENSTADT und an breiteren Straßen fällt die

Durchgrünungsrate gering aus ($\leq 10\%$ bis $\leq 30\%$), doch mit abnehmender Bebauungsdichte nimmt auch der Durchgrünungsanteil in den umliegenden Wohngebieten zu. In die Randgebiete der Stadtteile INNENSTADT, WOLSDORF, STALLBERG, NORDSTADT, BRÜCKBERG und ZANGE mischen sich somit zunehmend Flurstücke mit einem Vegetationsanteil von $\leq 50\%$ bis $\leq 70\%$. Der überwiegende Teil der Siedlungsflächen beläuft sich auf Vegetationsdichten um die $\leq 40\%$. Die innerstädtischen Parks und Freiflächen charakterisieren sich fast ausschließlich durch eine sehr hohe Flächendurchgrünungsrate ($\leq 80\%$ bis $\leq 100\%$); nur wenige bebaute Flurstücke sind in einem annähernd hohen Maße durchgrünt.

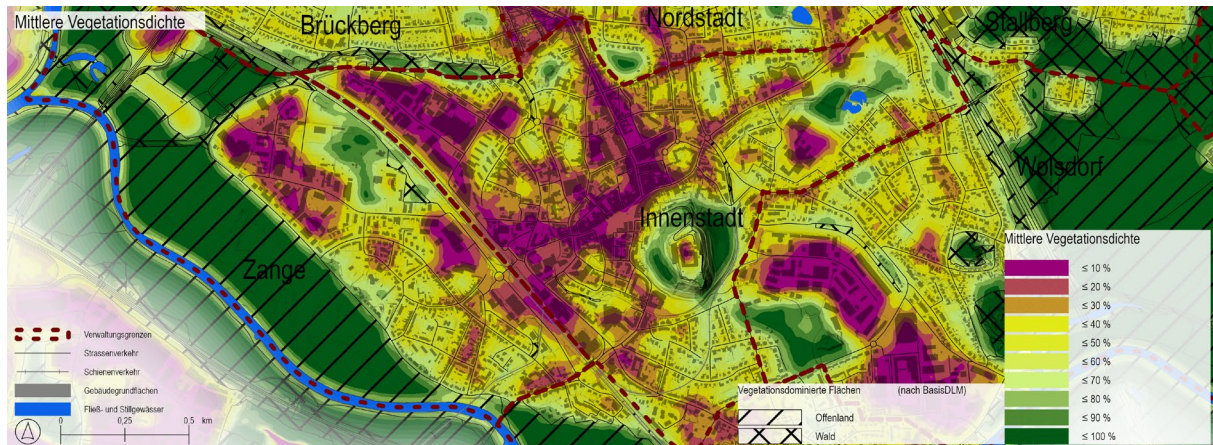


Abbildung 36: Themenkarte Vegetationserfassung – Mittlere Vegetationsdichte, Innenstadtbereich

Der Detailansicht (siehe Abbildung 36) zeigt die INNENSTADT und deren unmittelbare Umgebung. Der Bildausschnitt charakterisiert sich durch eine hohe Bebauungsdichte, schmale Flurstücke und einen überwiegend geringen Vegetationsbestand. Auf den Grundstücken entlang der KAISERSTRASSE, MARKT und BAHNHOFSTRASSE ist das Vegetationsdefizit besonders stark ausgeprägt ($\leq 10\%$ bis $\leq 30\%$). Ähnlich geprägt sind GARTENSTRASSE und AGGERSTRASSE in der NORDSTADT. Im Norden der Innenstadt verläuft ein Grüngürtel bestehend aus dem ALTEN FRIEDHOF IN DER JOHANNESSTRASSE, dem JÜDISCHEN FRIEDHOF und den Grünflächen zwischen BRÜCKBERG und INNENSTADT, der lediglich durch die Bebauung entlang der KAISERSTRASSE und AUGUSTASTRASSE unterbrochen wird und sich auch ein Stück an den Bahntrassen und Umspannwerk in Richtung Süden weiterzieht. Auch der MICHAELSBERG und die Grünfläche nördlich der WILHELM-OSTWALD-STRASSE in WOLSDORF bilden eine Grünachse. Es treten auch weitere stärker durchgrünte Flächen über das Siedlungsgebiet verteilt auf. Die Vegetationsdichten belaufen sich hier auf $\leq 70\%$ bis $\leq 100\%$. Auch die um die Grünflächen herumgelegenen Quartiere sind hinsichtlich ihres Flächendurchgrünungsgrades durchmisch, generell jedoch von höheren Prozentwerten gekennzeichnet als die Kernstadt.

Vegetationshöhen

Der unbebaute Außenraum von SIEGBURG (siehe Abbildung 37) kann in Waldstrukturen, Offenland und städtische Grünflächen unterteilt werden. Das Untersuchungsgebiet charakterisiert sich im städtischen Außenraum SIEGBURGS durch landwirtschaftlich geprägte Flächen, welche meist direkt an das Siedlungsgebiet anschließen und vorwiegend im Süden und Osten des Stadtgebietes zu finden sind (vorwiegend $\leq 2,5$ m bis ≤ 5 m). Insbesondere im Norden wird der Außenraum primär durch Wälder dominiert (vorwiegend ≤ 15 m bis ≤ 40 m). Neben den Wald- und landwirtschaftlich genutzten Flächen im Außenraum sind die privaten und öffentlichen Flächen innerhalb des Siedlungsraums von Vegetation durchzogen.

Im Siedlungsbereich, der sich primär durch eine gemischte Flächennutzung auszeichnet, ist auch die Flächendurchgrünung unterschiedlich stark ausgeprägt. Der Großteil des bebauten Siedlungsraumes beläuft sich auf Vegetationshöhen um $\leq 2,5$ m. Diese innerstädtischen Offenlandflächen kühlen durch nächtliche Wärmeabstrahlung besonders stark ab und tragen somit zur Kaltluftproduktion in der Stadt bei.



Abbildung 37: Themenkarte Vegetationserfassung – Vegetationshöhen. Die Vegetationshöhen werden zusätzlich zur Aufnahme der Vegetationsstrukturen über das Digitale Oberflächenmodell abgeleitet und flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedlichen Höhen wieder, bis 2,5 m in blassgrün und bis 40 m in braun. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

In den meisten Stadtteilen sind Alleen vorhanden, also Straßen, die von Vegetation zwischen ≤ 15 m und ≤ 40 m gesäumt sind. Dazu gehört die TALSPERRENSTRAßE und AUF DEM KELLERSBERG in SELIGENTHAL, die beide in einem Wald außerhalb des Siedlungsbereich münden. In BRASCHÖF wird AUF D. HELTEN von Bäumen gesäumt. Mehrere innerstädtische Flächen in KALDAUEN sind geprägt durch Vegetationshöhen bis ≤ 40 m. Dazu gehört der PLATANENWEG und Flächen südlich der LENDERSBERGSTRASSE, u. a. um die KINDERTAGESEINRICHTUNG ABENTEUERLAND. Bäume erhöhen die Luftfeuchtigkeit durch Transpiration, was zur Abkühlung beiträgt und bieten zusätzlich Schatten und Erholungsraum besonders für hitzevulnerable Menschen wie kleine Kinder und ältere Menschen. Auch die GRUNDSCHULE STALLBERG ist zum einen von Vegetation ≤ 30 m und zum anderen durch Offenlandflächen umgeben. Ansonsten ist der

Stadtteil in beinahe allen Richtungen von Waldflächen umschlossen. In Deichhaus ist besonders der Bereich nördlich AN DEN 6 BÄUMCHEN bzw. MARTIN-OPIZ-STRASSE durch eine Vegetation ≤ 15 m bewachsen. Sehr wenig begrünt ist der Südwesten der Nordstadt um die GARTEN-STRASSE und AGGERSTRASSE. Der ALTE FRIEDHOF IN DER JOHANNESSTRASSE und die Siedlung östlich der RILKESTRASSE zeichnen sich zum einen durch Freiflächen $\leq 2,5$ m und zum anderen durch höhere Vegetation ≤ 30 m aus. Die Sportplätze entlang der Jahnstraße sind ebenso durch niedrige und hohe Vegetation geprägt (vorwiegend $\leq 2,5$ m und ≤ 20 m).

Die Detailansicht Bereich Innenstadt (siehe Abbildung 38) zeigt vorwiegend die Siedlungen der Stadtteile INNENSTADT, ZANGE und WOLSDORF. In WOLSDORF stechen die beiden WOLSDORFER heraus, die beide dicht bewaldet sind. Auch die WILHELM-OSTWALD-STRASSE in Verlängerung der DAMMSTRASSE ist von hoher Vegetation gesäumt. ZANGE zeichnet sich tendenziell durch niedrigere Vegetation ≤ 5 m aus – insbesondere um das Umspannwerk im Norden. Dieses ist also eine Quelle nächtlicher Kaltluft, welches potenziell die angrenzenden wenig durchgrünten Gewerbegebiete versorgen kann. Die INNENSTADT ist in Wohngebieten wie südlich der SIEGFELDSTRASSE ähnlich geprägt wie andere Wohngebiete im SIEGBURGER Stadtgebiet. Der MICHAELSBERG weist Vegetation bis ≤ 30 m auf. Es sind hier mehr niedrig bewachsene Flächen und weniger sehr hohe Pflanzen vorzufinden, als entlang der WOLSDORFER. Das Gewerbegebiet im Nordwesten sowie die dichte Bebauung insbesondere um die KAISERSTRASSE, BAHNHOFSTRASSE und MARKT ist kaum mit Vegetation versorgt. Hier befinden sich jedoch nicht nur das HELIOS KLINIKUM SIEGBURG, sondern auch andere Gesundheitsinfrastrukturen wie Arztpraxen und Apotheken. Der Jüdische Friedhof sowie die Freiflächen um die Bildungs- und Sporteinrichtungen östlich der ZEITHSTRASSE zeichnen sich hingegen durch weite Bereiche mit Vegetation ≤ 5 m aus sowie Räume mit Bäumen bis zu ≤ 40 m.



Abbildung 38: Themenkarte Vegetationserfassung – Vegetationshöhen, Innenstadtbereich

5.5 Klimatische Analysen

5.5.1 Kaltluftentstehung und -transport

Die Simulation der nächtlichen Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransportes (bodennahes nächtliches Windfeld) geschieht mithilfe des numerischen Kaltluftsimulationsprogramms „Klam_21“ des Deutschen Wetterdienstes (Version 2.012) (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Berechnung basiert auf der Landnutzung, der Bebauungsstruktur sowie der Topographie, Lärmschutzwände oder -wälle wurden ebenfalls in die Simulation integriert. Ausgegangen wird von einer austauscharmen sommerlichen Strahlungsnacht (ohne regionale Anströmung), mit einem Simulationsbeginn nach Sonnenuntergang und einer Simulationsdauer von acht Stunden. Insgesamt werden 10 Zeitschnitte angefertigt, um die voranschreitende Dynamik der Kaltluftentstehung und des Kaltlufttransportes abzubilden.

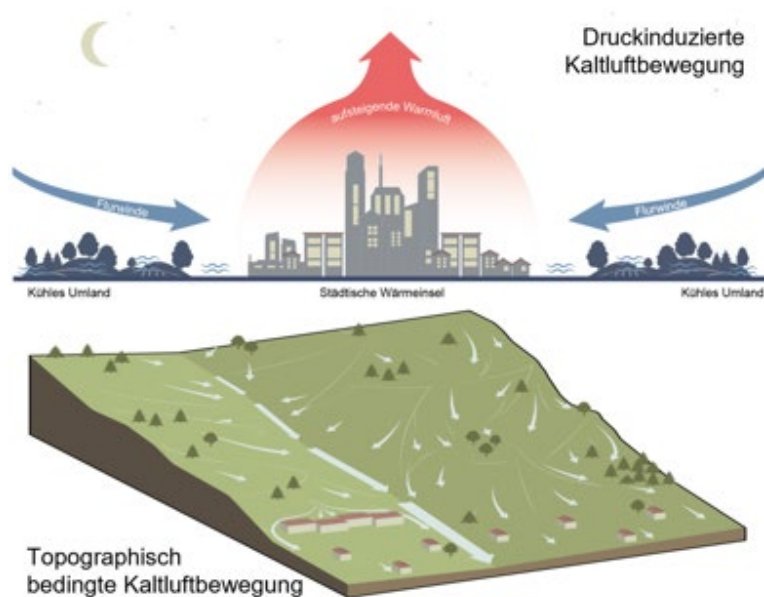


Abbildung 39: Schematische Darstellung der zwei Bewegungsarten von Kaltluft, die druckinduzierte (oben) und die topographisch bedingte Kaltluftbewegung (unten).

Kaltluft bildet sich ausschließlich in den Nachtstunden, vorzugsweise während Strahlungsnächten (wolkenlos), über unversiegelten Offenlandflächen (i.d.R. im Außenbereich) ohne bzw. mit niedriger Vegetation. Der Kaltlufttransport folgt entweder der vorherrschenden Topographie oder dem sensiblen, druckinduzierten lokalen Flurwindssystem (siehe Abbildung 39). Innerstädtische Frei- und Grünflächen fördern die lokale Kaltluftproduktion und können, je nach Lage und Ausrichtung, das Eindringen des Kaltluftabflusses in den Siedlungsraum unterstützen. Der in seiner Intensität variierende Kaltlufttransport (m/s) wird über Vektoren und die Kaltluftschichten, abhängig von ihrer Höhe bzw. Dicke (m), mittels verschiedenfarbiger Flächen dargestellt. Die Darstellung der Windfeldvektoren erfolgt erst ab einer Windgeschwindigkeit von mehr als 0,05 m/s.

Zusätzlich wird der Kaltluftvolumenstrom ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$) berechnet, der aber der Übersichtlichkeit halber in separaten Themenkarten, sowie in der Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 6.1) dargestellt wird. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt das Ausmaß der Kaltluftzufuhr, das heißt, wie viel Kaltluft in einer bestimmten Zeiteinheit durch ein Gebiet strömt. Eine Darstellung des Strömungsfeldes erfolgt erst ab einem Volumen von mehr als $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nachfolgend werden exemplarisch nur Auszüge von vier Zeitschnitten (30 min., 2 Std., 4 Std. und 6 Std.) dargestellt, welche aber die Dynamik der Kaltluftentstehung und des -transportes (unterschiedliche Zeitpunkte wann Gebiete überströmt werden) über die gesamte Nacht hinweg verdeutlichen. Für die Simulation des Kaltluftvolumenstroms werden nur die Stunden 4 und 6 dargestellt. Alle Zeitschnitte liegen als Einzelkarten und im Anhang vor.

nach 30 Minuten Simulation

30 Minuten nach Sonnenuntergang (siehe Abbildung 40) hat sich innerhalb des Untersuchungsraums eine Kaltluftschichtdicke von 0 m – 10 m im Osten und 5 m – 15 m in Richtung Süden angesammelt. Die bebauten Räume sind zu diesem Zeitpunkt nur ansatzweise überströmt; sowohl in den urbaner geprägten Stadtteilen wie INNENSTADT und NORDSTADT (siehe Abbildung 41) als auch in den dörflicher geprägten Stadtteilen wie BRASCHOß und SELIGENTHAL hat sich insbesondere in den zentral gelegenen Räumen der Stadt meist noch keine Kaltluftschicht gebildet. Lediglich an den Siedlungsrändern ist zu erkennen, dass die Kaltluft beginnt zwischen der Bebauung in den Raum einzudringen. Am eindrucklichsten ist dies an der westlichen Siedlungsgrenze von KALDAUEN zu beobachten. Auch ist bereits erkennbar, dass die innerstädtischen Frei- und Grünflächen maßgeblich zur Kaltluftproduktion beitragen. Beispielsweise tragen in der INNENSTADT der ALTE FRIEDHOF IN DER JOHANNESSTRAßE und die Hänge des MICHAELSBERG bereits 30 Minuten nach Sonnenuntergang zur Kaltluftproduktion bei. Die höchsten Kaltluftschichtdicken mit bis zu 24,5 m sind zu diesem Zeitpunkt an den Hängen der hügeligen Landschaft im Osten des Stadtgebietes auszumachen.

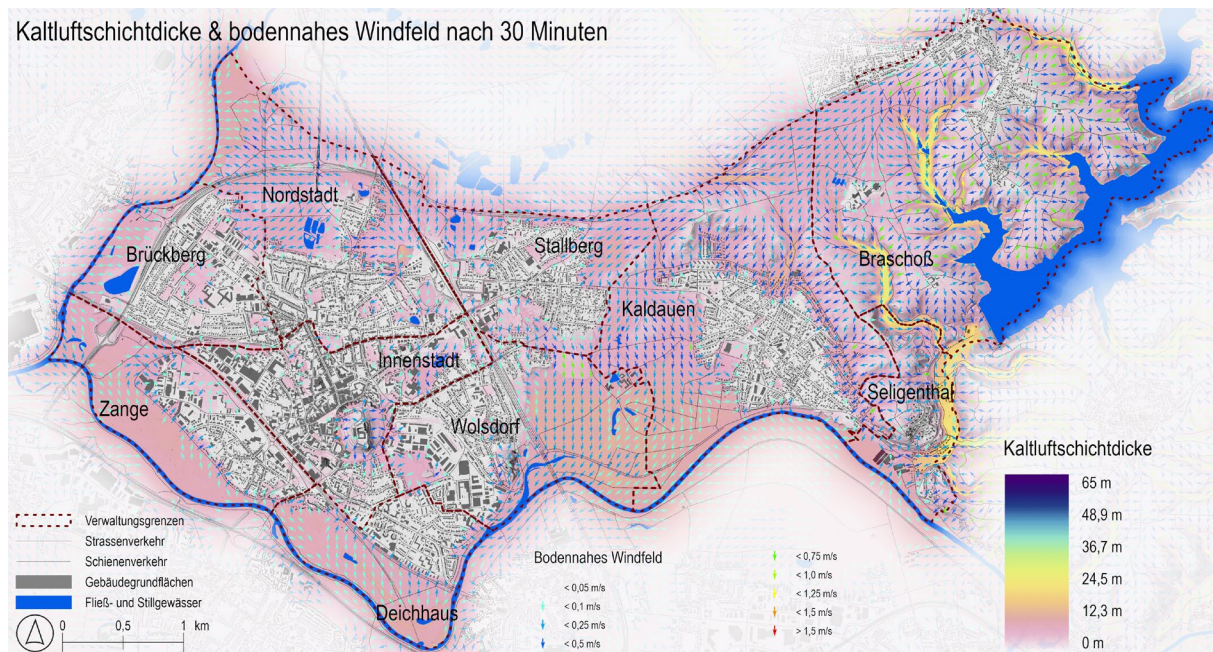


Abbildung 40: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 30 min Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolet (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von 0,05 m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Das bodennahe Windfeld ist im westlichen und südlichen Teil des Untersuchungsraums schwach ausgeprägt (< 0,05 m/s - < 0,25 m/s). Es zeigen sich hauptsächlich zwei dominante Windströmungen. Osten her wird der Wind mit bis zu 0,5 m/s in Richtung des westlich gelegenen Teils getragen. Auch in Richtung Wahnbachtalsperre im Osten fließt ein bedeutender Anteil der Windmassen. Diese starken Winde bewegen sich mit bis zu 1,25 m/s. Die zentral gelegenen Stadtteile INNENSTADT, ZANGE, BRÜCKBERG, NORDSTADT, STALLBERG, WOLSDORF und DEICHHAUS werden eher umflossen als überströmt. Über BRASCHOß finden starke Bewegungen (bis < 1 m/s) statt, wobei die Luft oftmals verwirbelt bzw. umgelenkt wird.

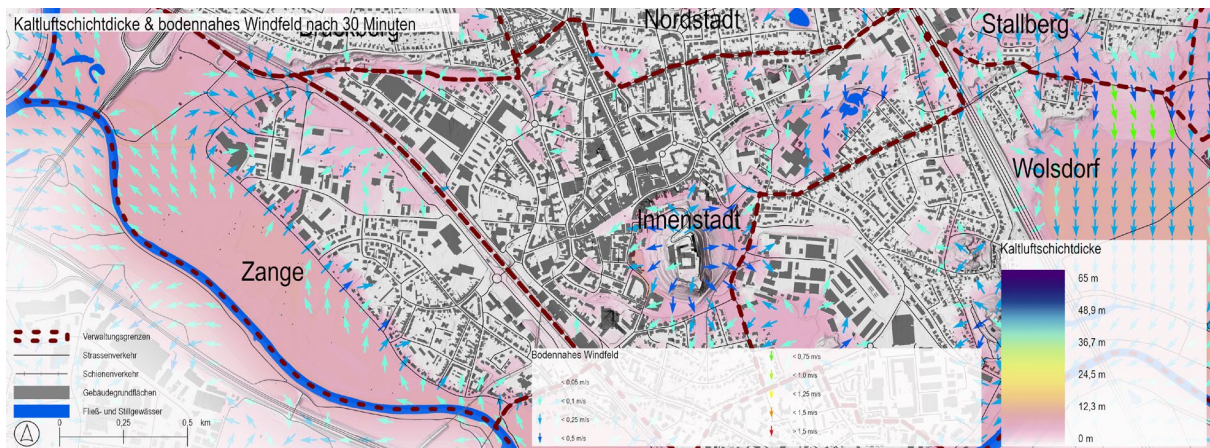


Abbildung 41: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 30 min Simulation, Innenstadtbereich

nach 2 Stunden Simulation

Nach 2 Stunden (siehe Abbildung 42) nimmt die Kaltluftschichtdicke von den Siedlungsändern bis ins Umland stetig zu. Sie hat sich im gesamten unbebauten Außenraum auf ca. 12 m bis 24,5 m erhöht. Nach wie vor ist die Kaltluftschichtdicke im Osten (bis auf die Hänge) weniger stark ausgeprägt als im Westen. Die Kaltluftschichtdicke nimmt in Richtung Nordwesten und Süd(westen) schrittweise zu, weswegen sich keine harten Grenzen zwischen der östlichen und westlichen Kaltluftschichtdicke ergeben. Weite Teile der Siedlungsflächen sind zumindest teilweise überströmt. Bis auf SELIGENTHAL ist allerdings kein Stadtteil vollständig überströmt. Die Kaltluft hat die Zentren der meisten Stadtteile noch nicht erreicht (0 m) (siehe Abbildung 43). Die Siedlungsränder sind jedoch mit einer Kaltluftschichtdicke von 5 m bis 15 m versorgt. Die Kaltluftschichtdicke an den Hängen im Osten des Stadtgebietes sind inzwischen auf knapp 37 m angewachsen.

Die zentralen Anströmrichtungen (Westen und Verwirbelung im Osten) verfestigen sich. Aus Richtung Osten wird mit meist $< 0,5$ m/s (ggf. Frisch-) und Kaltluft nach Westen getragen. Zwischen KALDAUEN und STALLBERG wird ein Teil dieser Winde auch in südliche Richtung abgeleitet. Über BRASCHÖß findet weiterhin eine Verwirbelung statt, wobei ein großer Teil der Winde weiterhin mit bis zu $1,25$ m/s in Richtung Wahnachtalsperre geleitet wird. Auch die Winde über den dichter bebauten Stadtteilen um die INNENSTADT (siehe Detailansicht Innenstadt unten in der Karte) stabilisieren sich mit $< 0,5$ m/s.

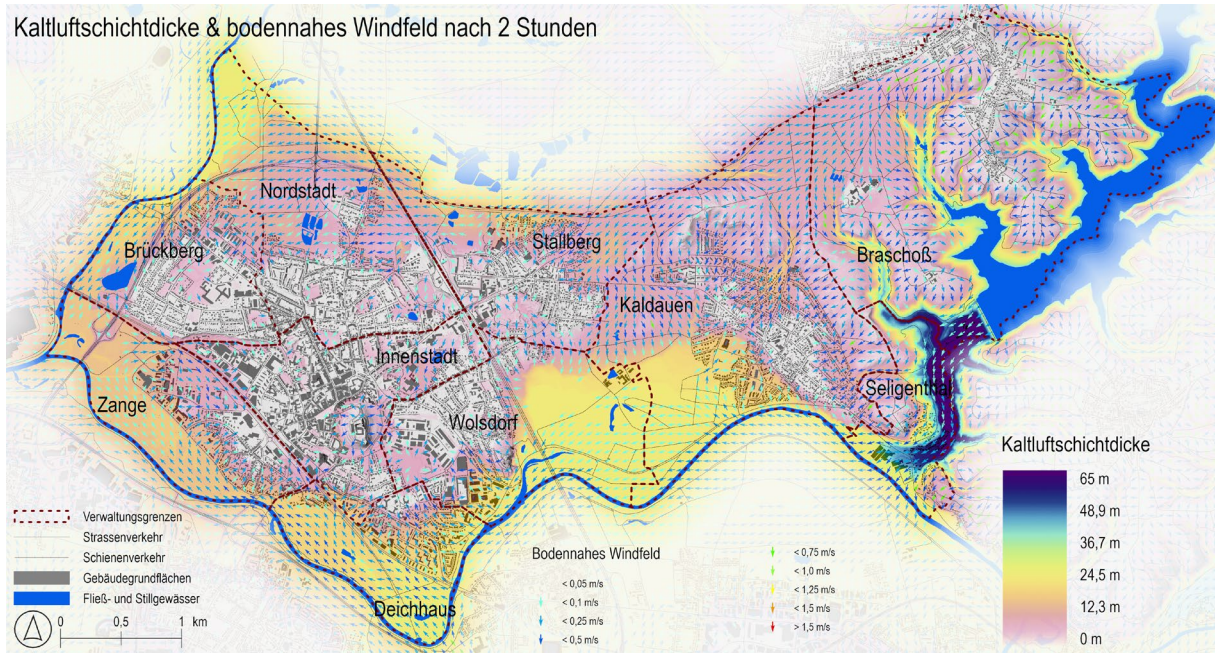


Abbildung 42: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 2 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolett (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05$ m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

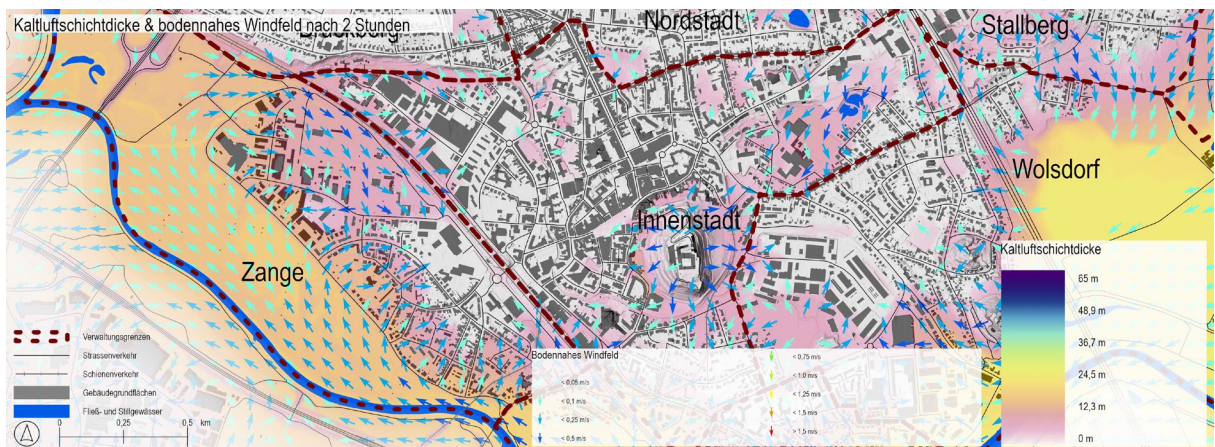


Abbildung 43: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 2 Std. Simulation, Innenstadtbereich

nach 4 Stunden Simulation

Nach 4 Stunden sind die Stadtteile SELIGENTHAL, KALDAUEN, ZANGE, WOLSDORF (bis auf zwei topografische Erhebungen) und DEICHAUS vollständig überströmt. Die Kaltluftschichtdicken betragen hier zwischen 10 m und 40 m, im östlichen Teil SELIGENTHALS sogar bis 65 m (siehe Abbildung 44). In den Zentren der bebauten Räume dieser Stadtteile unterscheidet sich die Kaltluftschichtdicke nicht maßgeblich von ihrem Umfeld. Etwas anders sieht es in den

Stadtteilen BRASCHOß, STALLBERG, NORDSTADT, BRÜCKBERG und INNENSTADT aus. Hier hat die Kaltluft insbesondere die zentralen, dicht bebauten Bereiche kaum erreicht. Ihre Schichtdicke beläuft sich überwiegend auf 0 m – 30 m. Die Hänge um die WAHNBACHTALSPERRE, ein Bereich des Freiraums im Nordwesten sowie im Süden zeigen die höchsten Kaltluftschichtdicken an (bis 65 m).

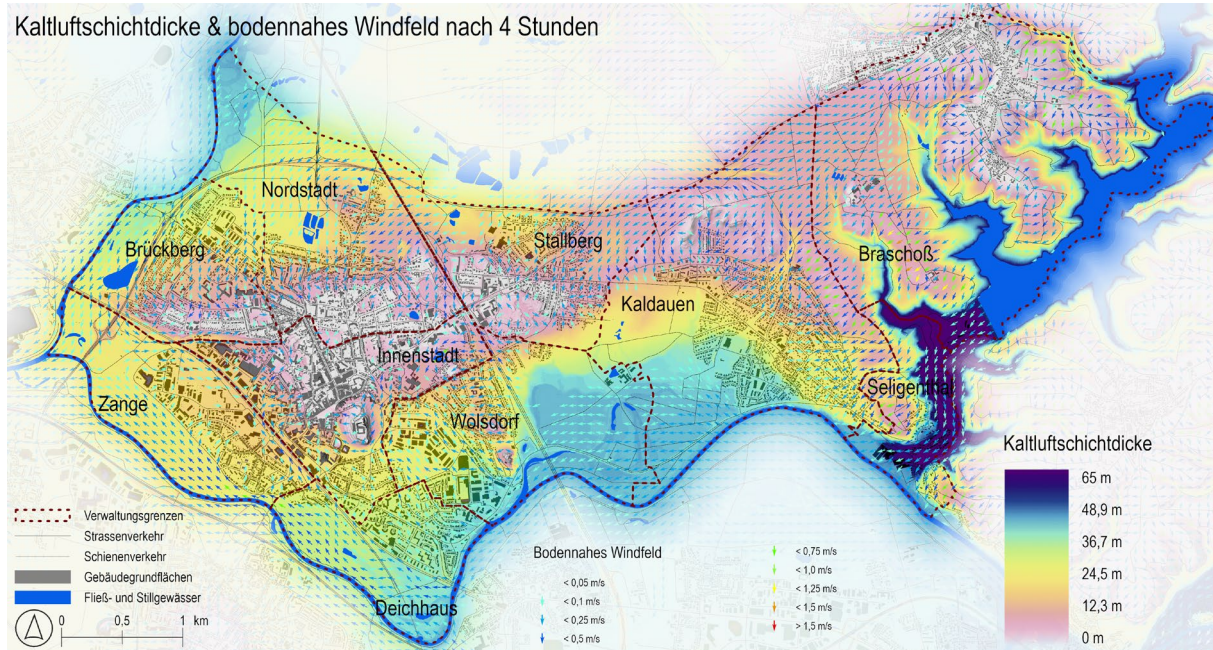


Abbildung 44: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 4 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolett (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von 0,05 m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

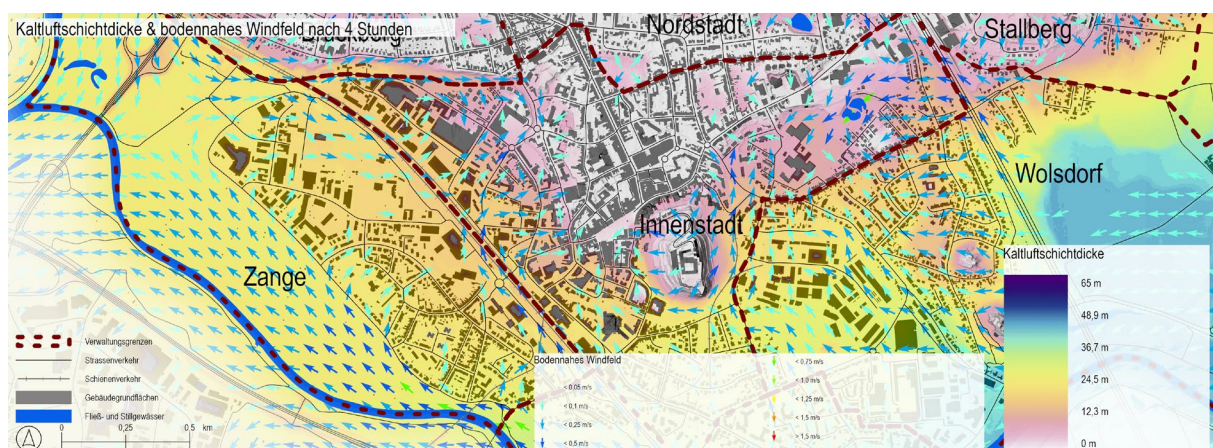


Abbildung 45: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 4 Std. Simulation, Innenstadtbereich

Die Windgeschwindigkeiten stabilisieren sich weiter und nehmen stellenweise sogar etwas ab. Sie überschreiten selten 0,5 m/s. Im Nordwesten und Südwesten verläuft die Windströmung nach wie vor in Richtung Westen, wobei sie an den Grenzen des dortigen bebauten Raums an Geschwindigkeit verliert. Die Winde, die zwischen KALDAUEN und STALLBERG bzw.

WOLSDORF in Richtung Süden verlaufen sind, haben sich aufgelöst. Die Verwirbelungen über BRASCHOß und der WAHNBACHTALSPERRE (Richtung Süden) haben sich größtenteils stabilisiert. Es treten jedoch punktuell Geschwindigkeiten bis zu $< 1,5 \text{ m/s}$ auf. Die Siedlungsflächen werden nun großflächig überströmt.

Nach 4 Stunden werden große Teile der außen gelegenen Siedlungsbereiche von Kaltluftvolumenströmen mit $\pm 5 \text{ m}^3/\text{s}$ überströmt (siehe Abbildung 46). Im Osten, insbesondere über den topografischen Erhöhungen sowie in Zentrum des Siedlungsgebietes (nördliche INNENSTADT und südliche NORDSTADT sowie südöstlicher BÜCKBERG) sind kein Kaltluftvolumenstrom auszumachen. Über den Freiflächen haben sich nach 4 Stunden drei große Kaltluftvolumenströme gebildet. Der Kaltluftvolumenstrom über der WAHNBACHTALSPERRE beträgt $\geq 50 \text{ m}^3/\text{s}$ und sein Strömungsfeld $> 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Er ist der Stärkste, wenn auch nicht der Breiteste. Er läuft in den zweiten, breitesten Kaltluftvolumenstrom über, der sich über die SIEG und angrenzende Freiflächen zieht. Diese beiden Kaltluftvolumenströme fließen in Richtung Westen. Ein weiterer Kaltluftvolumenstrom verläuft nordwestlich (außerhalb) des SIEGBURGER Stadtgebietes, wobei nur entlang der B56 in BRÜCKBERG ein leichter Abzweig dieses Kaltluftvolumenstroms verläuft ($\leq 25 \text{ m}^3/\text{s}$). In der Detailansicht Bereich INNENSTADT (siehe Abbildung 47) sind nur leichte Kaltluftvolumenströme auszumachen. Lediglich entlang der Bahntrassen zwischen INNENSTADT und ZANGE in Richtung Nordwesten und zwischen den östlichen Siedlungsstrukturen von DEICHHAUS und WOLSDORF sind beginnende Kaltluftvolumenströme höherer Intensität vorhanden.

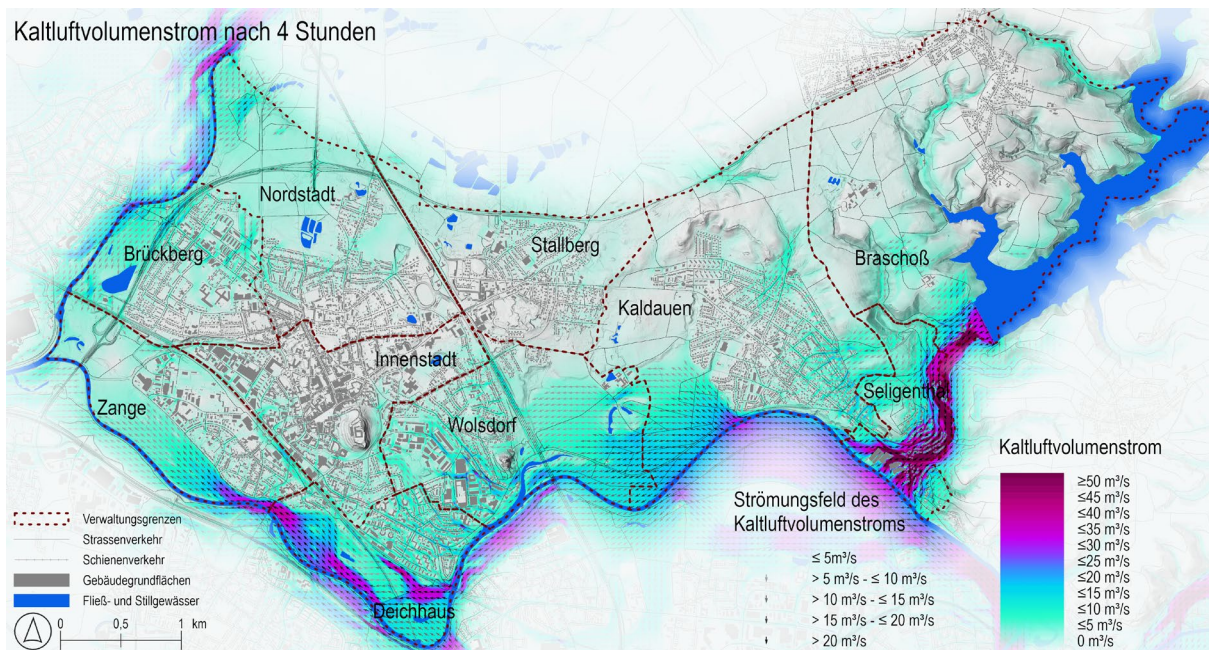


Abbildung 46: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 4 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt das Ausmaß der Kaltluftzufuhr, das heißt, wie viel Kaltluft in einer bestimmten Zeiteinheit durch ein Gebiet strömt. Eine Darstellung des Strömungsfeldes erfolgt erst ab einem Volumen von $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

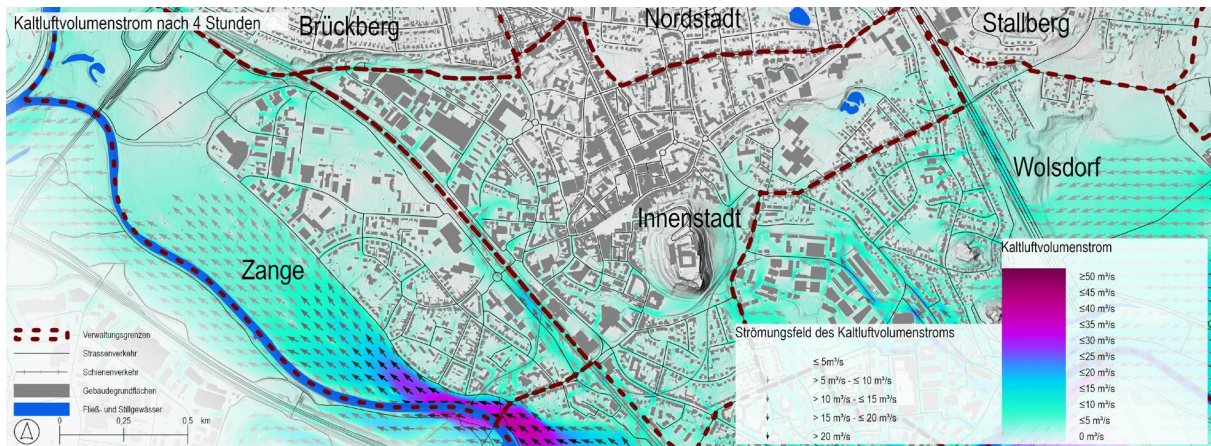


Abbildung 47: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 4 Std. Simulation, Innenstadtbereich

nach 6 Stunden Simulation

Die Simulation zur Kaltluftanalyse läuft insgesamt acht Stunden, wobei nach sechs Stunden nach Sonnenuntergang (siehe Abbildung 48) die finale Ausprägung hinsichtlich der Planungsrelevanz der Kaltluftschichtdicke in SIEGBURG erreicht ist. Der finale Zeitschnitt für die 8. Simulationsstunde liegt im Anhang vor.

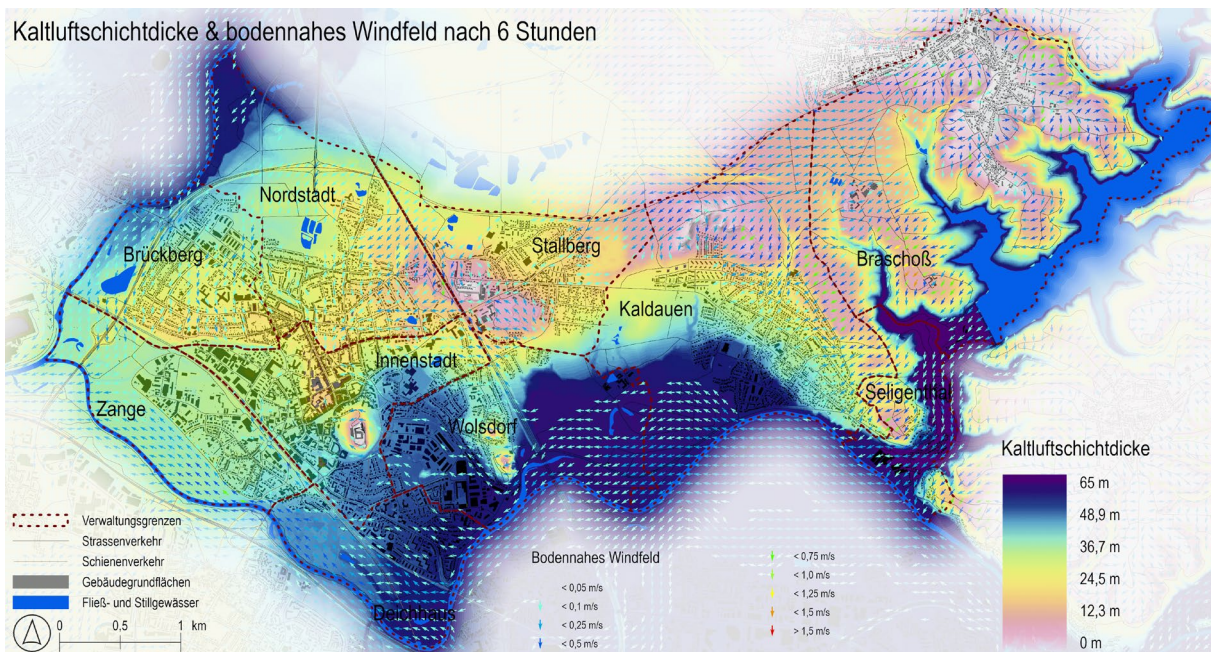


Abbildung 48: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 6 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolett ($> 65 \text{ m}$) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05 \text{ m/s}$. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Es ist eine Teilung des Raumes an mehreren Achsen erkennbar. Zunächst zieht sich Kaltluftstrom entlang der WAHNBACHTALSPERRE aus Nordosten in Richtung Südwesten (bis in den südlichen Teil von KALDAUEN, WOLSDORF und DEICHHAUS). Die Kaltluftschichtdicke beträgt hier bis zu 65 m. Im Nordwesten (insbesondere im Norden von NORDSTADT) werden ähnliche Schichtdicken erreicht. Weiterhin ist eine Zweiteilung des Raums in Ost und West ersichtlich. Die östlichen, insbesondere höher gelegenen Stadtteile profitieren nicht davon, dass ein großer Teil der Kaltluft in Richtung WAHNBACHTALSPERRE abfließt. So beträgt die Kaltluftschichtdicke über BRASCHOß 0 m – 10 m. Insgesamt beläuft sich die Kaltluftschichtdicke im östlichen Teil des Stadtgebietes, ausgenommen den Bereich um die Wahnbachtalsperre, auf 0 m – 24,5 m. In den westlichen Stadtteilen ist die Kaltluftschichtdicke mit rund 20 m – 40 m deutlich höher. Ausnahmen stellen mehrere topografische Erhebungen dar – beispielsweise der MICHAELSBERG in der INNENSTADT (siehe Abbildung 49). Hier beträgt die Kaltluftschichtdicke 0 m – 10 m. Die dicht bebauten westlichen Stadtteile sind nun mit Kaltluft überströmt.

Das bodennahe Windfeld weist fast ausnahmslos nur noch Windgeschwindigkeiten von $< 0,1$ m/s auf. Lediglich an den östlichen Hängen und Stadtteilen bzw. um die WAHNBACHTALSPERRE werden erhöhte Windgeschwindigkeiten verzeichnet (bis $< 1,5$ m/s). In den meisten Bereichen wird der Wind in Richtung Südwesten transportiert.

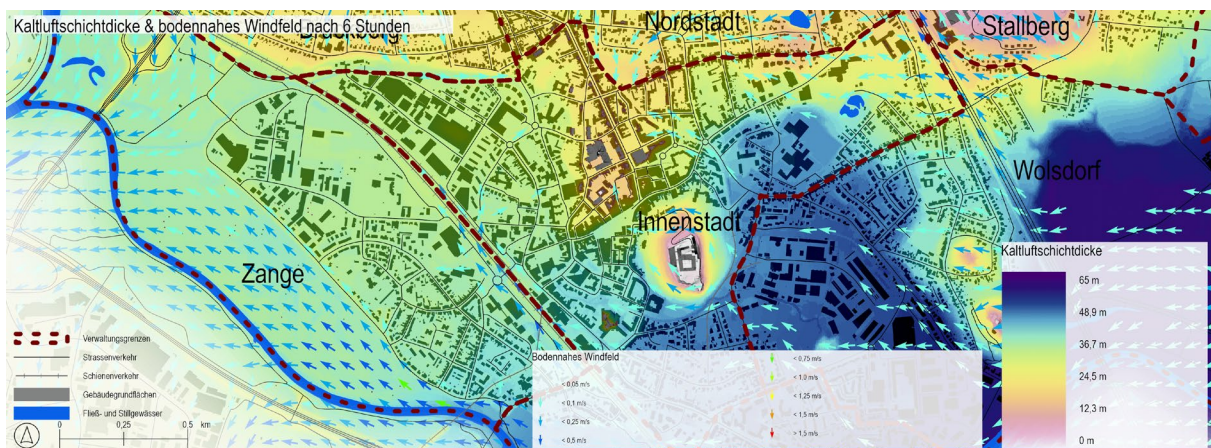


Abbildung 49: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 6 Std. Simulation, Innenstadtbereich

Die Ausdehnung der Kaltluftvolumenströme mit ≤ 15 m³/s ist weiter im gesamten Siedlungsgebiet fortgeschritten (siehe Abbildung 50). Über den Freiraum führen noch immer drei große Kaltluftvolumenströme. Der Kaltluftvolumenstrom über der WAHNBACHTALSPERRE beträgt noch immer ≥ 50 m³/s und sein Strömungsfeld > 20 m³/s. Der Kaltluftvolumenstrom über der Sieg, in den dieser überläuft, ist deutlich stärker geworden und sein Strömungsfeld erreicht ebenso bis zu > 15 m³/s - ≤ 20 m³/s. Die Geschwindigkeit dieses Kaltluftvolumenstroms ist stellenweise etwas langsamer (≤ 20 m³/s) und erreicht stellenweise Geschwindigkeiten wie über der WAHNBACHTALSPERRE. Der Kaltluftvolumenstrom nordwestlich des SIEGBURGER Stadtgebietes übertritt nun deutlicher die Stadtgrenze, wobei er von Norden nach Süden verläuft. In der Detailansicht Bereich INNENSTADT sind mehrere kleinere Kaltluftvolumenströme auszumachen. Der stärkste verläuft mit bis zu ≥ 50 m³/s und einem Strömungsfeld > 20 m³/s entlang der Bahntrassen zwischen INNENSTADT und ZANGE in Richtung Nordwesten – parallel zum Kaltluftvolumenstrom, der über der SIEG zu verorten ist. Auch in die Siedlungsstrukturen von DEICHHAUS und WOLSDORF dringen Abzweigungen des über der SIEG verlaufenden

Kaltluftvolumenstroms mit bis zu $\leq 35 \text{ m}^3/\text{s}$ ein. Ähnlich, nur schwächer ($\leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$) ist der Kaltluftvolumenstrom, der in die BRÜCKBERGER Siedlungsgebiet eindringt, wobei parallel dazu über der B56 ein Kaltluftvolumenstrom bis $\leq 35 \text{ m}^3/\text{s}$ verläuft. Weitere kleinere Kaltluftvolumenströme sind über größeren Straßen in der INNENSTADT (siehe Abbildung 51) auszumachen (bspw. über NEUENHOF).

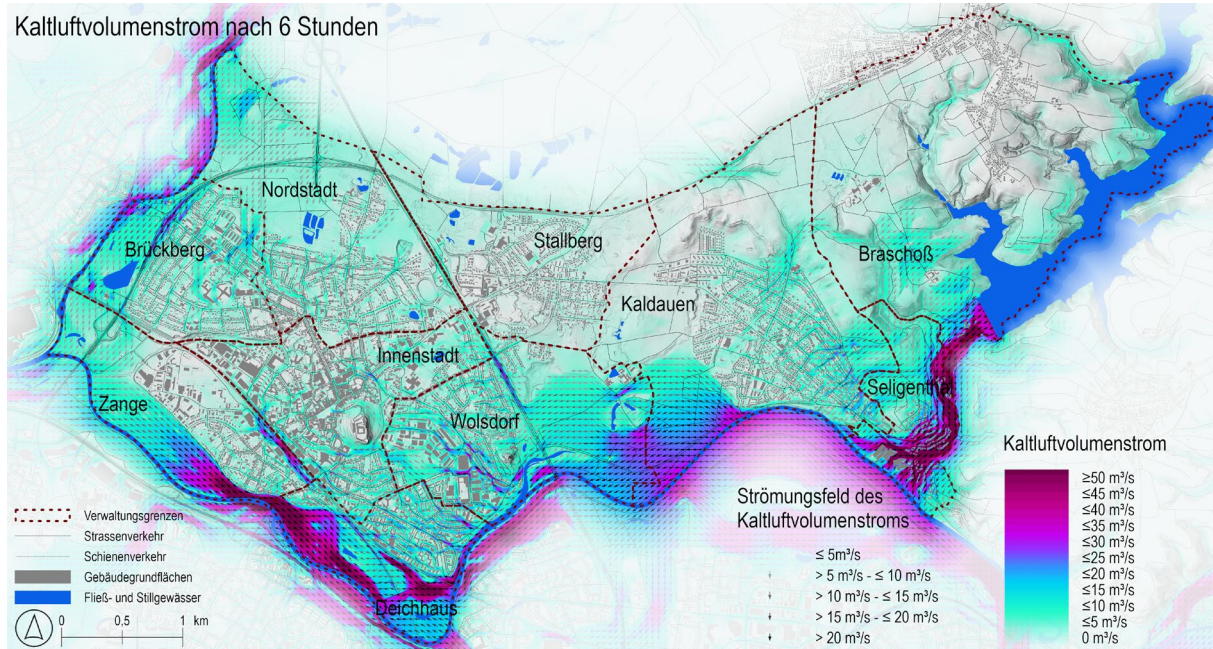


Abbildung 50: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 6 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt das Ausmaß der Kaltluftzufuhr, das heißt, wie viel Kaltluft in einer bestimmten Zeiteinheit durch ein Gebiet strömt. Eine Darstellung des Strömungsfeldes erfolgt erst ab einem Volumen von $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

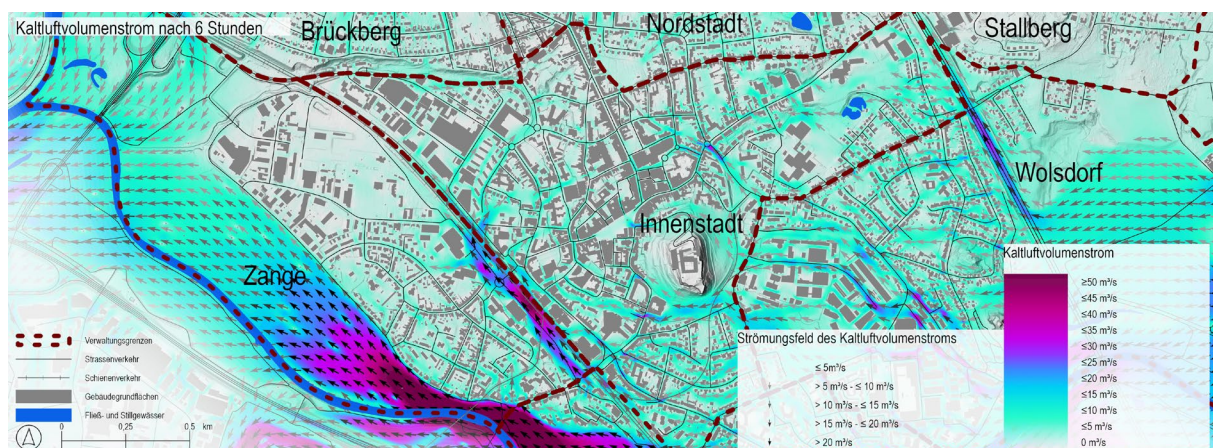


Abbildung 51: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 6 Std. Simulation, Innenstadtbereich

5.5.2 Nächtliche bodennahe Lufttemperatur (Städtische Wärmeinsel)

Die bodennahe nächtliche Lufttemperatur wird rechnerisch für 04:00 Uhr nachts (UTC), während eines „Heißen Tages“ ($LT_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) berechnet. Prinzipiell ist eine Simulation für jede beliebige Uhrzeit (tags oder nachts) möglich. I.d.R. stellt sich um 04:00 Uhr nachts (UTC) allerdings die stärkste Abkühlung im Offenland ein, wodurch der städtische Wärmeinseleffekt (siehe Abbildung

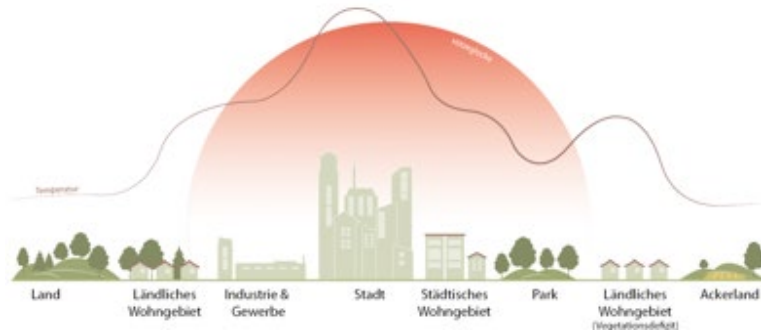


Abbildung 52: Schematische Darstellung des städtischen Wärmeinseleffekts, der u.a. aus höheren Lufttemperaturen im dichter bebauten Siedlungsraum entsteht.

52) in Bereichen des überwärmten Siedlungsraums zu diesem Zeitpunkt am deutlichsten hervortritt. Städtische Räume, für die bei der Simulation eine LT_{max} von über 20°C berechnet wird, liegen dann im Temperaturbereich einer Tropennacht (vgl. Kapitel 5.1.2).

Als Eingangsparameter für die anzunehmende Lufttemperatur im Außenbereich wird das Mittel der Tagesmaxima sowie der korrespondierenden Nachtminima für einen regionaltypischen „Heißen Tage“ des letzten 30 Jahre berechnet. Die langjährige Betrachtung sorgt für eine robuste Datenbasis, die sowohl kurzzeitige Wetterschwankungen als auch extreme Hitzewellen berücksichtigt. Als Referenz dient hierfür der historische Datenbestand des DWDs. Entsprechend lässt sich ein typischer „Heißer Tag“ in der Region, während dem letzten 30-jährigen Mittel, mit einem Maximum von $32,2^\circ\text{C}$ und einem Minimum der Lufttemperatur in der Nacht von $16,0^\circ\text{C}$ im Außenbereich charakterisieren.

Für die lokaltypische Durchlüftung wird eine austauscharme Wetterlage ohne regionale Überströmung angenommen, in der eine Schwachwindsituation in Form des bodennahen Flurwindes dominierend ist. Entsprechend wird als Eingangsparameter für das bodennahe nächtliche Windfeld auf die, in den Kaltluftsimulationen (vgl. Kapitel 5.5.1), berechneten Windgeschwindigkeiten zurückgegriffen.

Im unbebauten Raum im Umfeld der Stadt (siehe Abbildung 53) liegt die simulierte nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei $16,0^\circ\text{C}$. Der Übergangsbereich vom unbebauten Raum zu den Siedlungsrandbereichen weist höhere Temperaturen von $16,9^\circ\text{C}$ bis $18,6^\circ\text{C}$ auf. In den etwas abseits gelegenen Gemeindeteilen (insb. BRASCHOß, KALDAUEN und SELIGENTHAL) werden aufgrund der geringen Flächengröße des Siedlungsraums anteilig größere Bereiche des bebauten Raums von derartigen Lufttemperaturen eingenommen. In diesen Statteilen sind insbesondere die dichter bebauten Bereiche an den Hauptverkehrsachsen von Temperaturen bis $22,0^\circ\text{C}$ geprägt. In SELIGENTHAL trifft das auf das Industrie- und Gewerbegebiet an der Hauptstraße zu und in KALDAUEN insbesondere auf die Bebauung zwischen der KAPELLENSTRAßE und KREUZSTRAßE. Braschoß weist geringere Anteile von Temperaturen bis $22,0^\circ\text{C}$ auf und gleichzeitig auch geringere Anteile von bodennahen nächtlichen Temperaturen zwischen $16,9^\circ\text{C}$ und $18,6^\circ\text{C}$. Temperaturen bis $22,0^\circ\text{C}$ sind hier also etwas flächiger ausgeprägt. DEICHHAUS ähnelt bezogen auf die Ausprägung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur den östlich und ländlicher gelegenen Stadtteilen. Insbesondere der westliche etwas dichter bebaute Teil weist hier die höchsten Temperaturen auf.

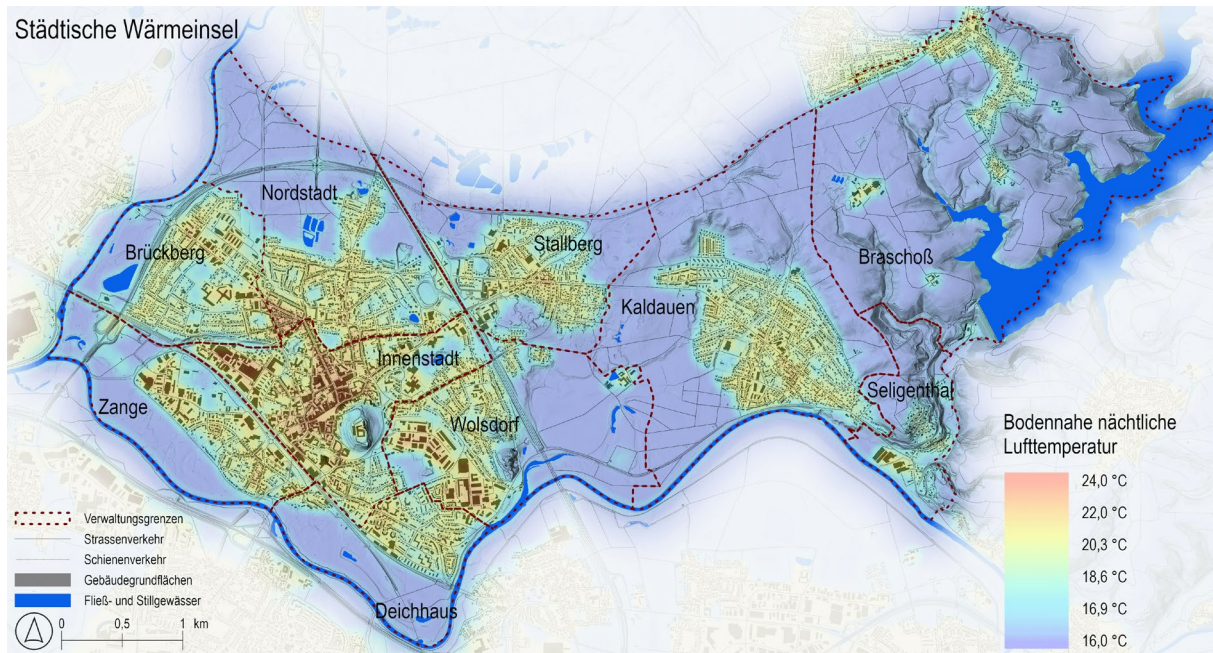


Abbildung 53: Themenkarte Nächtliche bodennahe Lufttemperatur – Städtische Wärmeinsel: berechnet für einen regionaltypischen Heißen Tag. Die Berechnung erfolgt für 04:00 Uhr nachts UTC (Zeitpunkt der größten Abkühlung), an einem Heißen Tag ($LT_{max} \geq 30\text{ °C}$) mit einem LT_{max} von $32,2\text{ °C}$ und LT_{min} von 16 °C (nachts) gemittelten für die letzten 30 Jahre. Die Berechnung erfolgt flächendeckend für den administrativen Raum von Siegburg. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

In den restlichen Stadtteilen sind Temperaturen bis $22,0\text{ °C}$ aufgrund der kompakteren Bebauung etwas flächiger ausgeprägt und in den meisten Siedlungen zumindest stellenweise vorzufinden, wobei die vorhandenen Freiflächen deutlich stärker abkühlen. Dazu gehören die Freifläche am WACHOLDERWEG in STALLBERG, der ALTE FRIEDHOF IN DER JOHANNESSTRAßE und die Sportanlagen um das WALTER-MUNDORF-STADION in der NORDSTADT, die Sportanlagen an der MOLTKESTRAßE und der ARNDTSTRAßE in BRÜCKBERG, die Freiflächen in ZANGE an der LINDENSTRAßE, auf denen sich das Umspannwerk befindet sowie der MICHAELSBERG und die Grünanlagen des FREIZEIT- UND GESUNDHEITSBADES OKTOPUS in der INNENSTADT (siehe Abbildung 54).



Abbildung 54: Themenkarte Nächtliche bodennahe Lufttemperatur – Städtische Wärmeinsel: berechnet für einen regionaltypischen Heißen Tag, Innenstadtbereich

6 Klimatischer Bestand und Szenarien

6.1 Klimaanalysekarte

Klimaanalysekarten werden laut VDI-Richtlinien als thematische Fachkarten definiert, die sich grundsätzlich von amtlichen Festlegungskarten unterscheiden. Als thematische Fachkarten (oder auch „Planungsgrundlagenkarten“) geben sie durch die flächenbezogene Visualisierung von Klimaeigenschaften und -phänomenen Aufschluss über alle klimatisch relevanten Belange eines Stadtgebietes. Mit den anhand dieser Informationsgrundlage abgeleiteten Planungs- und Handlungsempfehlungen nimmt die Klimaanalysekarte für Städte und Regionen eine zentrale Funktion für die praktische Raumanalyse und sachgerechte Durchführung von Planungsprozessen ein.

Die Darstellung und Berechnung der Klimaanalysekarten unterliegt aufgrund der Individualität der Untersuchungsräume keinem explizit durch den VDI festgelegtem Maßstab. Trotz einer grundsätzlich flexibleren Handhabung bei Inhalt, Kartengrafik und Kartenmaßstab, die aus dem vermehrten Einsatz von kartengestützten Planungsinformationssystemen (Geoinformationssysteme (GIS)) resultiert, ist bei der Erstellung von Klimaanalysekarten jedoch grundsätzlich *„[...] die Arbeit mit vergleichsweise großmaßstäbigen Darstellungen erforderlich“* [20]. In der Übersicht des VDI zu den *„Steuerungsinstrumente[n] für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende[n] Fachbeiträge[n]“* sind die Darstellung thermischer Belastungsräume (Überwärmungsräume) und der Luftleitbahnen sowie der Kaltluftentstehungsflächen dem Mesoklima und somit der Ebene der Regionalplanung (Raumordnungsplanung im Maßstab 1 : 50.000 – 1 : 100.000), Flächennutzungsplanung und der vorbereitenden Bauleitplanung (Bauleitplanung im Maßstab 1 : 5000 – 1 : 25.000) zugeordnet [20]. Über detaillierte, kleinräumige mikroklimatische Verhältnisse ($\leq 1 : 1000$) können in Klimaanalysekarten, deren Funktion in der Visualisierung thermischer Belastungsräume, Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsflächen liegt, demnach nur bedingt Aussagen getroffen werden.

In diesem Sinne werden in Klimaanalysekarten klimatische Verhältnisse wie die Temperaturverteilung in Kombination mit bewertenden Sachverhalten wie z. B. Durchlüftungsschneisen dargestellt, um einen Gesamtüberblick über alle relevanten Klimaelemente eines Stadtgebietes zu erhalten [20]. Hierfür werden in den Untersuchungsräumen sogenannte Klimatope ausgewiesen. Diese beschreiben *„[...] räumliche Bereiche mit vergleichbaren, einheitlichen, kleinräumigen, bodennahen lokalklimatischen Verhältnissen und definieren sich hauptsächlich über die jeweilige Nutzungsform (Siedlung, Freiraum, Wasser)“* [20]. Bei den für die Zuweisung der Klimatope relevanten Aspekten handelt es sich in erster Linie um:

- Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad,
- Oberflächenstruktur, Rauigkeit,
- Relief,
- Vegetationsart/-struktur,
- Lage im Stadtgebiet [20].

Sofern das Relief nicht stark variiere, sei bei ähnlichen oder gleichen Flächennutzungsstrukturen in der Regel auch von vergleichbaren mikroklimatischen Bedingungen auszugehen, so der VDI [20]. In Bezug auf die Klimatopabgrenzung wird zusätzlich darauf hingewiesen *„[...]“*

dass sich klimatische Prozesse nicht linienscharf an Bebauungs- und Nutzungs-grenzen anpassen, sondern fließende Übergänge zu benachbarten Flächen vorliegen.“ [20].

Je nach den lokalen Bedingungen werden verschiedene Klima- bzw. Klimatoptypen (Freiland-, Wald-, Misch- und Übergangs-, Vorstadt-, Stadt-, Innenstadtklima) nach ihren prägenden Charakteristiken voneinander abgegrenzt. Zu jedem dieser Klimatope werden vom VDI zudem eigene planungsrelevante Hinweise vorgegeben [20].

Freilandklima (Kaltluftentstehungsgebiete)

Freilandklimatope stellen sich überwiegend über unbewaldeten, vegetationsbestandenen / niedrig bewachsenen Außenbereichen ein. Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus und wirken als Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten (lufthygienisch relevante) Emittenten vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, können diese Bereiche eine hohe Ausgleichsfunktion für die human-biometeorologisch und lufthygienisch belasteten bebauten Bereiche besitzen.

Hinweise für die Planung

- Aufforstungs- und Siedlungsmöglichkeiten entsprechend den lokalklimatischen Verhältnissen, jedoch zudem Bedeutung der Flächen (hierzu dient die Planungshinweiskarte, sie klassifiziert die Ausgleichsräume und definiert potentiell notwendige klimatische Entwicklungsgutachten) für den großräumigen Luftaustausch beachten (z.B. in Stadtrandlage);
- Erhaltung des Kaltluftentstehungspotenzials.

Waldklima (Frischlufentstehungsgebiete)

Das Klima im Stammraum eines Walds wird durch den Energieumsatz der Erdoberfläche im Waldbestand (verminderte Ein- und Ausstrahlung) bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich oberhalb des Kronenraums. Deshalb sind Waldgebiete auf geneigten Flächen hoch relevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischluf und deren Dynamik. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und human-biometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluft- und Reinluftgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit keine Luftleitfunktionen übernehmen.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und ausbauen, soweit lokalklimatisch verträglich;
- Funktion bei benachbarten Gebieten mit höher belasteter Luft: Immissions-schutzwald (Luftgeneration)

Misch- und Übergangsklimate

Das Misch- und Übergangsklima beschreibt vegetationsgeprägte Gebiete von ausreichender Größe (ab 1 ha), um ein lokales klimatisches Ausgleichspotential zu generieren. Diese Flächen besitzen eine hohe klimaökologische Wertigkeit als Puffer- und Ausgleichsflächen in Nachbarschaft zu klimatisch belasteten Gebieten. Auf diesen Flächen findet eine ausreichende lokale Belüftung und Evapotranspiration statt, wodurch sie insbesondere in den Sommermonaten eine wichtige klimatisch regulierende Funktion übernehmen.

Hinweise für die Planung

- Erhalten und weitere Versiegelung vermeiden

Vorstadtklima

Das Vorstadtklima entsteht in verdichteten Gebieten mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen und moderatem nächtlichen Abkühlungspotential. Die Belüftung kann durch die Bebauung eingeschränkt sein.

Hinweise für die Planung

- weitere Versiegelung vermeiden;
- Arrondierung (Einbezug angrenzender Flächen) möglich

Stadtklima

Charakteristisch für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit überwiegend hohen Baukörpern und Straßenschluchten. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und den geringen Grünflächenanteil ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte deutlich überwärmt. Tagsüber treten hohe strahlungsbeeinflusste Lufttemperaturen auf, die zu Hitzestress führen. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen human-biometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen.

Hinweise für die Planung

- Entsiegelung und anschließend geeignete Begrünung, Wasserflächen etc.;
- Blockentkernung und -begrünung;
- Fassaden- und Dachbegrünungen anstreben;
- hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden;
- verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden;
- emissionsarme Energieversorgung anstreben

Innenstadtklima

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen und die starken Windfeldveränderungen, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Das Innenstadtklima ist human-biometeorologisch sehr ungünstig.

Hinweise für die Planung

- Entsiegelung;
- Blockentkernung und -begrünung;
- Fassaden- und Dachbegrünungen anstreben;
- hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden;
- verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden;
- Verkehrsberuhigung und emissionsarme Energieversorgung anstreben

Da die reine Klimatopausweisung für die Berücksichtigung aller lokaler Besonderheiten urbaner Untersuchungsräume unzureichend ist, wird die Klimaanalysekarte (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56) zusätzlich durch Informationen und Darstellungen zu weiteren klimatischen Grundparametern wie z. B. die Intensität des Kaltluftvolumenstroms mit zugehörigem Strömungsfeld ergänzt.

Der unbebaute Außenraum Siegburgs teilt sich in die Kategorien FREILANDKLIMA und WALDKLIMA. Der nördliche Außenbereich ist walddominiert und primärer Frischluftproduzent. Insbesondere der Süden Siegburgs und der Osten um BRASCHÖß und die WAHNBACHTALSPERRE sind offenlanddominiert und somit primäre Kaltluftproduzenten. Der Großteil der SIEGAUEN gehört ebenfalls dazu.

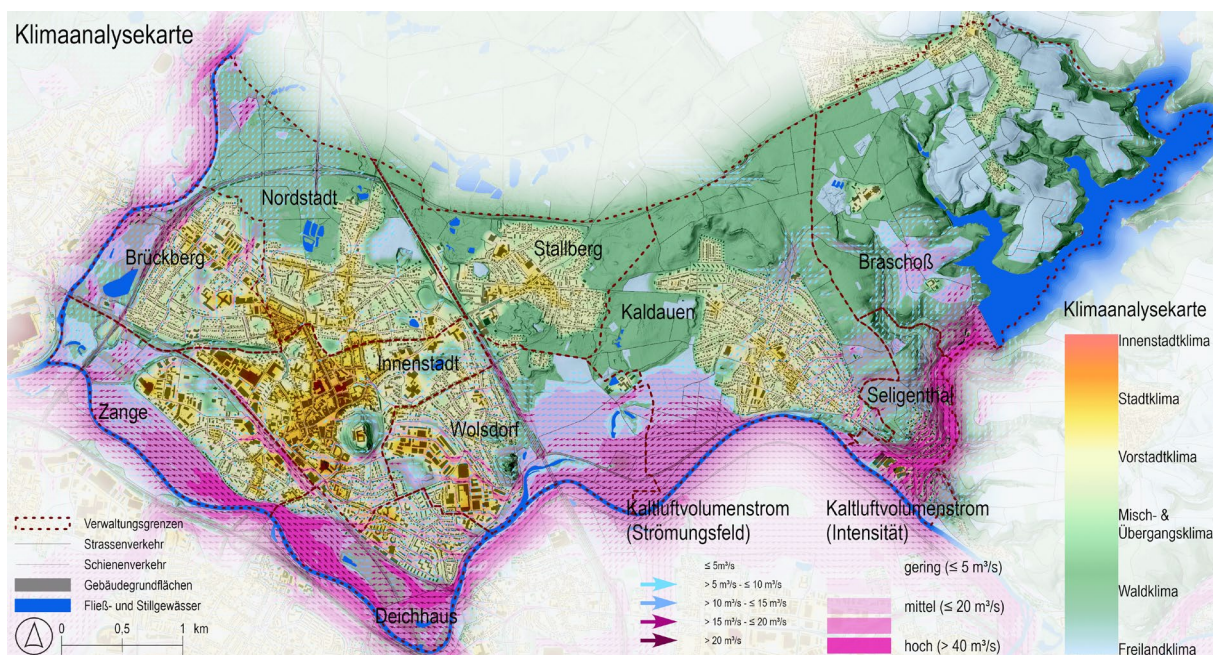


Abbildung 55: Klimaanalysekarte – Klimatopeinteilung mit kontinuierlichem Übergang nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Die Darstellung erfolgt flächendeckend für den administrativen Raum von Siegburg. Dargestellt werden sechs Klimatope sowie als Zusatzinformation die Intensität des Kaltluftvolumenstroms und sein Strömungsfeld. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Über den Freiraum führt insbesondere ein großer Kaltluftvolumenstrom. Er verläuft von Südosten nach Südwesten und folgt dabei der SIEG sowie den benachbarten Freiflächen. Eine Besonderheit ist SELIGENTHAL. Hier trifft ein weiterer Kaltluftvolumenstrom ausgehend aus Norden über der Wahnbachtalsperre auf die Kaltluft, die über der Sieg transportiert wird. Hier ist die Intensität des Kaltluftvolumenstroms hoch ($> 40 \text{ m}^3/\text{s}$) und das Strömungsfeld beträgt bis zu $> 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Ähnliche Werte werden noch südlich des Siedlungsbereiches von Deichhaus

und Zange erreicht. Die übrigen Freiflächen entlang der Sieg sind geprägt von Kaltluftvolumenströmen zwischen $\leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ und höher in Richtung Sieg bzw. niedriger in Richtung Norden. Die Intensität beläuft sich im Bereich der Auen auf $> 15 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $\leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ und weiter nördlich (insbesondere zwischen Braschoß und Kaldauen sowie zwischen Kaldauen und Wolsdorf) auf $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $\leq 15 \text{ m}^3/\text{s}$. Von dort aus dringt die Kaltluft auch in einzelne Siedlungsbereiche ein. Dazu gehört der Osten von Kaldauen, Wolsdorf, Deichhaus und Zange. Westlich von Brückberg verläuft ein weiterer, kleinerer Kaltluftvolumenstrom von höchstens $\leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ in Richtung Sieg – zum Teil ebenfalls über Brückberger Siedlungen. Die meisten verbleibenden Stadtteile sind von Kaltluftvolumenströmen mit $\leq 5 \text{ m}^3/\text{s}$ geprägt.

Im direkten Kontext des bebauten Raums entsteht auf den Grün- und Freiflächen das Klimatop MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMA. Dieses zeigt sich z. B. in größeren Zusammenschlüssen von Privatgrün, Kleingartenanlagen, Parks oder innerstädtischen Friedhofsflächen wie bspw. dem MICHAELSBERG und dem JÜDISCHEN FRIEDHOF in der INNENSTADT oder dem ALTEN FRIEDHOF IN DER JOHANNESSTRAßE in der NORDSTADT (siehe Abbildung 56).

In den dörflich geprägten Stadtteilen insbesondere im Osten nimmt die Klimatopkategorie MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMATOP größere Anteile der Siedlungsfläche ein, als dies in den Stadtteilen um die INNENSTADT der Fall ist. BRASCHOß z. B. besteht fast ausschließlich aus Flächen, die diesem Klimatop und dem VORSTADTKLIMA zugeordnet sind. Auch die Übergangsbereiche vom Offenland in Siedlungsbereiche dichter besiedelter Gebiete entsprechen überwiegend dem Klimatop MISCH- UND ÜBERGANGSKLIMA – bspw. die Stadtränder von NORDSTADT und STALLBERG.

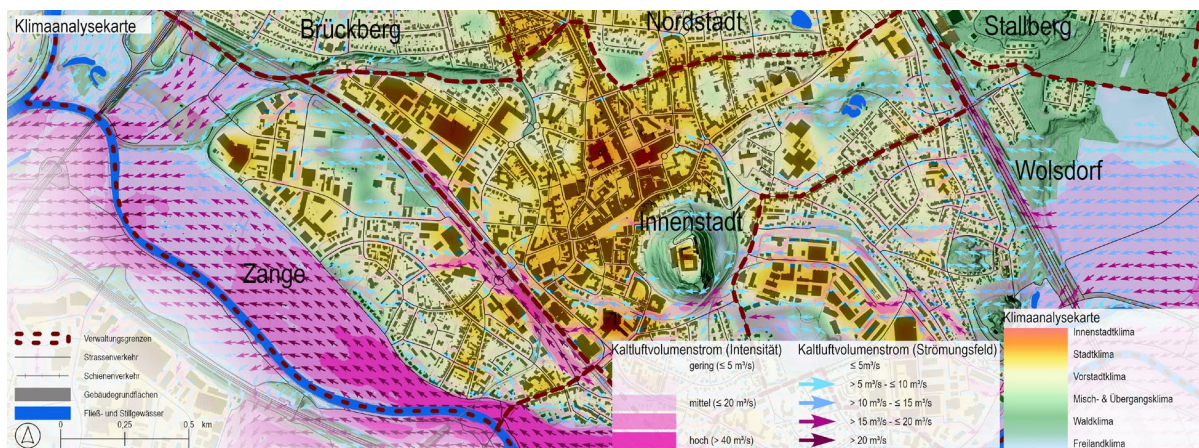


Abbildung 56: Klimaanalysekarte – Klimatopeinteilung mit kontinuierlichem Übergang nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, Innenstadtbereich

Das VORSTADTKLIMA prägt die meisten Wohngebiete mit lockerer Siedlungsbebauung aller Siedlungsbereiche.

Das Klimatop STADTKLIMA dagegen ist sowohl punktuell als auch gebietsspezifisch verbreitet. Es umfasst mitunter große Teile der örtlichen Industrie- und Gewerbegebiete in ZANGE, WOLS-DORF und der INNENSTADT. Auch innerstädtische Bereiche in unterschiedlichen Stadtteilen sind diesem Klimatop zuzuordnen. Dazu gehören u. a. ein Bereich an der HAUPTSTRAßE in KAL-DAUEN, an der KALDAUER STRAßE und AM GRAFENKREUZ in STALLBERG, an der AULGASSE und STEINBAHN in der NORDSTADT, die Bebauung nördlich der LUISENSTRAßE in BRÜCKBERG. Auch

Infrastruktur an der JAKOBSTRAßE in WOLSDORF gehört dazu (ein Kinderheim und sensible Einrichtungen für Menschen mit Handicap) sowie Bebauung nördlich und südlich der FRANKFURTER STRAßE in DEICHHAUS, Bebauung entlang der PETERSTRAßE und LUDWIGSTRAßE in ZANGE sowie ein Großteil der INNENSTADT (siehe Abbildung 56).

Das Klimatop INNENSTADTKLIMA, mit dem häufig eine starke Erwärmung der Lufttemperaturen einhergeht, ist im Untersuchungsraum um einzelne Gebäude in der INNENSTADT an der südlichen KAISERSTRAßE und ihre Nebenstraßen vorhanden. Auch die AGGERSTRAßE und GARTENSTRAßE in der NORDSTADT können einer Mischung aus STADTKLIMA und INNENSTADTKLIMA zugeordnet werden.

6.2 Klimaszenarien für die Region Siegburg

Im Zuge der Erstellung der Stadtklimaanalyse wurden zwei RCP-Szenarien des NRW-Ensembles für den Bereich Siegburg ausgewertet (vgl. Kapitel 3.1.2). Nachfolgend wird primär auf das umgangssprachliche „worst case-“ bzw. „business as usual“ RCP 8.5-Szenario eingegangen, jedoch liegen alle Auswertungen ebenfalls für das RCP 4.5 (vgl. Kapitel 9.6) vor.

Seit dem fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) wird der Begriff representative concentration pathway (RCP) zur Beschreibung der Szenarien verwendet. Der jeweilig zugehörige Zahlenwert, z.B. RCP 8.5, beschreibt nicht den Temperaturanstieg bis ins Jahr 2100, sondern den Strahlungsantrieb (Wirkung der Strahlung aus dem Weltall, welche u.a. durch Treibhausgase verstärkt wird) in W/m^2 . Anders ausgedrückt wird im RCP 8.5 für das Jahr 2100 von einer Änderung der Energiebilanz der Erde um $+8.5$ Watt pro Quadratmeter ausgegangen. Dieser zusätzliche Energieeintrag spiegelt sich u. a. in der Erhöhung der Lufttemperatur wider. Typische Szenarien sind die RCPs: 2.6, 4.5, 6.0 und 8.5 (siehe Abbildung 57), bei deren Verlauf allerdings nur das RCP 2.6 unterhalb des politisch definierten 2°C -Ziels bleiben würden. Aktuelle Untersuchungen gehen von einem Pfad zwischen den RCP 4.5 und RCP 8.5 aus [77].

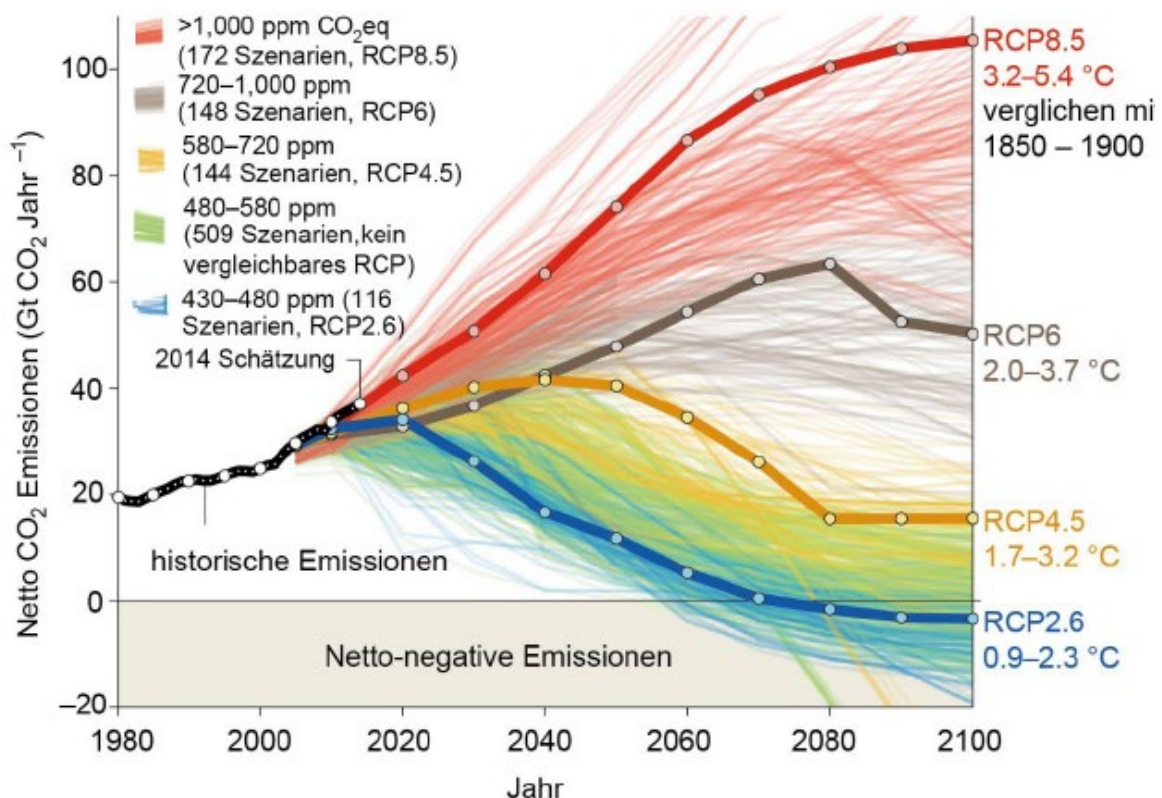


Abbildung 57: Abbildung der Temperaturveränderungen seit dem Jahr 1850 und Darstellung des projizierten Verlaufs unterschiedlicher Klimaszenarien [73]. Die für Siegburg ausgewerteten RCPs 4.5 und 8.5 sind orange bzw. rot dargestellt.

6.2.1 Lufttemperatur und Niederschlag

Folgt die Entwicklung dem Emissionspfad des RCP 8.5-Szenarios (siehe Tabelle 12), ist für die Stadt Siegburg ein Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur von 10,0 °C (1971-2000) auf 13,9 °C bis Ende des Jahrhunderts (2100) erwartbar, was einer Steigerung von +3,9 °C entspricht (siehe Abbildung 58). Die Sommermonate (Juni, Juli, August) erfahren in diesen Szenarien die gleiche Steigerung (siehe Abbildung 59). Die Region erwärmt sich damit über den Durchschnitt von NRW (+3,6 °C). Für das Ende des Jahrhunderts liegt der Bereich von Siegburg mit einer durchschnittlichen Gesamtjahrestemperatur von 13,9 °C über ein Grad über dem Durchschnitt von NRW.

Tabelle 12: Tabellarische Zusammenfassung der für das RCP 8.5 (Zeiträume: 2031-2060 / 2071-2100) ausgewerteten Parameter Lufttemperatur, Kenntage, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz sowie dem jeweiligen Änderungssignal (Δ) zum historischen (projizierten) 30-jährigen Mittel (1971-2000).

Siegburg	Klimaprojektion RCP 8.5				NRW	
	2031 bis 2060	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000
Lufttemperatur 2m ü.G. (LT)						
Gesamtjahr	12,1 °C	+2,1 °C	13,9 °C	+3,9 °C	12,8 °C	+3,6 °C
Sommermonate (JJA)	19,3 °C	+1,8 °C	21,4 °C	+3,9 °C	20,2 °C	+3,6 °C
Wintermonate (DJF)	4,8 °C	+1,8 °C	6,5 °C	+3,5 °C	5,6 °C	+3,5 °C
Klimatische Kenntage/Jahr						
Sommertage (LTmax $\geq$ 25 °C)	54	+ 17	76	+ 40	63	+ 35
Heiße Tage (LTmax $\geq$ 30 °C)	16	+ 9	29	+ 21	22	+ 17
Tropennächte (LTmin $\geq$ 20 °C)	2,6	+ 2,3	12,3	+ 11,9	-	+ 8,9
Frosttage (LTmin $<$ 0 °C)	38	- 22	20	- 40	23	- 42
Eistage (LTmax $<$ 0 °C)	3	- 5	0	- 8	2	- 12
Niederschlagssumme (Pr)						
Gesamtjahr	828 l/m ²	+ 2 %	825 l/m ²	+ 2 %	912 l/m ²	+ 5 %
Sommermonate (JJA)	228 l/m ²	- 4 %	209 l/m ²	- 12 %	209 l/m ²	- 8 %
Wintermonate (DJF)	200 l/m ²	+ 9 %	208 l/m ²	+ 13 %	258 l/m ²	+ 15 %
Klimatische Wasserbilanz (kWb)						
Gesamtjahr	210 l/m ²	- 3 l/m ²	154 l/m ²	- 59 l/m ²	256 l/m ²	- 48 l/m ²
Sommermonate (JJA)	-60 l/m ²	- 29 l/m ²	-108 l/m ²	- 77 l/m ²	-94 l/m ²	- 64 l/m ²
Wintermonate (DJF)	157 l/m ²	+ 18 l/m ²	164 l/m ²	+ 25 l/m ²	211 l/m ²	+ 26 l/m ²

Anmerkung: Aufgrund von gerundeten Werten kommt es mitunter zu Ungenauigkeiten bei den Änderungssignalen (Δ).

Bei Betrachtung der saisonalen thermischen Belastung während der Sommermonate ist bei den Lufttemperaturen für das jüngste 30-jährige Mittel (1971 – 2020) bereits ein Anstieg um 0,8 °C (vgl. Kapitel 5.1.1, Tabelle 7) zu erkennen. Dieser Veränderung setzt sich entsprechend der Projektion mittelfristig bis 2060 um +1,8 °C und langfristig bis 2100 um +3,9 °C fort (siehe Tabelle 12). Ein regionaltypischer Sommertag würde demnach am Ende des Jahrhunderts 21,4 °C betragen.

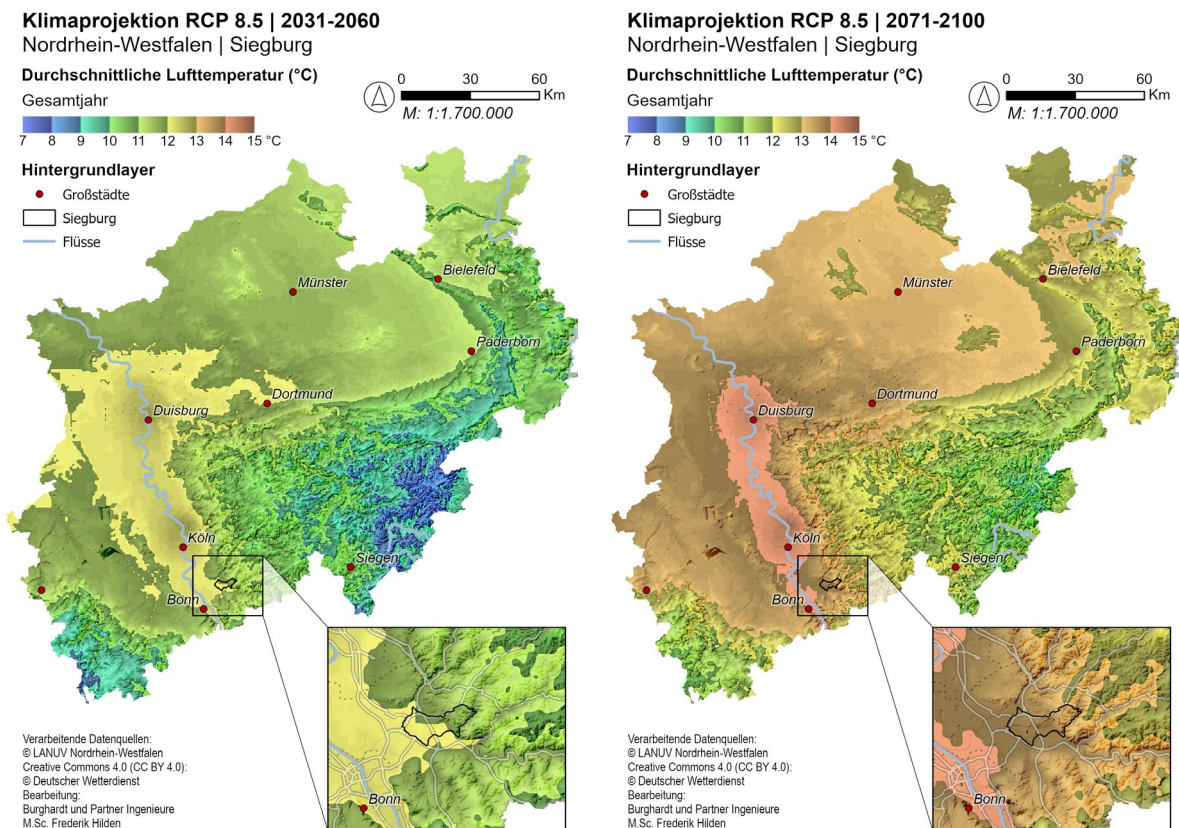


Abbildung 58: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur (Gesamtjahr) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts).

Angesichts der i.d.R. saisonal starken Erwärmung während der Sommermonate ist eine Häufung der thermische Gefährdungssituationen für den menschlichen Körper erwartbar. Vulnerable Bevölkerungsgruppen, wie Kleinkinder oder gesundheitlich vorbelastete Personen, sensible Einrichtungen / Infrastrukturen (z. B. Kitas, Grundschulen, Seniorenheime) aber auch hitzesensible Tiere- und Pflanzenarten betrifft dies im besonderen Maße.

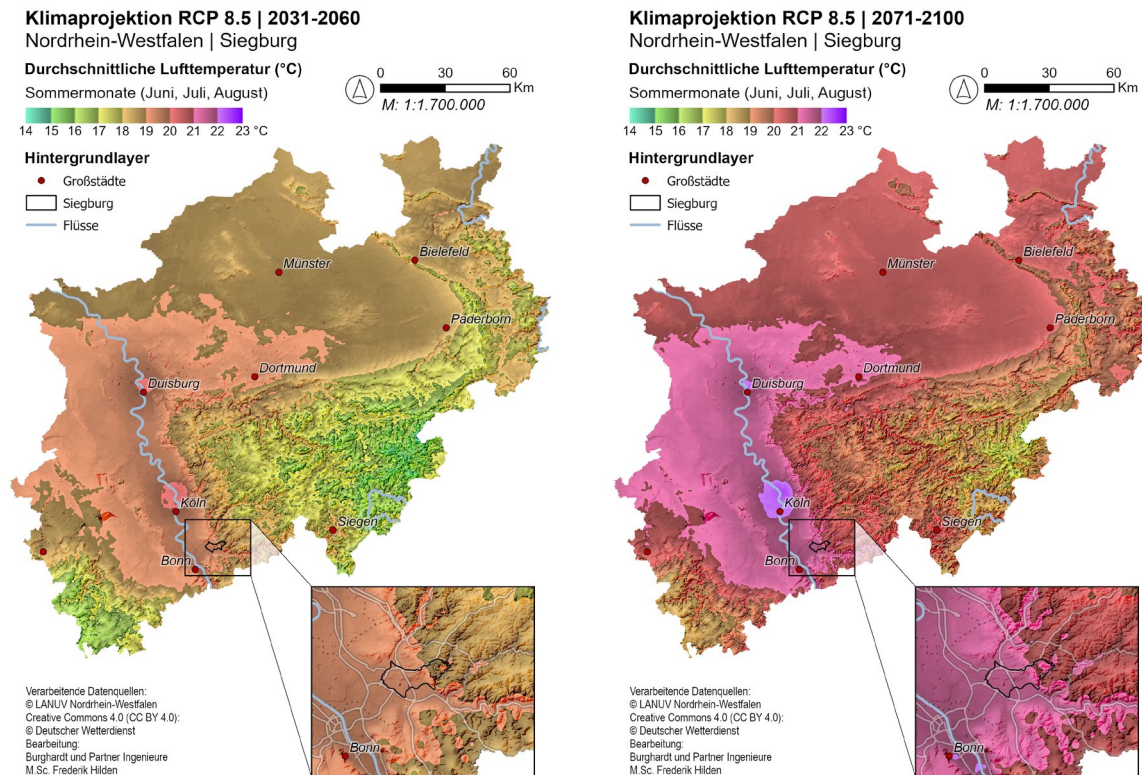


Abbildung 59: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur (Sommer) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts).

Beim Niederschlag werden die projizierten klimatischen Veränderungen anhand der prozentualen Veränderung in Bezug auf die Referenzperiode (1971 – 2000) dargestellt. Entweder wird dies auf die absolute Niederschlagssumme bezogen oder auf definierte Parameter, wie der klimatischen Wasserbilanz.

Für das Gesamtjahr werden gemäß dem RCP 8.5 leichte Anstiege der Niederschlagssumme um 2 % auf insgesamt 828 l/m² (2031-2060) bzw. 825 l/m² (2071-2100) projiziert, die gering unter dem Durchschnitt von NRW liegen. Bei Betrachtung der jahreszeitlichen Unterschiede ist eine Umverteilung der saisonalen Niederschläge zu erkennen. In den Wintermonaten kommt es zu einem Anstieg der Niederschlagsmengen (+9 % - mittelfristig bzw. +13 % - langfristig), während die Niederschlagssummen für die Sommermonate als rückläufig (-4 % - mittelfristig bzw. -12 % - langfristig) projiziert werden (siehe Abbildung 60, Tabelle 12).

Die verringerte Niederschlagsmenge und ansteigende Lufttemperaturen während der Sommermonate resultieren in einer deutlich negativeren klimatischen Wasserbilanz von -108 l/m² am Ende des Jahrhunderts (2100). Im Winter wird hingegen mit +25 l/m² mehr Wasser zur Verfügung stehen (siehe Tabelle 12).

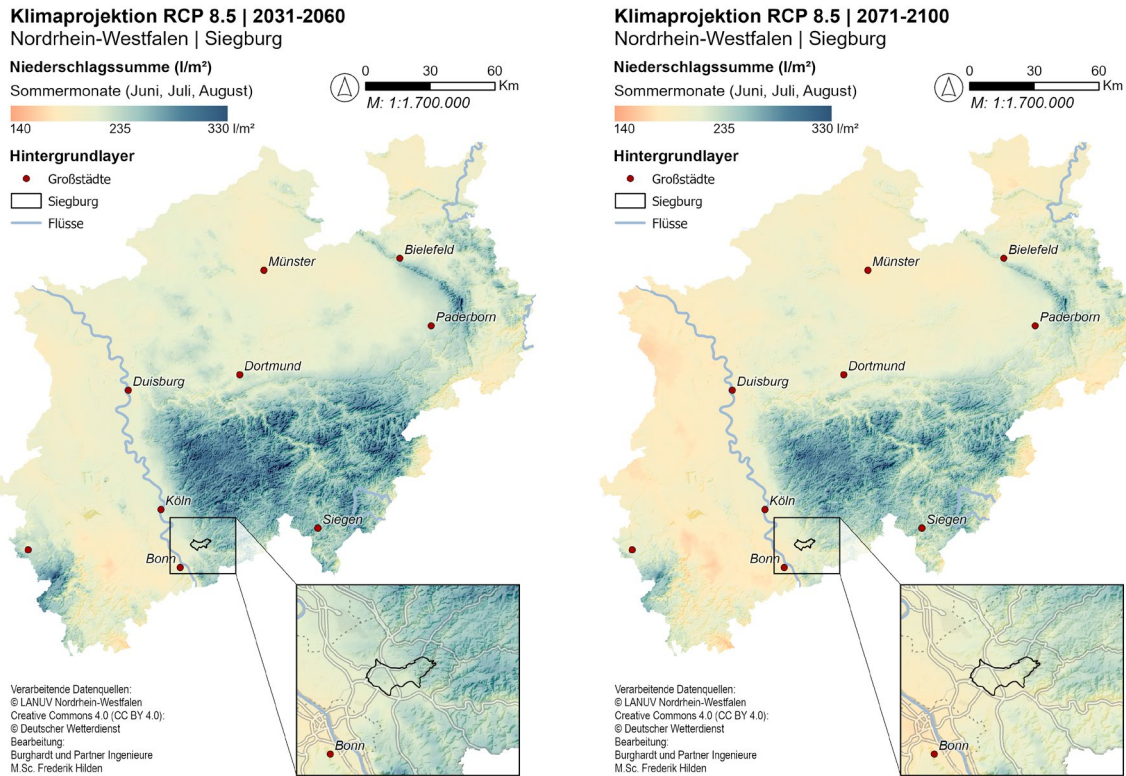


Abbildung 60: Darstellung der Niederschlagssummen (Sommermonate) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 – 2100 (rechts).

Kenntage

Wie für die Darstellung der historischen klimatischen Dynamiken werden auch für die Klimaprojektionen die Kenntage ausgewertet.

Während die vorangegangenen Durchschnittswerte der bodennahen Lufttemperatur und der Niederschlagssumme die Verlagerung in der Klimaveränderung anhand von physikalischen Messeinheiten präsentieren, geben die Schwellenwerte der klimatischen Kenntage leicht nachvollziehbare Veränderungen in absoluten Tagen pro Jahr im 30-jährigen Mittel an. Zudem wird die Hürde in der Kommunikation überwunden, dass die Betrachtungszeiträume nicht als Durchschnittswert gemittelt werden, wodurch keine differenzierte Betrachtung der Tagessituationen möglich ist, sondern es werden die Tagessituationen mit extremen Belastungssituationen als absolute Tage herausgestellt.

Ein weiteres Argument für die Auswertung ist, dass es im Zuge der allgemein steigenden Lufttemperaturen auch zu einer statistischen Häufung von Hitzeextremen kommt. Zum einen verschiebt sich die Temperaturkurve in einen höheren Wertebereich, wodurch die Schwellenwerte extremer Hitze häufiger überschritten werden. Zum anderen verringert sich die Stabilität des Klimas und es kommt zu häufigeren Abweichungen im oberen und unteren Temperaturbereich in Relation zum Temperaturmittel. Darüber hinaus gewinnen die Temperaturabweichungen an Intensität, was sich etwa in Hitzewellen ausdrücken wird.

Bezüglich Siegburgs ergab die Auswertungen der SOMMERTAGE, dass mittelfristig bis 2060 eine Zunahme von +17 zusätzlichen SOMMERTAGEN ($LT_{max} \geq 25^\circ C$) im Jahr auszugehen ist, langfristig bis 2100 sogar +40 Tage, unter der Annahme, dass die Entwicklung weiter so verläuft, wie bisher (siehe Tabelle 12). In absoluten Zahlen entspricht dies 54 bzw. 76 Sommertagen pro Jahr bzw. dem Äquivalent von ca. 2 Monaten. Wird der Ausstoß von Treibhausgasen begrenzt (RCP 4.5), steigt die Anzahl auf maximal 55 Tage bis zum Ende des Jahrhunderts (siehe Tabelle 13).

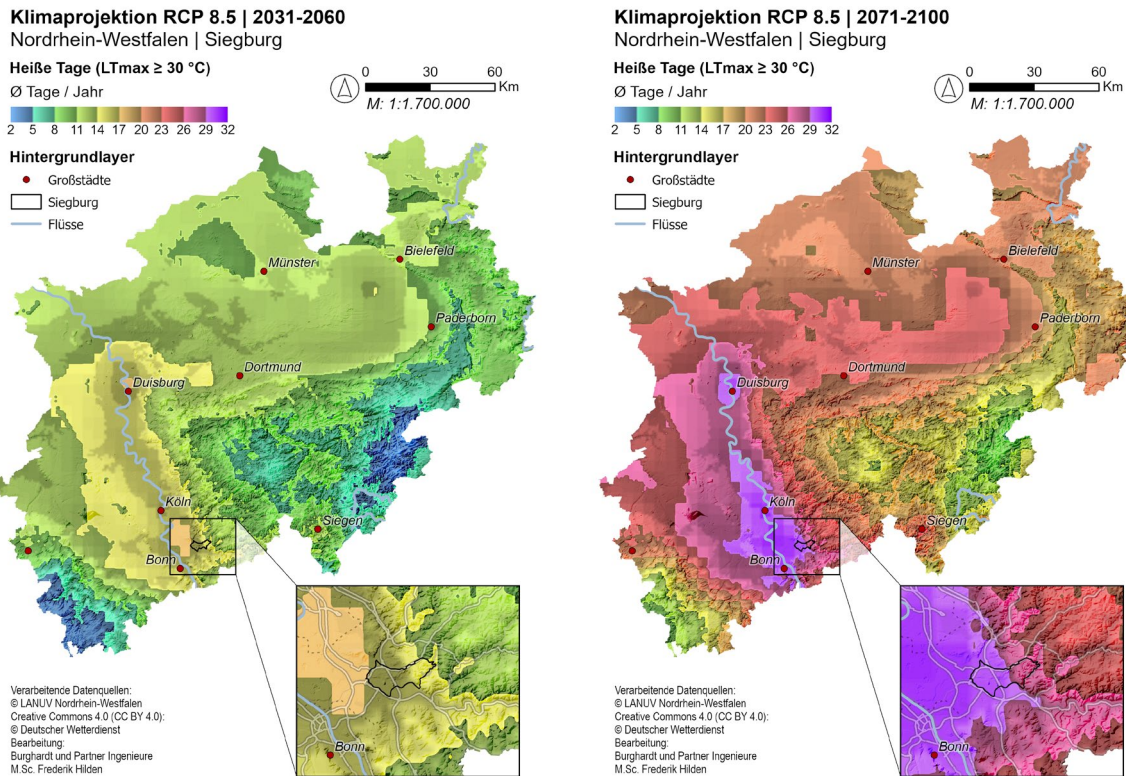


Abbildung 61: Darstellung der Heißen Tage ($LT_{max} \geq 30^\circ C$) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 – 2100 (rechts).

Die Anzahl der HEIßEN TAGE ($LT_{max} \geq 30^\circ C$) ist in den vergangenen 20 Jahren bereits um 3 Tage angestiegen. Gemäß der Klimaprojektion RCP 8.5 intensiviert sich der Anstieg in den kommenden Jahren weiter. Bis zum Jahr 2060 werden in Siegburg 16 HEIßE TAGE pro Jahr auftreten, bis zum Jahr 2100 sogar 29 Tage (+21 Tage zur Referenzperiode) (siehe Abbildung 61). Die Umverteilung der statistischen Häufigkeit von extremen Temperaturen führt dazu, dass wärmere Regionen auch übermäßig stark von Anstiegen von klimatischen Veränderungen betroffen sind. Siegburg als tendenziell warme Region ist mit der Zunahme von +40 HEIßEN TAGEN stärker vom Klimawandel betroffen als NRW im Durchschnitt von +35 HEIßEN TAGEN.

Die Zunahme der TROPENNÄCHTE ($LT_{min} \geq 20^\circ C$) ist ebenfalls bezeichnend. Aktuell in Siegburg ein Randphänomen mit lediglich 0,4 Nächten pro Jahr (vgl. Kapitel 5.1.2), werden für das Ende des Jahrhunderts 12,3 Tropennächte pro Jahr (im RCP 8.5) erwartet, wobei die Entwicklung nicht linear verläuft (siehe Abbildung 62). Besonders in der langfristigen Perspektive verläuft die Zunahme übermäßig. Im Szenario RCP 4.5 begrenzt sich die Zunahme auf durchschnittlich +2,5 Tropennächte. Ähnlich wie bei den HEIßEN TAGEN ist Siegburg auch bei den

TROPENNÄCHTEN stärker von den klimatischen Veränderungen betroffen als NRW im flächenhaften Durchschnitt (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13).

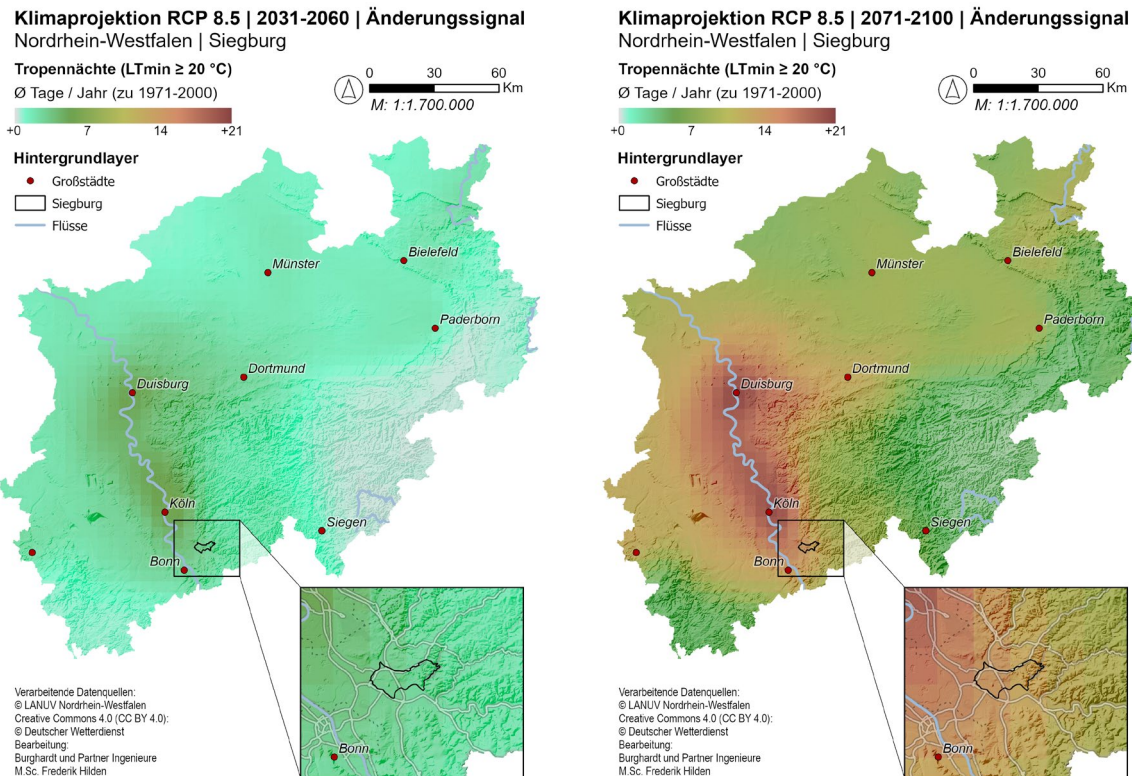


Abbildung 62: Darstellung der Änderungssignale der Tropennächte (LTmin $\geq 20^{\circ}\text{C}$) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 - 2100 (rechts) zu 1971-2000. Die historische Anzahl der Tropennächte in Deutschland werden nicht systematisch vom DWD erhoben, weshalb hier lediglich die Änderungssignale darstellbar sind. Die Werte geben die Zunahme gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) an.

Während es bei den hitzebezogenen Kenntagen zu bisweilen deutlichen Anstiegen kommen wird, sinkt die projizierte Anzahl der kältebezogenen Kenntage. Dies kann als direkte Folge der globalen Erderwärmung gesehen werden. So ist bei den EISTAGEN ist ein zukünftiges Ausbleiben im Raum Siegburg im Szenario RCP 8.5 wahrscheinlich (siehe Tabelle 12). Die bereits milden Winter in Siegburg werden sich weiter erwärmen. Zu Frostereignissen kommt es laut dem RCP 8.5 nur noch an 20 Tagen im Jahr. Das Zurückgehen von Schnee und Frost wird sich insbesondere auf das lokale Ökosystem auswirken.

Einen vertiefenden Überblick zu den klimatischen Veränderungen in der Stadt Siegburg sowie in der Region werden tabellarisch wiedergegeben (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13). Dargestellt sind die jeweiligen Werte auch für das moderatere Klimaszenario RCP 4.5. Die Tabelle orientiert sich im Aufbau an der Tabelle der historischen und aktuellen klimatischen Parameter (vgl. Kapitel 5.1.1, Tabelle 7). Die klimatische Dynamik kann also als zusammenhängende Entwicklung gelesen werden.

Beim Lesen und Interpretieren der Daten etwa für die Planung gilt zu beachten, dass u.a. Stauungseffekte, wie die städtischen Wärmeinsel die Zahl der Hitzekeentagen noch weiter anhebt, was mitunter eine deutliche Mehrbelastung für die städtische Bevölkerung Siegburgs bedeuten kann. Derart lokalklimatische Effekte können jedoch nicht den Daten der 1 km x 1 km Auflösung der Klimaprojektionen entnommen werden.

Tabelle 13: Tabellarische Zusammenfassung der für das RCP 4.5 (Zeiträume: 2031-2060 und 2071-2100) ausgewerteten Parameter Lufttemperatur, Kenntage, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz sowie dem jeweiligen Änderungssignal (Δ) zum historischen (projizierten) 30-jährigen Mittel (1971-2000).

Siegburg	Klimaprojektion RCP 4.5				NRW	
	2031 bis 2060	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000	2071 bis 2100	Δ zu 1971 bis 2000
Lufttemperatur 2 m ü. Grund (LT)						
Gesamtjahr	11,6 °C	+ 1,6 °C	12,3 °C	+ 2,2 °C	11,2 °C	+ 2,0 °C
Sommermonate (JJA)	18,9 °C	+ 1,4 °C	19,6 °C	+ 2,0 °C	18,5 °C	+ 1,9 °C
Wintermonate (DJF)	4,3 °C	+ 1,3 °C	5,0 °C	+ 2,1 °C	4,2 °C	+ 2,0 °C
Klimatische Kenntage/Jahr						
Sommertage (LTmax $\geq$ 25 °C)	50	+ 14	55	+ 18	44	+ 16
Heiße Tage (LTmax $\geq$ 30 °C)	13	+ 6	16	+ 9	12	+ 7
Tropennächte (LTmin $\geq$ 20 °C)	1,2	+ 0,9	2,8	+ 2,5	-	+ 1,8
Frosttage (LTmin $<$ 0 °C)	39	- 20	30	- 29	34	- 31
Eistage (LTmax $<$ 0 °C)	3	- 5	1	- 7	5	- 9
Niederschlagssumme (Pr)						
Gesamtjahr	829 l/m ²	+ 3 %	836 l/m ²	+ 3 %	904 l/m ²	+ 4 %
Sommermonate (JJA)	224 l/m ²	- 6 %	218 l/m ²	- 8 %	246 l/m ²	- 6 %
Wintermonate (DJF)	196 l/m ²	+ 6 %	201 l/m ²	+ 10 %	214 l/m ²	+ 9 %
Klimatische Wasserbilanz (kWb)						
Gesamtjahr	211 l/m ²	- 2 l/m ²	198 l/m ²	- 16 l/m ²	309 l/m ²	+ 5 l/m ²
Sommermonate (JJA)	-58 l/m ²	- 27 l/m ²	-75 l/m ²	- 44 l/m ²	-66 l/m ²	- 35 l/m ²
Wintermonate (DJF)	155 l/m ²	+ 16 l/m ²	157 l/m ²	+ 18 l/m ²	197 l/m ²	+ 12 l/m ²

Anmerkung: Aufgrund von gerundeten Werten kommt es mitunter zu Ungenauigkeiten bei den Änderungssignalen (Δ).

Klimatische Gliederung und Gewichtung der klimatischen Veränderungen

Vor dem Hintergrund der erläuterten Individualbetrachtungen der klimatischen Veränderungen im Bereich der Lufttemperaturen und des Niederschlags erfolgte zusätzlich eine Bewertung in Bezug auf die kombinierten Herausforderungen der Klimaveränderungen. Grundlegend wird angenommen, dass durch den Klimawandel gerade die Sommermonate mit zunehmenden Belastungssituationen innerhalb der Städte einhergehen.

Abbildung 63 fasst daher die historischen Messungen und klimatischen Projektionen für die sommerlichen Niederschlagsmengen und für die Anzahl der HEIßEN TAGE als flächige Darstellung für das Bundesland Nordrhein-Westfalen zusammen. Auf diese Weise wird dargestellt, welche Regionen bereits heute vergleichsweise belastet sind, und welche Regionen von besonders hohen klimatischen Veränderungen betroffen sein werden.

Die flächige Einfärbung verweist darauf, wie niederschlagsreich bzw. -arm eine Region während der Sommermonate Juni, Juli und August ist, als auch, wie häufig extreme Lufttemperaturen über 30 °C auftreten. Je intensiver bzw. dunkler der Farbton ist, desto höher ist die Anzahl der HEIßEN TAGE und desto höher sind die gefallenen Liter pro Quadratmeter Regen, bezogen auf die historisch gemessenen Mittel der Referenzperiode 1971-2000.

Die farbliche Einteilung der historischen Daten folgt der relativen Verteilung der Werte. Die drei Klassen der Niederschlagssumme entsprechen 164-223 l/m² (0-33 %), 223-270 l/m² (33-66 %), 270-340 l/m² (66-100 %). Die drei Klassen der HEIßEN TAGE symbolisieren 1-3 Tage/Jahr (0-33 %), 3-6 Tage/Jahr (33-66 %), 6-10 Tage/Jahr (66-100 %).

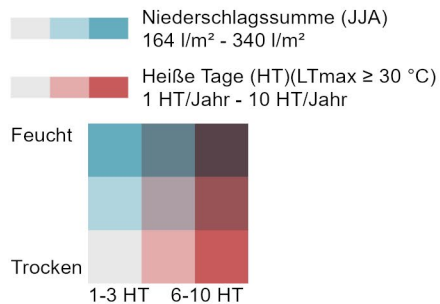
Die Konturen beziehen sich auf die projizierten Veränderungen in den unterschiedlichen Verwaltungsgebieten in NRW, ebenfalls während der Sommermonate. Die Darstellung fokussiert jene Gebiete, die überdurchschnittlich (66-100 %) trockener werden mit über -12 % Rückgang der sommerlichen Niederschlagssumme sowie gleichzeitig einen überdurchschnittlichen Anstieg von HEIßEN TAGEN (>+19 Tage pro Jahr) verzeichnen. Regionen, die von starken Veränderungen der beiden klimatischen Parametern betroffen sind, werden in einer schraffierten Fläche visualisiert.

Siegburg wird entsprechend der 7 HEIßEN TAGE und 213 l/m² als hellrot eingefärbt. Die Stadt ist also vergleichsweise trocken und heiß. Dagegen stechen die Mittelgebirgslagen des Sauer- und Siegerlandes als kühle und gleichzeitig feuchte Lagen heraus, was anhand der bläulichen Einfärbung zu erkennen ist.

Die Klimaprojektionen für die beiden Parameter sind in Form der Konturen dargestellt. Die Bewertung bezieht sich auf das obere Drittel des Wertebereichs der Änderungssignale für NRW. Der projizierte Anstieg von 21 HEIßEN TAGE in Siegburg wird somit als übermäßig gewichtet und umrandet. Bei sommerlichen Niederschlagssummen werden Rückgänge zwischen 12 % und 15 % betrachtet. Die Niederschlagsreduktion in Siegburg liegt geringfügig unterhalb dieser Grenze. Dennoch kann bereits heute abgesehen werden, dass die Region von Siegburg allgemein mit den größten Herausforderungen des Klimawandels zu kämpfen haben wird, die in NRW auftreten werden. Wie bereits erwähnt können städtische Einflüsse zu einer weiteren Erhöhung der Hitzebelastung führen. Vor diesem Hintergrund ist die Bedeutung vorbereitender und vorsorgender Konzepte, wie dem Hitzeaktionsplan für die Stadt Siegburg [7], hervorzuheben.

Klimatische Gliederung & Gewichtung von klimatischen Veränderungen in Nordrhein-Westfalen

Historische Klimaparameter (1971-2000)



Klimaprojektion (RCP 8.5) Änderungssignal 2071-2100 zu 1971-2000

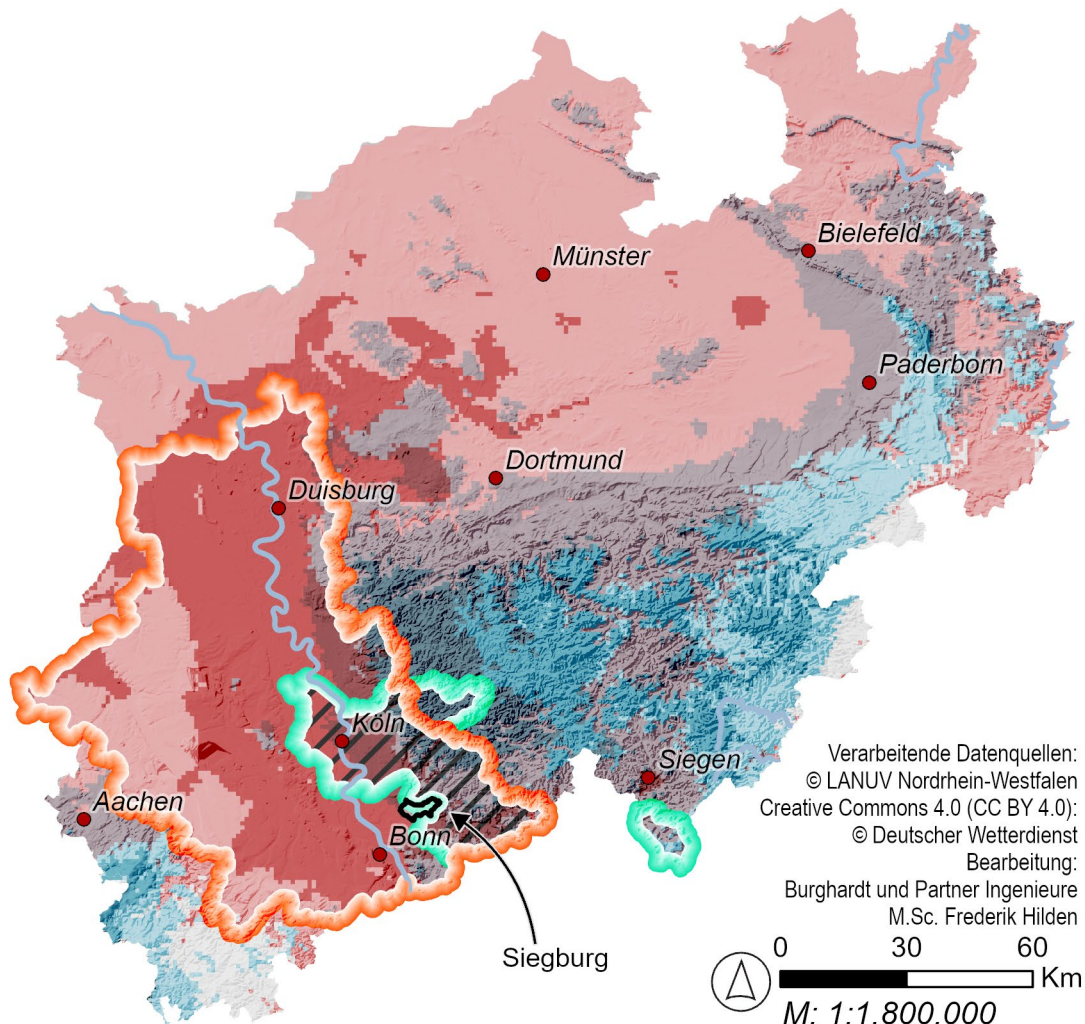
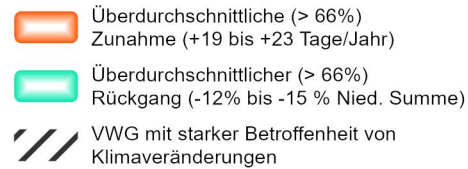


Abbildung 63: Klimatische Gliederung von NRW. Die flächige Einfärbung bezieht sich auf die Klimaparameter Niederschlagssumme (Sommermonate) und Heiße Tage im historischen Mittel. Die Konturen symbolisieren die VWG mit den größten projizierten klimatischen Veränderungen (>66 %) bis zum Jahr 2100 im RCP 8.5.

7 Analysen und Planungen

7.1 Planungshinweiskarte und Maßnahmenempfehlungen

Die Planungshinweiskarte baut inhaltlich auf der Klimaanalyse auf. Sie ist ein bedeutendes Bindeglied zwischen dem fachlichen Beitrag der Klimaanalyse und praxisorientierten Planungsprozessen, da sie die Ergebnisse der Klimaanalyse bewertet und in eine für die Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplanung verständliche Sprache übersetzt.

Die Genauigkeit der Planungsaussagen hat sich stets an den Maßstab der Klimaanalyse zu richten [20]. Angestrebt wird durch die Planungshinweiskarte die Betrachtung ortsspezifischer Verhältnisse im Untersuchungsraum sowie deren subsequeute Hervorhebung und Beurteilung im gesamtstädtischen Kontext. Somit dient sie dem „[...] *Schutz und der Vorsorge zum Erhalt gesunder Lebens- und Arbeitsverhältnisse für die ansässige Bevölkerung. Das schließt die Sicherung bestehender günstiger lokalklimatischer und lufthygienischer Verhältnisse ebenso ein wie im Bedarfsfall die Verbesserung etwaiger Belastungssituationen.*“ [20]. Hierbei ist zu beachten, dass die Ausweisungen nicht zwingend an die genauen Abgrenzungen der Klimatope gebunden sein müssen, sondern von diesen abweichen können.

Die Planungshinweiskarte transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen, umweltschutzrelevanten und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung. Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken (z. B. Hitze, Vegetationsabdeckung, Kaltluftentstehung und -transport) können synergetische, aber auch konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Handlungsempfehlungen oder Planungshinweise (siehe Abbildung 64) - in Bezug auf das Thema Klima in der kommunalen Planung herausgearbeitet werden. Neben den, in der Stadtklimaanalyse erarbeiteten Ergebnissen, finden auch weitere, sofern vorhanden, Analysen und Planungen Eingang in die Entwicklung der Planungshinweiskarte.

Über die statistische Verteilung der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (Themenkarten) lassen sich lokale Charakteristika ablesen und darstellen. So kann dann z. B. im Hinblick auf eine optimierte städtische Belüftung (Durchlüftungsachsen) oder den Abbau von Wärmeinseln eingegangen und entsprechende Handlungsempfehlungen beschrieben werden.

Die abgeleitete Planungshinweiskarte (siehe Abbildung 65 und Abbildung 66) orientiert sich in der Erstellung (Methodik) an der VDI-RL (3787 Blatt 1). Die Darstellung der Planungshinweise und Planungsempfehlungen erfolgt, speziell für den bebauten Raum, stärker planungsorientiert (vgl. technische Beschreibung der Planungshinweiskarte).

Dargestellt werden drei Kategorien innerhalb der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsflächen) sowie vier Kategorien innerhalb der Siedlungsflächen. Lokale Planungshinweise (z. B. Durchlüftungsachsen) werden verortet und stadtklimatische Besonderheiten / Schlüsselrollen lokaler Gegebenheiten werden gesondert überarbeitet.

Die Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 6.1) und die Planungshinweiskarte definieren den klimatischen Bestand bzw. das vorhandene Wirkgefüge. Die unterschiedlichen Themenkarten dienen als Werkzeuge um die Informationen und Aussagen dieser Hauptkarten rekursiv nachzuverfolgen. In Kombination mit dem Erläuterungsbericht dienen die Plan- und Kartenwerke zukünftig als Instrumente um die Schutz- und Entwicklungsmöglichkeiten von Stadträumen in Bezug

auf ihre Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Veränderungen (bspw. Flächen- und Nutzungsänderungen) hinsichtlich der klimatischen Wirkgrößen abzuleiten.

Hierbei ist anzumerken, dass die Planungshinweiskarte kein pauschales „Verhinderungsinstrument“ darstellt, sondern unterschiedlich hohe Ansprüche an eine klimaangepasste Entwicklungsplanung stellt.

Im Rahmen der Planungshinweiskarte werden folgende Bereiche mit entsprechenden Handlungsempfehlungen bzw. Planungsempfehlungen bei Weiterentwicklung abgeleitet:

- drei klimatisch wirksame Ausgleichsräume primär im Außenbereich (Gunstbereiche),
- vier klimatische Wirkräume im Siedlungsbereich (Wirkungsräume).

Die Darstellung der Übergänge zwischen den unterschiedlichen Bereichen findet fließend statt.

Zusätzliche Informationen für zukünftige klimaangepasste Planungen werden über nachfolgend dargestellte Planungshinweise gegeben.

Thematische Planungshinweise

-  Durchlüftungsachsen (hohe klimatische Bedeutung - Sensibel Entwickeln & Aufwerten)
-  Durchlüftungsachsen (sehr hohe klimatische Bedeutung - Sichern & Entwickeln)
-  Kaltluftversorgung (hohe klimatische Bedeutung - Sichern & baulich sensibel entwickeln)
-  Kaltluftversorgung (sehr hohe klimatische Bedeutung - Sichern, Entwickeln & Bebauung möglichst vermeiden)
-  Siedlungsräume klimatisch sensibel entwickeln
-  Siedlungsräume klimatisch aufwertend entwickeln
-  Vegetationsanteil erhöhen (mittlere Priorität)
-  Vegetationsanteil erhöhen (hohe Priorität)

Abbildung 64: Übersicht der Planungshinweisen in der Planungshinweiskarte zu unterschiedlichen Themenbereichen.

Ausgleichsräume primär im Außenbereich (Gunsträume)

Ausgleichsraum mit geringer klimatischer Planungsrelevanz

Diese vegetationsdominierten Freiräume zählen trotz ihres hohen Vegetationsanteils zu den Ausgleichsräumen geringer Bedeutung. Sie sind aufgrund ihrer Lage im Raum, ihrer Exposition und ihrer Einbettung in das nächtliche Kaltluftsystem für den Siedlungsraum von untergeordneter Planungsrelevanz. Eine Grundsätzliche Entwicklung dieser Flächen ist möglich. Eine, über das Normalmaß gehende klimatischen Prüfung ist im Normalfall nicht notwendig. Bei großflächigen Entwicklungsvorhaben sollte eine klimatische Prüfung mit klimatischen Planungshinweisen für die Entwicklung ergänzt werden.

Ausgleichsraum mit mittlerer klimatischer Planungsrelevanz

Diese Flächen stehen in einem direkten Kontakt mit dem Siedlungsraum und können diesen durch ihre Einbettung in das nächtliche Kaltluftgeschehen positiv beeinflussen. Dabei stellen sie einen wichtigen Übergang zwischen Siedlungsraum und Freiraum dar. Bei Entwicklungsvorhaben auf diesen Flächen, je nach Lage im Raum, sollte mindestens eine klimatische Stellungnahme mit dem Fokus auf die nächtliche Kaltluftsituation erbracht werden. Es wird empfohlen sensible Bereiche (z. B. verjüngte Durchlassbereiche) zu schützen und freizuhalten. Bei Entwicklungsvorhaben in der Nähe von größeren Siedlungsstrukturen sollte ein klimatisches Gutachten mit konkreten Planungs- und Maßnahmenhinweisen eingefordert werden.

Ausgleichsraum mit hoher klimatischer Planungsrelevanz

Diese Räume besitzen eine besondere klimatisch regulierende Ausgleichsfunktion für den Siedlungsraum, da sie eine direkte Verbindung zwischen Siedlungsraum und Freiraum darstellen und dabei größere Mengen an Kaltluft nachts in den Siedlungsraum transportieren können. Ziel sollte es sein, mit diesen Räumen aus klimatischer Sicht sehr sensible umzugehen. Dabei ist per se eine städtebauliche Entwicklung der Flächen nicht auszuschließen. Als zu prüfendes Schutzgut sollte der Aspekt des Klimas aber am höchsten gewichtet werden. Dazu kommt, dass jedes Vorhaben gutachterlich auf seine klimatische Einflussnahme gegenüber dem Siedlungsraum geprüft werden muss. Für kleinere Einzelvorhaben sind klimatische Gutachten inklusive Planungs- und Maßnahmenhinweise zu fordern. Vorhaben, die darüber hinausgehen sollten von Beginn an (ab Phase-0 der Bauleitplanung) klimatisch begleitet werden, so dass der Entwurf und die zukünftige Planung entsprechend der klimatischen Belange entwickelt wird.

Wirkräume des Siedlungsbereichs

Bebauter Raum klimatisch unbelastet

Diese Siedlungsflächen sind typischerweise durch eine geringe thermische Belastung geprägt und im Normalfall durch eine guten nächtliche Kaltluftversorgung und/oder Durchlüftungspotential am Tag geprägt. Gleichzeitig besitzen sie nur eine geringe Planungsrelevanz im Kontext baulicher Entwicklungen. Aufrechterhaltung eines hohen Vegetationsanteils sowie die gute fachliche Praxis des klimaangepassten Bauens sollten Standard sein. Bei größeren Vorhaben sollten diese klimatisch geprüft werden.

Bebauter Raum klimatisch heterogen

Diese Klasse vereint Siedlungsflächen die zusammengekommen einen heterogenen klimatischen Charakter besitzen. Grundsätzlich liegt jedoch eine höhere klimatische Belastungssituation vor. Nutzungsintensivierungen können dadurch zur Entwicklung von klimatischen Ungunst-Situationen führen, die es zu vermeiden gilt. Insbesondere Räume die ein gesteigertes nächtliches / tägliches Durchlüftungspotential besitzen sind für Ihre Umgebung von Planungsrelevanz und besitzen dadurch eine klimatische Fernwirkung. Bei der städtebaulichen Entwicklung dieser Flächen sind klimatische Belange zu prüfen und zu berücksichtigen. Eine lokale klimatische Verschlechterung bzw. die Beeinträchtigung der klimatischen Fernwirkung sollte vermieden werden. Bei größeren Vorhaben ist eine klimatisch-gutachterliche Begleitung von Beginn an (ab Phase-0 der Bauleitplanung) zu empfehlen.

Bebauter Raum klimatisch heterogen mit besonderer klimatischer Sensibilität

Diese Klasse vereint Siedlungsräume die zusammengekommen einen heterogenen klimatischen Charakter besitzen, jedoch mit teils eindeutigen Belastungstendenzen. Ihre besondere klimatische Sensibilität erhalten sie durch unterschiedliche Ungunst Faktoren (wie z. B. unzureichende Durchgrünung oder fehlende Durchlüftung. Entsprechend können insbesondere diese Flächen einen hohen Grad der klimatischen Individualität aufweisen, wodurch auch der planerische Umgang mit diesen Flächen ein erhöhtes Maß der klimatischen Berücksichtigung bedarf. Lokalklimatische Verschlechterungen ohne klimatisch Ausgleichsmaßnahmen sind zu vermeiden. Im Zuge möglicher Entwicklungsvorhaben, bedarf es einer klimatischen Stärken- und Schwächenbetrachtung. Daraus abgeleitet, sollte eine angemessene gutachterliche Begleitung für das Schutzgut Klima auf diesen Flächen gewählt werden.

Bebauter Raum mit klimatischer Ungunst

Diese Räume stellen durch ihre thermische Belastung zukünftige Klimasanierungsgebiete dar. Ziel sollte es sein, die thermische Belastung innerhalb dieser Räume dauerhaft durch Maßnahmen zur Klimaanpassung (auch im Bestand) zu reduzieren. Durch die klimatische Sensibilität dieser Flächen ist das Schutzgut Klima von besonderer Relevanz und ist im Abwägungsprozess besonderes zu berücksichtigen. Sollte eine Entwicklung dieser Flächen in Betracht gezogen werden, so sind Vorhaben von Beginn an (ab Phase-0 der Bauleitplanung) klimatisch-gutachterlich und klimatisch-planerisch zu begleiten. Dazu zählt auch eine klimatische Prüfung und Einschätzung, inwieweit Flächen entwickelt werden können.

Der unbebaute Raum gliedert sich in drei Kategorien: Den Ausgleichsraum mit geringer, mittlerer und hoher klimatischer Planungsrelevanz. Diese vegetationsdominierten Freiräume, die sich überwiegend im nördlichen walddominierten unbebauten Raum von SIEGBURG (siehe Abbildung 65) befinden, zählen trotz ihres hohen Vegetationsanteils zu den Ausgleichsräumen geringer Bedeutung. Sie sind aufgrund ihrer Lage im Raum, ihrer Exposition und ihrer Einbettung in das nächtliche Kaltluftsystem für den Siedlungsraum von untergeordneter Planungsrelevanz. Demgegenüber besitzen die Ausgleichsräume hoher Bedeutung eine besondere klimatisch regulierende Ausgleichsfunktion für den insbesondere südlich gelegenen Siedlungsraum, da sie eine direkte Verbindung zwischen Siedlungsraum und Freiraum darstellen und dabei größere Mengen an Kaltluft nachts in den Siedlungsraum transportieren können. Zu diesen gehören insbesondere die Freiflächen im Süden entlang der SIEG. Die blauen Pfeile (thematische Planungshinweise) zeigen an, dass die Kaltluft hier überwiegend von Ost nach West entlang der SIEGAUEN transportiert wird und daher diese Flächen von einer Bebauung möglichst freigehalten werden sollten. Im westlichen unbebauten Raum befindet sich der größte Ausgleichsraum mittlerer klimatischer Planungsrelevanz. Hier fließt die Kaltluft von Norden in Richtung Sieg. Dieser Bereich sollte baulich höchstens sensibel entwickelt werden. Auch nimmt die Bedeutung der Ausgleichsräume regulär mit der Nähe zum bebauten Raum zu.

Der bebaute Raum unterteilt sich seinerseits in vier Kategorien, die sich hinsichtlich ihrer klimatischen Belastung und Funktion voneinander unterscheiden. Zur Kategorie bebautes klimatisch unbelastetes Gebiet zählen meist luftige Siedlungsräume, die hauptsächlich zum Wohnen genutzt werden. Die Bebauung ist hier regulär kleinteilig, aber in ihrer Dichte und ihrem Vegetationsanteil ausgeglichen. Dies trifft besonders auf die kleineren Stadtteile im Siedlungsgebiet zu. SELIGENTHAL und KALDAUEN sind beinahe ausschließlich dieser Kategorie zuzuordnen. In beiden Stadtteilen sind einige Bereiche außerdem als klimatisch heterogen klassifiziert. Dazu gehört das Industrie- und Gewerbegebiet in SELIGENTHAL die HAUPTSTRAßE, welche dann weiter nach KALDAUEN verläuft und auch dort der Kategorie klimatisch heterogen zugeordnet wird. Diese Straße fungiert gleichzeitig als Durchlüftungssachse und hat somit eine hohe klimatische Bedeutung für die Stadtteile. Punktuell sollten hier Siedlungsräume klimatisch aufwertend bzw. sensibel entwickelt sowie Vegetationsanteile mit mittlerer Priorität erhöht werden. Ähnlich wird der bebaute Raum entlang AM ABTSHOF und ZUR ALTEN FÄHRE in KALDAUEN eingeordnet. Ein großer Bereich in DEICHHAUS im Süden des Stadtgebietes ist ähnlich wie in KALDAUEN und SELIGENTHAL der Kategorie bebautes klimatisch unbelastetes Gebiet zugeordnet. Hier gilt es häufig Siedlungsräume klimatisch sensibel zu entwickeln. Die FRANKFURTER STRAßE dient in DEICHHAUS der Kaltluftversorgung mit sehr hoher klimatischer Bedeutung. Gleichzeitig befinden sich in ihrem östlichen und westlichen Teil Bereiche, die als klimatisch heterogen klassifiziert werden und in denen Vegetationsanteile mit mittlerer Priorität erhöht werden sollten. Punktuell kommt im bebauten Raum entlang der HÄNDELSTRAßE die Kategorie klimatisch heterogen mit besonderer klimatischer Sensibilität vor.

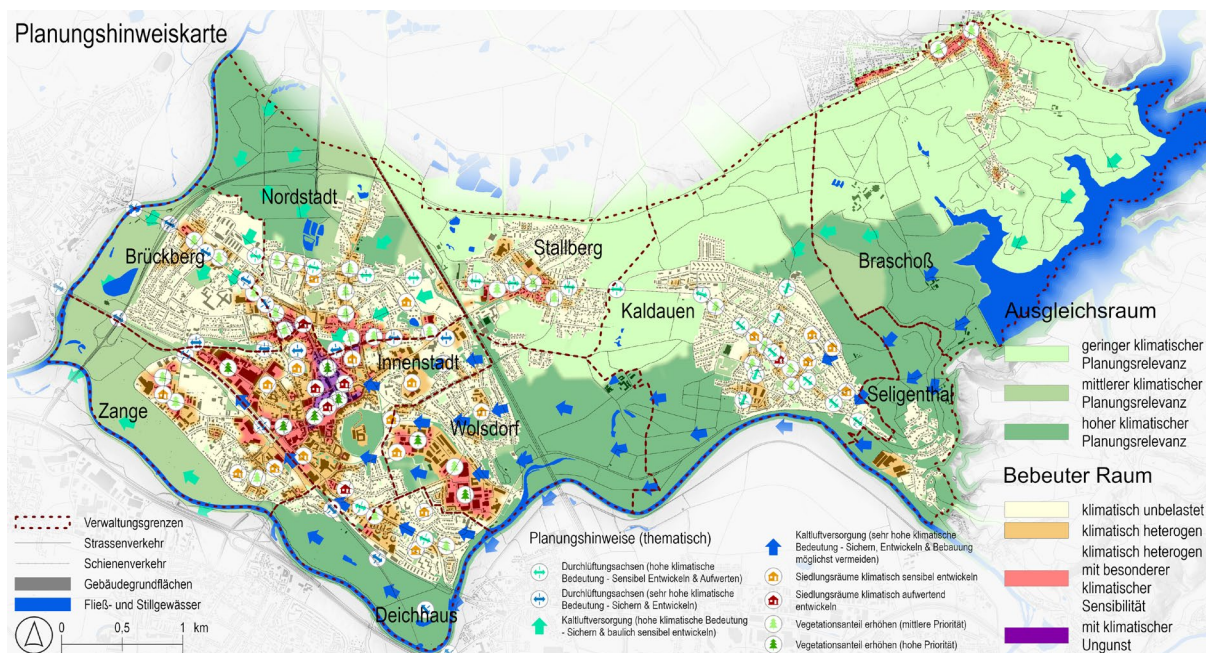


Abbildung 65: Planungshinweiskarte – Klassifizierung des Freiraums & Siedlungsraums nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Flächendeckend wird der administrative Raum von Siegburg in Ausgleichsräume mit unterschiedlichen klimatischen Planungsrelevanzen (Grüntöne) und Bebaute Räume mit unterschiedlichen klimatischen Eigenschaften und Belastungen (hellgelb, orange, rot, violett) unterteilt. Über Piktogramme werden zusätzliche Planungshinweise (verschiedener Themenfelder) für bestimmte Bereiche definiert. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.

Diese kommt häufiger in BRASCHOß vor, und zwar insbesondere nördlich des KORNBLUMENWEG und westlich der BRASCHOßER STRAßE. Eine Erhöhung des Vegetationsanteils wird daher mit mittlerer Priorität empfohlen. Auch in WOLSDORF, ZANGE, BRÜCKBERG und STALLBERG gibt es jeweils Bereiche, die klimatisch heterogen sind mit besonderer klimatischer Sensibilität. Dazu gehören die Industrie- und Gewerbegebiete in WOLSDORF südlich der DAMMSTRASSE bzw. WOLSDORFER STRASSE, in BRÜCKBERG entlang der LUISENSTRASSE und in ZANGE entlang der LINDENSTRASSE. Hier sollten Vegetationsanteile zum Teil mit hoher Priorität erhöht werden. In STALLBERG bezieht sich die Kategorie nicht nur auf industriell und gewerblich genutzte Infrastruktur, sondern auch auf Wohnbebauung insbesondere entlang der ZEITHSTRASSE und THEODOR-KÖRNER-STRASSE. Insbesondere die Wohnhäuser an den Siedlungsrändern sind häufig klimatisch unbelastet. Diese Siedlungsflächen sind typischerweise durch eine geringe thermische Belastung geprägt und im Normalfall durch eine guten nächtliche Kaltluftversorgung und/oder Durchlüftungspotential am Tag geprägt. Mit zunehmender Bebauungsdichte steigt der Anteil klimatisch heterogener Flächen. Grundsätzlich liegt hier eine höhere klimatische Belastungssituation vor. Nutzungsintensivierungen können dadurch zur Entwicklung von klimatischen Ungunst-Situationen führen, die es zu vermeiden gilt.

In der INNENSTADT und der NORDSTADT treten die klimatisch heterogenen Gebiete mit besonderer klimatischer Sensibilität häufig im Verbund mit den bebauten Gebieten mit klimatischer Ungunst auf. Das ist besonders im unteren Bereich der Karte im Detailbereich der Innenstadt (siehe Abbildung 66) zu erkennen. Konkret gehören zu den betreffenden Flächen in der INNENSTADT die Bebauung um die KAISERSTRASSE, BAHNHOFSTRASSE und MARKT und in der NORDSTADT insbesondere die AGGERSTRASSE und GARTENSTRASSE. Ziel sollte es sein, die thermische Belastung innerhalb dieser Räume dauerhaft durch Maßnahmen zur Klimaanpassung (auch

im Bestand) zu reduzieren. Die Siedlungsräume sollten daher klimatisch aufwertend entwickelt und ihr Vegetationsanteil erhöht werden (mit mittlerer Priorität in der NORDSTADT und mit hoher Priorität in der INNENSTADT).

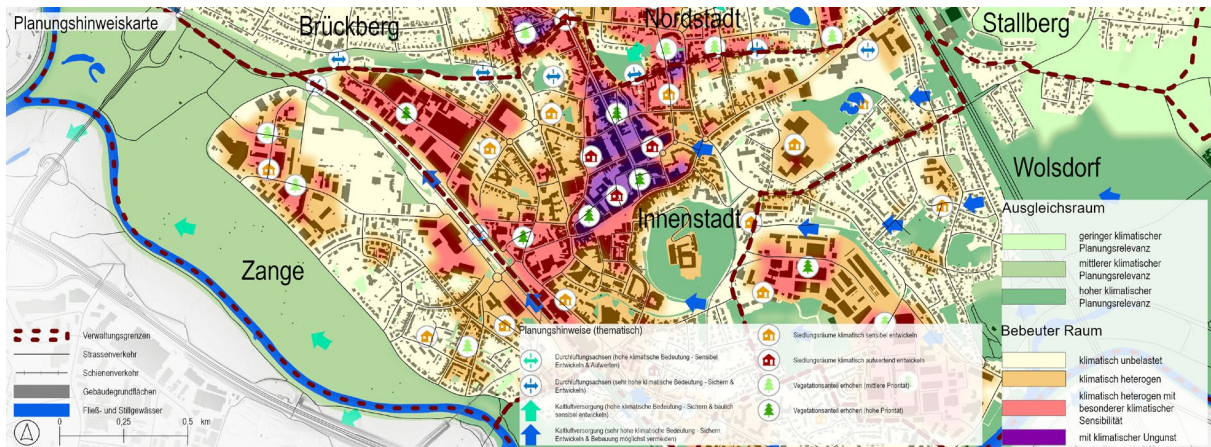


Abbildung 66: Planungshinweiskarte – Klassifizierung des Freiraums & Siedlungsraums nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, Innenstadtbereich

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Stadtklimaanalyse (SKA) stellt die Grundlage für eine zukünftige gezielte Klimaanpassung der Kreisstadt Siegburg dar und begegnet damit frühzeitig auf kommunaler Ebene einigen Anforderungen des im Dezember 2023 verabschiedeten bundesweiten Klimaanpassungsgesetzes (KAnG).

Da die Stadtklimaanalyse gis-basiert erstellt wurde und auch die Ergebnisse von verwendeten numerischen Simulationsprogrammen (z. B. KLAM_21 des DWD) ins Geoinformationssystem (GIS) überführt wurden, stehen final alle Daten der SKA der Kreisstadt Siegburg zur Integration ins kommunale GIS zur Verfügung.

Konzeptionell umfasst die für die Stadt erstellte Stadtklimaanalyse drei Teile. Der Hauptteil stellt den Kern der Stadtklimaanalyse dar. Dieser beschreibt, analysiert und bewertet den aktuellen klimatischen Bestand im Untersuchungsraum (u. a. über historische Klimadatenauswertungen mehrerer 30-jähriger Mittel und mehrerer Themenkarten) hinsichtlich unterschiedlicher klimatischer Aspekte, aber auch verschiedener stadtmorphologischer Charakteristika. Auf diese Weise wird flächendeckend die klimatische IST-Situation für den gesamten administrativen Raum, nicht nur den Siedlungsraum, der Kreisstadt Siegburg, abgebildet. Das Hauptprodukt der klimatischen Bestandsaufnahme stellt die Klimaanalysekarte (früher Klimafunktionskarte) dar. Entsprechend der VDI-Richtlinien (3787 Blatt 1) wird sie als thematische Fachkarte definiert, die sich grundsätzlich von amtlichen Festlegungskarten unterscheidet. Als thematische Fachkarte (oder auch „Planungsgrundlagenkarte“) gibt sie durch die flächenbezogene Visualisierung von Klimaeigenschaften und -phänomenen Aufschluss über alle klimatisch relevanten Belange eines Stadtgebietes. Die Darstellung und Berechnung der Klimaanalysekarte unterliegt aufgrund der Individualität der Untersuchungsräume keinem explizit durch den VDI festgelegten Maßstab. Neben der Darstellung und Bewertung des klimatischen Status Quo wird außerdem mittels der Auswertung von ausgewählten Klimaszenarien des Nordrhein-Westfalen Ensembles (RCP 4.5 und 8.5, langjährige Mittel 2031 – 2060 und 2071 – 2100) die mittel- und langfristig projizierte Entwicklung der Temperaturen, Niederschläge, klimatischen Wasserbilanz und Kenntagen (z.B. Heiße Tage, Eistage, Tropennächte) in der Region Siegburg beschrieben. Ergänzend wurden Mehrwerte durch weitere Analysen (z.B. zur Intensität und zum Strömungsfeld des Kaltluftvolumenstroms, zu Vegetationshöhen im Siedlungsraum) generiert, die bspw. im Kontext der Stadtentwicklungsplanung oder der Präventionsplanung bzw. der gezielten Entwicklung von Klimaanpassungsmaßnahmen, von Interesse sein können. Eine spezielle Karte zur mittleren Vegetationsdichte des Siedlungsraums ermöglicht der Stadt ein zukünftig unabhängiges Monitoring des gesamten städtischen Vegetationsbestands, vorausgesetzt die Datenauswertung (wie sie im Rahmen dieser Stadtklimaanalyse erfolgt ist) wird regelmäßig wiederholt. Basierend auf den Ergebnissen der (klimatischen) Bestandsanalyse sowie den Ergebnissen der Klimaprojektion wurde eine planungsrelevante klimatische Bewertung inkl. Handlungsempfehlung des administrativen Raums von Siegburg durchgeführt. Das Kernelement dieser Bewertung ist die Planungshinweiskarte. Sie transformiert die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Klimaanalysekarte sowie weiterer Analysen, Szenarien und Studien in planungsangepasste Aussagen hinsichtlich einer städtebaulichen, umweltplanungsrelevanten und zukunftsorientierten (klimaangepassten) Stadtentwicklung.

Durch die integrierte Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Thematiken (z. B. Hitze, Vegetationsabdeckung, Kaltluftentstehung und -transport) können synergetische, aber auch

konkurrierende Effekte - und die damit verbundenen Handlungsempfehlungen - in Bezug auf die kommunale Planung herausgearbeitet werden.

Abgeleitet wurden

- drei klimatisch wirksame Ausgleichsräume primär im Außenbereich (Gunstbereiche) und
- vier klimatische Wirkräume im Siedlungsbereich (Wirkungsräume).

Neben den genannten raumbezogenen Planungshinweisen wurden auch thematische Planungshinweise in Form von Piktogrammen in der Planungshinweiskarte ausgewiesen. Sie stellen konkrete Handlungsempfehlungen dar und werden aus den unterschiedlichen Themenkarten und der Klimaanalysekarte abgeleitet.

Hierbei ist anzumerken, dass die Planungshinweiskarte kein pauschales „Verhinderungsinstrument“ darstellt, sondern unterschiedlich hohe Ansprüche an eine klimaangepasste Entwicklungsplanung stellt. Auf der Maßstabsebene einer Stadtklimaanalyse werden entsprechende Handlungsempfehlungen in einem generellen Kontext (siehe technische Beschreibung der Planungshinweiskarte) und aufgrund der in diesem Maßstab abbildbaren lokalen Effekte / Situationen (z. B. bei Durchlüftungssachsen) getroffen. In einem höheren Auflösungsgrad verortete Individualmaßnahmen werden im Rahmen einer Stadtklimaanalyse nicht definiert, da zum einen die Betrachtungsebene bzw. Planungsebene geändert werden würde und zum anderen die Individualität des Raums (Lokalexpertise) nicht erfasst werden kann. Neben diesem Bericht zur Stadtklimaanalyse, einem Kurzbericht speziell für die Öffentlichkeitsarbeit und den bereits genannten GIS-Daten, stehen alle Karten- und Planwerke zusätzlich als A3 Karten mit allen Siedlungsbereichen von Siegburg zur Verfügung.

9 Anhang

9.1 Glossar

Begriff	Bedeutung
Absorption	wellenlängenabhängige Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, bei welcher Strahlungsenergie in Wärmeenergie überführt wird Die Absorption von Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche ist Ursache für die unterste Heizschicht der Atmosphäre als Energiequelle für alle atmosphärischen Bewegungsvorgänge.
Aerosole	Aerosole sind (meteorologisch gesehen) Bestandteile von Beimengungen der Atmosphäre. Sie beteiligen sich wesentlich am luftchemischen Wirkungskomplex und spielen bei Strahlungsprozessen (Absorption, Streuung, Extinktion) eine wichtige Rolle.
Albedo	Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0,3 z.B. reflektiert 30 % der einfallenden Strahlung und absorbiert 70 %. Je heller die Oberfläche, desto größer ist ihre Albedo.
Allochthone Witterung	"fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung, die durch mehr oder weniger unperiodische Änderungen der Wetterelemente (kein ausgeprägter Tagesgang) gekennzeichnet ist.
Autochthone Witterung	"eigenbürtige", durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Witterung, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist.
Bergwind	weht abends, nachts und in der Frühe. Nachts kühlt sich die Luft im Gebirge stärker ab als über der Ebene. Die vergleichsweise schwere Kaltluft fließt die Berghänge hinunter und weht zum Teil sehr kräftig durch die Täler hindurch.
Bioklima	Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus. Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden.
Eistag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt
Emission*	die Abstrahlung oder Aussendung elektromagnetischer Wellen oder Teilchen als Strahlung, ebenso wie der Ausstoß fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe in die Außenluft sowie in Wasser oder andere Umweltbereiche
Evaporation	Übergang des Oberflächenwassers in den gasförmigen Zustand durch Verdunstung
Flurwind*	eine thermisch bedingte kleinräumige Ausgleichsströmung zwischen einer Stadt und ihrer Umgebung
Frosttag	ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt
Globale Durchschnittstemperatur	die über die gesamte Erdoberfläche (Land/Wasser) gemittelte Temperatur in einem bestimmten Zeitraum.
Globalstrahlung	die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und (diffuser) Himmelsstrahlung
Hangwind*	Wind, der unter dem Einfluss der Tageserwärmung an Berghängen entsteht und tagsüber bergaufwärts (Hangaufwind), nachts bergabwärts (Hangabwind) weht. Hangwinde sind in der Regel bei einer ruhigen Strahlungswetterlage besonders gut ausgebildet.

Heißer Tag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt (früher auch Tropentag).
Hitzewelle	eine mehrtägige Periode mit ungewöhnlich hoher thermischer Belastung. Eine Hitzewelle ist ein Extremereignis, welches die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme und die Infrastruktur schädigen kann.
Immission*	Einwirkung von unmittelbar oder mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursachte Emissionen auf die Umwelt. Zu den Immissionen gehören vorwiegend Luftverunreinigungen, Geräusche, Gerüche, Erschütterungen, Licht, Strahlen und Wärme.
Interzeption	Anteil des Niederschlags (auch u.a. Schnee und Tau), der an den Pflanzen haften bleibt und dort wieder ungenutzt verdunstet
Klimafaktoren	(auch klimatologische Wirkungsfaktoren) sind Faktoren, welche die Klimaelemente (Temperatur, Luftfeuchte usw.) und damit das Klima eines Ortes beeinflussen.
Klimatop	Klimatisch räumliche Einteilung von Gebieten mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen hinsichtlich des thermischen Tagesgangs, der durch Bodenrauigkeitsänderungen bedingten Windfeldströmungen der topographischen Lage und / oder Exposition sowie der Art der realen Flächennutzung
Kaltluftabfluss	der nächtliche Abfluss von örtlich gebildeter Kaltluft, dabei wird genügend Gefälle vorausgesetzt - trifft insbesondere an unbewaldeten und unbebauten Hängen auf.
Kaltluftfluss	die in windschwachen, klaren Nächten hangabwärts strömende kalte Luft. Sie sammelt sich am Erdboden und ist dann schwerer als die wärmere Luft der Umgebung. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hängt von der Hangneigung, der Bodenrauigkeit und der Größe des Kaltluft-einzugsgebietes, das heißt von der Größe des Gebietes in dem Kaltluft produziert wird, ab.
Kaltluftstau	die abriegelnde Wirkung eines Hindernisses auf einen Kaltluftfluss. Die Kaltluft kann sich sowohl vor orografischen Hindernissen (z.B. Hügelrücken) als auch vor künstlichen Hindernissen (z.B. Bauwerke, Dämme) stauen.
Klimamodell*	mathematisches Gleichungssystem welches das Klima bzw. dessen Änderungen simuliert. Als Variablen dienen physikalische und chemische Beziehungen.
Klimaprojektion	Analyse der Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten auf das Klima der Erde unter Nutzung von Klimamodellen. Sie sind in der Lage alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre des Planeten, zu beschreiben. Mit ihnen können die beobachteten Änderungen des Klimas in der Erdgeschichte analysiert und nachvollzogen werden.
Kontinentalklima	Klima, welches charakteristisch für das Innere größerer Festlandsmassen ist. Im Allgemeinen ist das Kontinentalklima durch große jährliche und tägliche Schwankungsbereiche der Temperatur, eine geringe relative Feuchte sowie mäßigen oder geringen, unregelmäßig fallenden Niederschlag geprägt.
Lokalklima	Klima an einem konkreten Ort. Es ist eingebettet in das Regionalklima und wird zusätzlich durch Relief und Flächennutzung in der näheren Umgebung des Ortes bestimmt.
Makroklima	Klima, welches von großskaligen Prozessen geprägt ist

Maritimes Klima	Klima von Gebieten, die an die See bzw. das Meer angrenzen oder davon umgeben sind (auch ozeanisches Klima). Geringe Tages- und/oder Jahresgänge der Temperatur und hohe relative Luftfeuchte sind charakteristisch für das maritime Klima.
Mesoklima	Bereich, der zwischen dem Mikroklima und dem Makroklima liegt. Während das Makroklima hauptsächlich von großskaligen und das Mikroklima vor allem von kleinskaligen, lokalen Prozessen beeinflusst ist, ist es im Mesoklima eine Mischung von beiden. Damit umfassen die Skalen der mesoskaligen Phänomene etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000 km und eine typische Lebensdauer von einer Stunde bis hin zu einer Woche. Geländeform, Hangneigung und Beschaffung der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter.
Mikroklima	mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist.
Rauigkeit***	(auch Rauheit) bezeichnet die Unebenheit von Oberflächen
Regionalklima	eng verwandt mit der Begrifflichkeit Mesoklima. Dabei sind Phänomene mit sehr ähnlichen Raum- und Zeitskalen gemeint, die sowohl durch groß- als auch kleinskalige Prozesse beeinflusst werden, aber auch von regionalen Gegebenheiten wie der Geländeform und der Landnutzung abhängen. Beim Regionalklima, im Gegensatz zum Mesoklima, wird deutlicher der Bezug zu natur- oder kulturräumlichen Klimabesonderheiten hergestellt.
Resilienz**	Die Leistungsfähigkeit eines Systems Störungen zu absorbieren und sich in Phasen der Veränderung so neu zu organisieren, dass wesentliche Strukturen und Funktionen erhalten bleiben.
Retention**	Rückhaltevermögen von unterschiedlichen Oberflächen für flüssiges Wasser.
Sommertag	ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt
Städtische Wärmeinsel* ^L	ein typisches Merkmal des Stadtklimas, welches durch die Wechselwirkung mehrerer unterschiedlicher Effekte hervorgerufen wird. Durch die starke Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts werden die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer.
Strahlungsantrieb* ^S	Maß für die global gemittelten klimarelevanten Störungen des atmosphärischen Strahlungs- und Energiehaushaltes
Strahlungsbilanz*	Differenz zwischen Ein- und Ausstrahlung einer Fläche. Insbesondere terrestrische und solare Strahlung sind dabei von Bedeutung.
Strahlungswetterlage*	eine Form des Hochdruckwetters mit geringer Bewölkung und höchstens mäßigen Winden
Synoptik	ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt untersucht (Analyse oder Wetterlage).
Talwind	bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft im Gebirge stärker als über der Ebene. Dadurch steigt die Luft nach oben und der Luftdruck sinkt über dem Gebirge. Zum Ausgleich beginnt die Luft unterhalb der Gipfel von außen - also durch die Täler - ins Gebirge einzuströmen.

Tropennacht	eine Nacht (18 bis 06 UTC), in der das Minimum der Lufttemperatur $\geq 20\text{ °C}$ beträgt
Übergangsklima*	beschreibt den fließenden Übergang zwischen dem maritimen Klima und dem kontinentalen Klima. Das Übergangsklima kommt überwiegend in Europa vor. Daher ist der Westen dieses Klimas ozeanisch geprägt, während der Osten eher kontinental beeinflusst wird
Überwärmungsakkumulationseffekt* ^L	während längeren Hitzeperioden kann die nächtliche Abkühlung die erhöhte tägliche Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht mehr kompensieren, d.h. auch die Minima der nächtlichen Temperaturen steigen an
Urban Canopy Layer	Atmosphärenschicht zwischen Erdoberfläche und mittlerer Hausdachhöhe in der Stadt
Vulnerabilität**	der IPCC definiert Vulnerabilität als das Maß, zu dem eine Person, Region oder ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Dabei wird die Vulnerabilität bzw. Verwundbarkeit als eine Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungsfähigkeit verstanden.
Wind Chill-Effekt	Durch eine erhöhte Windgeschwindigkeit tritt in den Fällen eine Abkühlung im Hautbereich auf, in denen die Hauttemperatur über der Lufttemperatur liegt, der sogenannte Wind Chill-Effekt. Dieser Abkühlungseffekt verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit.
Windstärke	anhand der Auswirkungen des Windes auf die Wasseroberfläche oder auf Objekte an Land geschätzter Stärkewert. In der international vereinbarten 13-teiligen Beaufort-Skala (0 = Windstille bis 12 = Orkan) sind jedem Stärkewert Windgeschwindigkeitsbereiche zugeordnet.

Sofern nicht anders gekennzeichnet gilt als primäre Quelle das Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienst (DWD) (www.dwd.de/lexikon oder www.wetterlexikon.eu).

* Wetter-Lexikon von wetter.net - Q.met GmbH (<https://www.wetter.net/wetterlexikon>)

** Lexikon der Nachhaltigkeit der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (<https://www.nachhaltigkeit.info>)

*** Duden - Bibliographisches Institut GmbH (<https://www.duden.de>)

*^L Environmental Sciences Europe – Kuttler 2011 (<http://www.enveurope.com>)

*^S Spektrum – Lexikon der Geowissenschaften (www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften)

9.2 Literaturverzeichnis

- [1] N.N. (2023): Bundes-Klimaanpassungsgesetz. KAnG. In: Bundestag (Hrsg.): Bundesgesetzblatt.
- [2] LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2024): Klimaentwicklung und Klimaprojektionen in Nordrhein-Westfalen. Datengrundlage und Wissenschaftlicher Hintergrund der Klimaanpassungsstrategie. Recklinghausen.
- [3] Brienens, S.; Walter A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M.; Höpp, S.; Jensen, C.; Jochumsen, K.; Möller, J.; Krähenmann, S.; Nilson, E.; Rauthe, M.; Razafimaharo, C.; Rudolph, E.; Rybka, H.; Schade, N.; Stanley, K., 2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Experten Netzwerks.
- [4]] Hoffschröer, Holger; Heidorn, Anne; Bruns, Lena, (o.A.): Masterplan Grün. Gesamtstädtische Entwicklungsstrategie für die Grün- und Freiräume der Stadt Siegburg. Siegburg, Dortmund, Köln. Zugriff: <https://sessionnet-oparl.krz.de/oparl/bodies/1648/downloadfiles/a/00070385.pdf>.
- [5] Gräff, Hans-Jürgen; Salzer, Johannes; Loem, Oliver; Michali, Sandra; Haupter, Birgit; Peters, Lisa; Pennekamp, Sandra, (o.A.): Integriertes Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzept für die Kreisstadt Siegburg.
- [6] N.N. (2021): Berichte - Das Magazin des Difu. Deutsches Institut für Urbanistik, 2021. Jg. (3). Zugriff: <https://difu.de/publikationen>.
- [7] Dockhorn, Nathalie (2023): Hitzeaktionsplan Kreisstadt Siegburg.
- [8] Perter Hupfer, Wilhelm Kuttler (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 11. Auflage. SpringerLink Bücher.
- [9] Matzarakis, Andreas; Röckle, R.; Richter, C-J; Höfl, H-C; Steinicke, Wolfgang; Streifeneder, M.; Mayer, Helmut (2008): Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas - Am Beispiel von Freiburg im Breisgau. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 68. Jg., S. 334–340.
- [10] Kuttler, Wilhelm (2011): Climate change in urban areas. Part 2, Measures. Environmental Sciences Europe, 23. Jg. (1).
- [11] Bründl, W.; Mayer, H.; Baumgartner, A. (1986): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Grossstädten : Kennwort: Stadtklima Bayern ; Abschlussbericht zum Teilprogramm "Klimamessungen München". München.
- [12] EPA – U.S. Environmental Protection Agency, (o.A.): EPA 2008. Washington, DC. Zugriff: https://cfpub.epa.gov/roe/documents/eparoe_final_2008.pdf.
- [13] DWD – Deutscher Wetterdienst (o.J.): Wetter- und Klimalexikon. Hitzewelle. Zugriff: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Func-tions/glossar.html?lv3=624852&lv2=101094> [abgerufen am 7. 01. 2025].

- [14] Heidt, Volker; Neef, Marco (2008): Benefits of Urban Green Space for Improving Urban Climate. In: Carreiro, Margaret M.; Song, Yong-Chang; Wu, Jianguo (Hrsg.): Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives. New York, NY, S. 84–96.
- [15] Dimoudi, Argiro; Nikolopoulou, Marialena (2003): Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35. Jg. (1), S. 69–76.
- [16] Verkehrsministerium Baden-Württemberg, (o.A.): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- [17] Oke, T. R.; Mills, Gerald; Christen, Andreas; Voogt, James A. (2017): *Urban climates*. Cambridge.
- [18] Mayer, Helmut; Beckroege, Wolfgang; Matzarakis, Andreas (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report, 5. Jg., S. 265–268.
- [19] Kuttler, Wilhelm (2000): *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*.
- [20] VDI/DIN-(KRdL) – VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss (Hrsg.) (2015): *Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. 3787. Auflage.
- [21] Burghardt, René (2015): *Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors*. Kassel, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung.
- [22] René Burghardt (2014): *Freiräume in der Stadt. klimabewusste Stadtgestaltung*. Raum-Planung Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung, (Ausgabe 172). Zugriff: <https://ifr-ev.de/raumplanung/freiraeume-in-der-stadt/>.
- [23] Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V., (o.A.): *Stellungnahmen*. Zugriff: <https://www.dmg-ev.de/die-dmg/publikationen/stellungnahmen/> [abgerufen am 10/2018].
- [24] Frank, Walther (1975): *Raumklima und thermische Behaglichkeit. Literatúrauswertung durchgeführt im auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Berichte aus der Bauforschung, Heft 104*. Berlin.
- [25] DWD – Deutscher Wetterdienst, (o.A.): *DWD - Wir über uns*. Offenbach am Main.
- [26] Kaspar, F.; Müller-Westermeier, G.; Penda, E.; Mächel, H.; Zimmermann, K.; Kaiser-Weiss, A.; Deutschländer, T. (2013): *Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre*. *Advances in Science and Research*, 10. Jg. (1), S. 99–106.
- [27] *Hydrometeorologie* (2015): *Klimatische Wasserbilanz*. Berlin.
- [28] Wendling, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenz-Verdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. *Wasserwirtschaft*, 85E (12), S. 602–660.
- [29] DWD – Deutscher Wetterdienst (2013): *Windkarten und Winddaten für Deutschland. Bezugszeitraum 1981 – 2000*. Offenbach am Main. Zugriff: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/wind_parameters/resol_200x200/Wind1981-2000_Info.pdf.

- [30] Bundesregierung, Die (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- [31] CCCS – Copernicus Climate Change Service, (2019): CORDEX regional climate model data on single levels.
- [32] Gelhardt, Ulrike (2022): ReKliEs-HNR. Berechnung und Bereitstellung von Klimasimulationsdaten für hessische Naturräume. Darmstadt.
- [33] DWD – Deutscher Wetterdienst, (o.A.): Klimaszenarien (Zukunft). Zugriff: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_homenode.html;jsessionid=9D53FBDD5EB1E89142B8121C961E4AE4.live21063 [abgerufen am 30. 10. 2023].
- [34] Kreienkamp, Frank; Huebener, Heike; Linke, Carsten; Spekat, Arne (2012): Good practice for the usage of climate model simulation results - a discussion paper. Environmental Systems Research, 2012. Jg. Zugriff: <http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/1/1/9> [abgerufen am 7. 02. 2024].
- [35] Moss, R.; Edmonds, J.; Hibbard, K.; Manning, M.; Rose, S. K.; van Vuuren, D.; Carter T.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.; Mitchell, J.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.; Stouffer, R.; Thomson, A.; Weyant, J.; Wilbanks, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463. Jg. (7282), S. 747–756.
- [36] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Geneva.
- [37] Katzschner, Lutz; Thorsson, Sofia (2009): Microclimatic Investigations as Tool for Urban Design. Seventh Int Conf. Urban Clim.
- [38] Lohmeyer, A. (Hrsg.) (2008): Lohmeyer, A. (2008): Klimafunktions- und Klimafunktions- und Klimaplanungskarten, Bd. 20.
- [39] Oke, T. R. (2006): Towards better scientific communication in urban climate. Theoretical and Applied Climatology, 84. Jg. (1-3), S. 179–190.
- [40] Oke, O. E.; Oso, O. M.; Logunleko, M. O.; Uyanga, V. A.; Akinyemi, F.; Okeniyi, F. A.; Akosile, O. A.; Baloyi, J. J.; Onagbesan, O. M. (2022): Adaptation of the White Fulani cattle to the tropical environment. Journal of Thermal Biology [abgerufen am 03/2025].
- [41] Gartland, Lisa (2008): Heat islands. Understanding and mitigating heat in urban areas. London. Zugriff: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=430109>.
- [42] Ng, Edward (Hrsg.) (2015): The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning. A methodology for sustainable urban planning. Abingdon, Oxon, New York.
- [43] DWD, (03/2016): Informationsblatt zum Kaltluftabflussmodell KLAM_21.
- [44] N.N., (o.A.): Siegburg – Zahlen, Daten und Fakten. Zugriff: <https://stadistik.de/stadt/siegburg-05382060/#:~:text=Die%20Stadt%20Siegburg%20liegt%20im%20Rhein-Sieg-Kreis%20im%20Bundesland,auf%20Platz%205.003%20der%20f%C3%A4chenreichsten%20Gemeinden%20in%20Deutschland.> [abgerufen am 30. 07. 2025].

- [45] Stadt Siegburg (1994): Rat der Kreisstadt Siegburg. Hauptsatzung der Kreisstadt Siegburg., 1994.
- [46] N.N., (o.A.): Stadt Siegburg. Bestandsstatistik. Zugriff: <https://siegburg.de/static/web/statistiken/einwohnerbestand.pdf>.
- [47] Information und Technik Nordrhein-Westfalen - Statistisches Landesamt, 02/2025): Kommunalprofil Siegburg, Stadt. Zugriff: <https://statistik.nrw/sites/default/files/municipalprofiles/I05382060.pdf> [abgerufen am Juli 2025].
- [48] N.N., (o.A.): Topographic Map [abgerufen am 2023].
- [49] Kultur. Landschaft. Digital., (o.A.): Landschaftsverband Rheinland (LVR). Michaelsberg. [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [50] Meynen, E.; Schmithüsen, J. (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands: 1959-1962, Bd. 2. Zugriff: <https://books.google.de/books?id=voCxmAEACAAJ>.
- [51] Ssymank, A. Natur und Landschaft 69 (1994): Neue Anforderungen im europäischen Naturschutz: Das Schutzgebietssystem Natura 2000 und die FFH-Richtlinie der EU. Natur und Landschaft, 69. Jg. (9), S. 395–406.
- [52] BfN – Bundesamt für Naturschutz, (o.A.): Agger [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [53] LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, o.A.): Naturschutzgebiet Aggeraue zwischen Lohmar und Siegburg (SU-092). Naturschutzgebiete und Nationalpark Eifel in NRW. [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [54] BfN – Bundesamt für Naturschutz, (o.A.): Vogelschutzgebiet "Wahner Heide" [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [55] BfN – Bundesamt für Naturschutz, (o.A.): Schutzgebiete in Deutschland. [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [56] Rhein-Sieg-Kreis, (o.A.): Naturschutzgebiet Siegaue – Habitat für gefährdete Vogelarten. [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [57] BfN – Bundesamt für Naturschutz, (o.A.): Sieg (- Natura 2000 Gebiete) [abgerufen am 13. 05. 2024].
- [58] Endlicher, Wilfried; Hendl, Manfred (2003): Klimaspektrum zwischen Zugspitze und Rügen. In: Leibniz-Institut für Länderkunde (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Klima, Pflanzen- und Tierwelt, S. 32–33.
- [59] DWD – Deutscher Wetterdienst, (o.A.): Climate Data Center (CDC). Klimadaten zum direkten Download. Zugriff: https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdc/cdc_ueberblick-klimadaten.html?nn=17626 [abgerufen am 8. 12. 2023].
- [60] Graw, K.; Grätz, A.; Matzarakis, A. (2019): Die Bioklimakarte von Deutschland: Zeitraum 1981 bis 2010. Gefahrstoffe, 79. Jg. (07-08), S. 269–275.
- [61] Lauer, Wilhelm; Frankenberg, Peter (1979): Ökoklimatische Überlegungen zum Problem der Humidität/Aridität. Ein Beitrag zur Klassifikation der Klimate. Göttingen.

- [62] DWD – Deutscher Wetterdienst, (o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Klimatologische Kenntage. Offenbach am Main. Zugriff: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101452&lv2=101334> [abgerufen am 8. 12. 2023].
- [63] Deutschländer, T.; Mächel, H. (2017): Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg, S. 47–56.
- [64] Hansen, P.; Fuquay, J. (2011): Stress in Dairy Animals | Heat Stress: Effects on Reproduction. In: Lean, I. (Hrsg.): Encyclopedia of Dairy Sciences, S. 567–574.
- [65] Gonzalez, D. (Hrsg.) (2016): Plant Transcription Factors.
- [66] Wills, S. (2016): Extremes of Temperature: Hyperthermia. In: Payne-James, J.; Byard, R. (Hrsg.): Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine, S. 476–485.
- [67] Bunz, M.; Mücke, H. (2018): Correction: Klimawandel – physische und psychische Folgen. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, 61. Jg. (1), S. 98.
- [68] Akbari, H.; Matthews, D.; Seto, D.; Sherbinin, K. de; Solecki, W.; Grünstei, V.; Rosenzweig, C.; Gaffin, S. (2010): Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation. Energy and Emissions Control Technologies, S. 511–523.
- [69] Pfahl, S.; Domeisen, D.; Wright, J. (2018): Impacts of Blocking on European Climate. Reviews of Geophysics, (56 Nr.3).
- [70] Fenner, Daniel; Mücke, Hans-Guido; Scherer, Dieter (2015): Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins. Berlin, Heidelberg.
- [71] C3S – Copernicus Climate Change Service, (2024): European State of the Climate 2023.
- [72] DWD – Deutscher Wetterdienst, (o.A.): Wetter- und Klimalexikon. Tropennächte. Offenbach am Main. Zugriff: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102802> [abgerufen am 31. 10. 2023].
- [73] Fuss, Sabine; Canadell, Josep G.; Peters, Glen P.; Tavoni, Massimo; Andrew, Robbie M.; Ciais, Philippe; Jackson, Robert B.; Jones, Chris D.; Kraxner, Florian; Nakicenovic, Nebosja; Le Quéré, Corinne; Raupach, Michael R.; Sharifi, Ayyoob; Smith, Pete; Yamagata, Yoshiki (2014): Betting on negative emissions. Nature Climate Change, 4. Jg. (10), S. 850–853.
- [74] Meteoblue, (o.A.): Simulierte historische Klima- und Wetterdaten für Siegburg.
- [75] Katzschner, Lutz (2019): Bedeutung der Kaltluft und Ventilation in Städten. In: Lozán, José L.; Breckle, Siegmund-Walter; Graßl, Hartmut; Kuttler, Wilhelm; Matzarakis, Andreas (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Städte. Wissenschaftliche Fakten. Warnsignal Klima. Hamburg.
- [76] Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International journal of biometeorology, 43. Jg. (2), S. 71–75.

- [77] Wang, Jinping; Church, John A.; Zhang, Xuebin; Chen, Xian Yao (2021): Reconciling global mean and regional sea level change in projections and observations. *Nature communications*, 12. Jg. (1), S. 990.

9.3 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Übersicht der Klimatebenen mit dem korrespondierenden (typischen) Planungskontext. Je nach klimatischer Ebene unterscheiden sich Einflussgrößen, Fragestellungen, Bezugsraum und Anwendungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 3)5
- Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der typischen Durchschnittstemperaturen (Sommer, aber nicht während einer Hitzewelle) am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit von der Landnutzung (unterschiedliche Stadtcharakteristika). Die orangen Graphen stellen die durchschnittlichen Oberflächen- (durchgehend) und Lufttemperaturen (gestrichelt) am Tag dar, die blauen Graphen die durchschnittlichen Temperaturen bei Nacht. Hierbei zeigt sich deutlich die unterschiedliche Wärmespeicherkapazität verschiedener Stadtstrukturen bzw. Materialien oder Objekte. Beispiel Stillgewässer: im Gegensatz zu anderen Landnutzungen liegt die durchschnittliche Temperatur eines Wasserkörpers am Tag unter der durchschnittlichen Lufttemperatur. Auf Grund der guten Wärmespeicherkapazität des Wassers fällt sie in der Nacht, ohne Strahlungseintrag, aber nur kaum ab. Ein gegensätzliches Beispiel stellen Industrieanlagen oder -hallen dar. In der Regel bestehen die Dächer dieser Bauten aus Metall und erhitzen sich am Tag, bei Strahlungseintrag, sehr stark. Nachts kühlen sie sich dagegen recht schnell ab, u.a. auch weil die Gebäude keine Massivbauten sind und keine große Masse besitzen [12] (überarbeitet).7
- Abbildung 3: Schematische Darstellung der städtischen Wärmeinsel. Zwischen dem wärmeren Siedlungsraum der Stadt und dem kühleren Umland bildet sich, vorzugsweise bei wolkenfreien und windschwachen Wetterbedingungen während der Nacht, eine Lufttemperaturdifferenz aus. Je weniger „kühlende“ Faktoren (Vegetation, unversiegelte Flächen, Be- und Durchlüftungssachsen) und desto mehr Baumassen in ungünstiger Anordnung vorhanden sind, desto stärker i.d.R. der städtische Wärmeinseleffekt.8
- Abbildung 4: Schematische Darstellung der Windprofile über dem Stadtkern, dem Stadtrand und dem freien Land (Umland). Das Windprofil wird im urbanen Bereich deutlich stärker beeinflusst bzw. verformt als im Umland. Z_0 beschreibt die Rauigkeitslänge in Metern, Z_d die Nullpunktverschiebung in Metern, u_z die Windgeschwindigkeit (vertikale Streckung des Profils) und den Raum unterhalb der mittleren Gebäudehöhe (UC).10
- Abbildung 5: Darstellung eines Flurwindsystems am Beispiel des Stadt-Umland-Windsystems. Während einer strahlungsarmen Nacht steigen die wärmeren "Stadtluft"-Massen auf (geringere Dichte) um nach Abkühlung (höhere Dichte) wieder abzusinken. Zusammen mit den nach Sonnenuntergang entstehenden Kaltluftmassen des ruderalen Raums etabliert sich so ein sensibles Flurwindsystem (Sogwirkung durch den Luftdruckgegensatz).13
- Abbildung 6: Schematische Darstellung eines der Orographie folgenden Kaltluftabflusses (helle Pfeile). Ähnlich einer Flüssigkeit versucht die Kaltluft Hindernisse wie bspw. Gebäude zu umströmen. Orthogonal zum Kaltluftstrom ausgerichtete größere Hindernisse, wie bspw. Gebäuderiegel (rechts) bremsen bzw. stauen die Kaltluft...14
- Abbildung 7: Kaltluft verhält sich wie eine zähe Flüssigkeit und folgt, sofern vorhanden, dem Gefälle. Stößt die Kaltluft auf Hindernisse versucht sie sie zu umströmen oder wird gestaut, bis die Kaltluftschichtdicke so mächtig ist, dass das Hindernis überströmt werden kann.14

Abbildung 8: Die unterschiedlichen Planungsebenen mit ihrem administrativen Bezug sowie den korrespondierenden klimatischen Fragestellungen und den möglichen Auflösungen.....	17
Abbildung 9: Der thermische Wirkungskomplex nach der VDI-RL 3787 Blatt 2. Schematische Darstellung der unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken, wie bspw. direkte Sonneneinstrahlung oder Windgeschwindigkeit, aber auch Wärmeabstrahlungen von Umgebungsoberflächen.	18
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Auswertungssystematik klimatischer historischer und projizierter Daten; die Pfeile ermöglichen einen Überblick, welcher klimatischer Parameter für welchen Bezugsraum und mit welcher Datengrundlage ausgewertet wurde.	20
Abbildung 11: Schematische Darstellung der grundsätzlichen Herleitung der Klimaanalysekarte und der Planungshinweiskarte. Die Eingangsdaten bilden diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen ab, die Themenkarten repräsentieren (klimarelevante) räumliche Ableitungen.....	25
Abbildung 12: Die unterschiedlichen Daten und Analysen der Stadtklimaanalyse ermöglichen konkrete Aussagen zu unterschiedlichsten Fragestellungen und klimatischen Aspekten im Rahmen einer zukunftsorientierten Stadtentwicklung.	26
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GIS. Unterschiedlichste Eingangsdaten (Raster- oder Vektordaten) können miteinander verschnitten und analysiert werden, um ein möglichst genaues digitales Abbild der Realität zu schaffen.....	27
Abbildung 14: Ausschnitt aus den Naturräumlichen Großregionen ([50], oben) sowie den Großlandschaften ([51], unten) Deutschlands.....	30
Abbildung 15: Auszug aus der interaktiven Karte Schutzgebiete in Deutschland des BfN [52] für den administrativen Bereich der Stadt Siegburg. Naturschutzgebiete sind gefüllt rot und FFH-Gebiete braun schraffiert dargestellt.	31
Abbildung 16: Einordnung der klimatischen Untersuchungsebenen in Makro-, Meso- und Mikroklima	32
Abbildung 17: Klimatische Gliederung (1991-2020) der Region des Untersuchungsgebietes Siegburgs (eigene Darstellung nach [58] mit Daten von [59]).....	33
Abbildung 18: Bioklimakarte für den Zeitraum 1981-2010 [60]. Einstufung des DWD hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Bevölkerung, unterteilt in Wärmebelastung und Kältereiz. Zwecks Vergleichbarkeit wurden neben dem Untersuchungsgebiet Siegburg zusätzlich andere deutsche Großstädte in dem Diagramm ergänzt.	34
Abbildung 19: Darstellung der regionalen niederschlags- und temperaturbezogenen Unterschiede der deutschlandweiten Kommunen für das ganze Jahr für das langjährige Mittel (1991-2020).	35

Abbildung 20: Darstellung der regionalen niederschlags- und temperaturbezogenen Unterschiede der deutschlandweiten Kommunen für die Sommermonate (Juni, Juli, August) für das langjährige Mittel (1991-2020).....	35
Abbildung 21: Darstellung der Lufttemperatur (2 m über Grund) in einer Auflösung von 1 km. Die Werte repräsentieren das langjährige Mittel (1991-2020) der Sommermonate Juni, Juli und August.....	39
Abbildung 22: Darstellung der lokalen (Fokusraum) und regionalen (Übersicht) Windverhältnisse des Untersuchungsgebietes Sieburgs für das langjährige Mittel 1980-2000. In der Farbskala geben blauviolette Töne Windgeschwindigkeiten ab 1 m/s an, gelbrote Töne zeigen Windgeschwindigkeiten bis 5 m/s; die Siedlungsflächen der umliegenden Gemeinden werden schraffiert dargestellt (eigene Darstellung mit Daten von [29])......	43
Abbildung 23: Schematische Darstellung eines BlueSpots und der definierenden Parameter.	50
Abbildung 24: Themenkarte Starkregen – BlueSpot-Analyse: Tiefenausprägungen natürlicher und künstlicher Mulden und Senken. Flächige Darstellung für den administrativen Raum von Sieburg, die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgte über den administrativen Raum von Sieburg hinaus. Die farbliche Codierung gibt unterschiedliche Tiefenausprägungen der BlueSpots wieder, von 0,01 m (hellgrün) bis >2,5 m (dunkelviolet). Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....	51
Abbildung 25: Themenkarte Starkregen, Innenstadtbereich – BlueSpot-Analyse: Tiefenausprägungen natürlicher und künstlicher Mulden und Senken.....	52
Abbildung 26: Themenkarte Starkregen – BlueSpot-Analyse: Überlaufverhalten nach Niederschlagsmengen. Flächige Darstellung für den administrative Raum von Sieburg, die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgte über den administrativen Raum von Sieburg hinaus. Die farbliche Codierung gibt unterschiedliche Niederschlagsmengen [mm/cm] wieder, die den BlueSpot zum Überlaufen bringen, von < 20 mm (rot) bis kein Überlauf < 100 mm (rauchblau). Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....	53
Abbildung 27: Themenkarte Starkregen, Innenstadtbereich – BlueSpot-Analyse: Überlaufverhalten nach Niederschlagsmengen.....	54
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Baulich-Räumlichen Offenheit (SkyView-Faktor). Der SVF wird durch einen Wertebereich zwischen Null (vollständige Geschlossenheit) und Eins (vollständige Offenheit) beschrieben.	56
Abbildung 29: Themenkarte Baulich-Räumliche Offenheit: Grad der baulich-räumlichen Offenheit auf Grundlage von Bebauung und Topographie. Flächige Darstellung für den administrativen Raum von Sieburg. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedliche Offenheit wieder. Ein stark eingeschränktes Sichtfeld stellt eine niedrige baulich-räumliche Offenheit (dunkelviolet) dar, offene Bereiche werden in blassblau dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.	57
Abbildung 30: Themenkarte Baulich-Räumliche Offenheit, Innenstadtbereich: Grad der baulich-räumlichen Offenheit auf Grundlage von Bebauung und Topographie	58

- Abbildung 31: Schematische Darstellung unterschiedlicher Baumassenvolumendichten, über die sich Rückschlüsse auf die Baumassen und die bauliche Dichte der Gebäude innerhalb des Siedlungsraums zueinander ableiten lassen.....59
- Abbildung 32: Themenkarte Baumassen – Mittlere Baumassenvolumendichte. Die mittlere Baumassenvolumendichte [m^3/m^2 je ha] wird flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedliche Werte wieder. Eine niedrige Baumassenvolumendichte wird in hellgelb und eine hohe Baumassenvolumendichte in dunkelviolet dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung...60
- Abbildung 33: Themenkarte Baumassen – Mittlere Baumassenvolumendichte, Innenstadtbereich61
- Abbildung 34: Schematische Darstellung zur Erfassungsmethodik von Vegetation. Auf Grund eines höheren Chlorophyllanteils (Blattgrün) reflektieren vitale Grünstrukturen stärker im Nahinfrarotbereich als geschädigte, während gleichzeitig der Rotbereich des sichtbaren Lichts weniger stark reflektiert wird.62
- Abbildung 35: Themenkarte Vegetationserfassung – Mittlere Vegetationsdichte: Vegetationsanteil. Die mittlere Vegetationsdichte pro Hektar wird flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedlichen Dichten wieder. Ein niedriger Vegetationsanteil wird in violett und ein hoher Vegetationsanteil in dunkelgrün dargestellt. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....63
- Abbildung 36: Themenkarte Vegetationserfassung – Mittlere Vegetationsdichte, Innenstadtbereich64
- Abbildung 37: Themenkarte Vegetationserfassung – Vegetationshöhen. Die Vegetationshöhen werden zusätzlich zur Aufnahme der Vegetationsstrukturen über das Digitale Oberflächenmodell abgeleitet und flächendeckend für den für den administrativen Raum von Siegburg dargestellt. Die farbliche Codierung gibt die unterschiedlichen Höhen wieder, bis 2,5 m in blassgrün und bis 40 m in braun. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung...65
- Abbildung 38: Themenkarte Vegetationserfassung – Vegetationshöhen, Innenstadtbereich.66
- Abbildung 39: Schematische Darstellung der zwei Bewegungsarten von Kaltluft, die druckinduzierte (oben) und die topographische bedingte Kaltluftbewegung (unten).67
- Abbildung 40: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 30 min Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolet ($> 65 \text{ m}$) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05 \text{ m/s}$. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.68
- Abbildung 41: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 30 min Simulation, Innenstadtbereich69

- Abbildung 42: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 2 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolet (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05$ m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.70
- Abbildung 43: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 2 Std. Simulation, Innenstadtbereich.....70
- Abbildung 44: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 4 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolet (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05$ m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.71
- Abbildung 45: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 4 Std. Simulation, Innenstadtbereich.....71
- Abbildung 46: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 4 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt das Ausmaß der Kaltluftzufuhr, das heißt, wie viel Kaltluft in einer bestimmten Zeiteinheit durch ein Gebiet strömt. Eine Darstellung des Strömungsfeldes erfolgt erst ab einem Volumen von > 5 m^3/s . Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....72
- Abbildung 47: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 4 Std. Simulation, Innenstadtbereich73
- Abbildung 48: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 6 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt, die Darstellung erfolgt für den administrativen Raum. Niedrige Kaltluftschichtdicken werden in hellrosa und hohe Kaltluftschichtdicken in dunkelviolet (> 65 m) dargestellt. Eine Darstellung des nächtlichen bodennahen Windfeldes erfolgt erst ab Geschwindigkeiten von $0,05$ m/s. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.73
- Abbildung 49: Themenkarte Kaltluftentstehung und -transport – Kaltluftschichtdicke und nächtliches Windfeld: nach 6 Std. Simulation, Innenstadtbereich.....74
- Abbildung 50: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 6 Std. Simulation. Die Simulation wird für einen weiteren Umgriff als den administrativen Raum von Siegburg durchgeführt. Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt das Ausmaß der Kaltluftzufuhr, das heißt, wie viel Kaltluft in einer bestimmten Zeiteinheit durch ein Gebiet strömt. Eine Darstellung des

Strömungsfeldes erfolgt erst ab einem Volumen von $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....	75
Abbildung 51: Themenkarte Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom – Kaltluftmassenbewegung [m^3/s]: nach 6 Std. Simulation, Innenstadtbereich	75
Abbildung 52: Schematische Darstellung des städtischen Wärmeinseleffekts, der u.a. aus höheren Lufttemperaturen im dichter bebauten Siedlungsraum entsteht.....	76
Abbildung 53: Themenkarte Nächtliche bodennahe Lufttemperatur – Städtische Wärmeinsel: berechnet für einen regionaltypischen Heißen Tag. Die Berechnung erfolgt für 04:00 Uhr nachts UTC (Zeitpunkt der größten Abkühlung), an einem Heißen Tag ($\text{LT}_{\text{max}} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) mit einem LT_{max} von $32,2 \text{ }^\circ\text{C}$ und LT_{min} von $16 \text{ }^\circ\text{C}$ (nachts) gemittelten für die letzten 30 Jahre. Die Berechnung erfolgt flächendeckend für den administrativen Raum von Siegburg. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.	77
Abbildung 54: Themenkarte Nächtliche bodennahe Lufttemperatur – Städtische Wärmeinsel: berechnet für einen regionaltypischen Heißen Tag, Innenstadtbereich.....	77
Abbildung 55: Klimaanalysekarte – Klimatopeinteilung mit kontinuierlichem Übergang nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Die Darstellung erfolgt flächendeckend für den administrativen Raum von Siegburg. Dargestellt werden sechs Klimatope sowie als Zusatzinformation die Intensität des Kaltluftvolumenstroms und sein Strömungsfeld. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.	81
Abbildung 56: Klimaanalysekarte – Klimatopeinteilung mit kontinuierlichem Übergang nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, Innenstadtbereich	82
Abbildung 57: Abbildung der Temperaturveränderungen seit dem Jahr 1850 und Darstellung des projizierten Verlaufs unterschiedlicher Klimaszenarien [73]. Die für Siegburg ausgewerteten RCPs 4.5 und 8.5 sind orange bzw. rot dargestellt.....	84
Abbildung 58: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur (Gesamtjahr) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts).	86
Abbildung 59: Darstellung der bodennahen Lufttemperatur (Sommer) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031-2060 (links) und 2071-2100 (rechts).....	87
Abbildung 60: Darstellung der Niederschlagssummen (Sommermonate) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 – 2100 (rechts).....	88
Abbildung 61: Darstellung der Heißen Tage ($\text{LT}_{\text{max}} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 – 2100 (rechts).....	89
Abbildung 62: Darstellung der Änderungssignale der Tropennächte ($\text{LT}_{\text{min}} \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$) im projizierten RCP 8.5 für die 30-jährigen Mittel 2031 - 2060 (links) und 2071 – 2100 (rechts) zu 1971-2000. Die historische Anzahl der Tropennächte in Deutschland werden nicht systematisch vom DWD erhoben, weshalb hier lediglich die Änderungssignale darstellbar sind. Die Werte geben die Zunahme gegenüber der Referenzperiode (1971-2000) an.	90
Abbildung 63: Klimatische Gliederung von NRW. Die flächige Einfärbung bezieht sich auf die Klimaparameter Niederschlagssumme (Sommermonate) und Heiße Tage im	

historischen Mittel. Die Konturen symbolisieren die VWG mit den größten projizierten klimatischen Veränderungen (>66 %) bis zum Jahr 2100 im RCP 8.5. .93

Abbildung 64: Übersicht der Planungshinweisen in der Planungshinweiskarte zu unterschiedlichen Themenbereichen.95

Abbildung 65: Planungshinweiskarte – Klassifizierung des Freiraums & Siedlungsraums nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Flächendeckend wird der administrative Raum von Siegburg in Ausgleichsräume mit unterschiedlichen klimatischen Planungsrelevanzen (Grüntöne) und Bebaute Räume mit unterschiedlichen klimatischen Eigenschaften und Belastungen (hellgelb, orange, rot, violett) unterteilt. Über Piktogramme werden zusätzliche Planungshinweise (verschiedener Themenfelder) für bestimmte Bereiche definiert. Die Karte steht mit technischer Beschreibung ebenfalls im A3-Format zur Verfügung.....99

Abbildung 66: Planungshinweiskarte – Klassifizierung des Freiraums & Siedlungsraums nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, Innenstadtbereich100

9.4 Tabellenverzeichnis

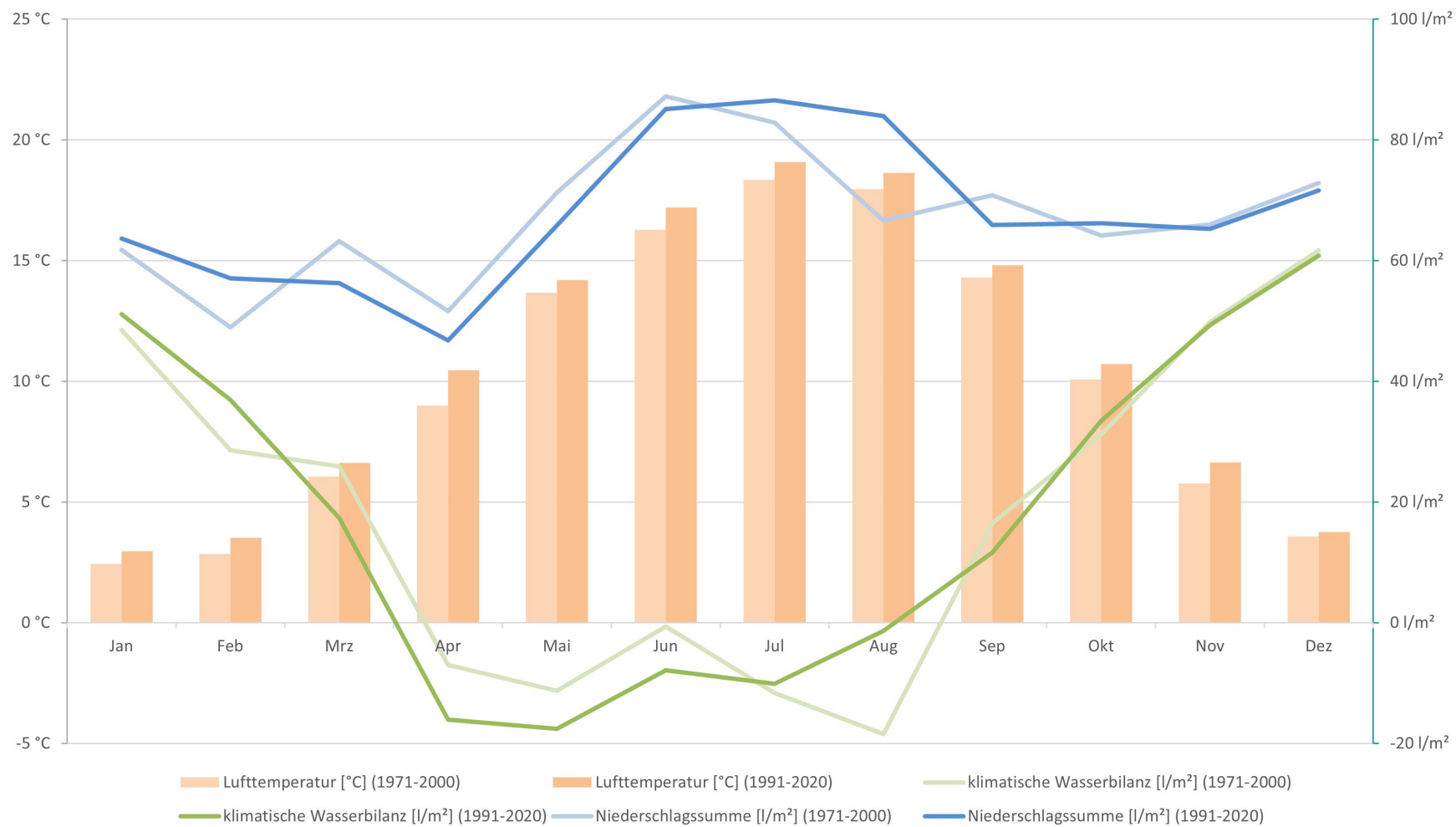
Tabelle 1: Beispiele für typische (anthropogene) Modifikationen / Einflüsse (linke Spalte) und deren (Aus-)Wirkungen / Risiken (rechte Spalte) im städtischen Raum.	6
Tabelle 2: Beispiele für Rauigkeitslängen und Nullpunktverschiebungen unterschiedlicher Oberflächen (nach [17])	11
Tabelle 3: Strömungsregime mit zugehörigen Höhen (H)-Weiten (W)-Verhältnissen und grafischen Beispielen.....	12
Tabelle 4: Grundlegende klimatische Aspekte und deren Ursprung bzw. ihre Abhängigkeiten, die zur Bewertung der Klimafunktionen herangezogen werden.....	23
Tabelle 5: Übersicht zur Flächenverteilung (Landnutzung) des administrativen Raums von Siegburg [47]	29
Tabelle 6: Wertebereiche der verschiedenen Code-Kombinationen (1 bis 4 und a bis d) aus den nachfolgenden Abbildungen	34
Tabelle 7: Übersicht zu den ausgewerteten klimatischen Parametern innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Stadt Siegburg für die historischen Zeiträume 1971-2000 und 1991-2020 sowie im Vergleich mit Nordrhein-Westfalen	36
Tabelle 8: Auswertung der Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz für das 30-jährige Mittel (1971 – 2000), mit Darstellung des Änderungssignals zum jüngsten 30-jährigen Mittel (1991 – 2020).	38
Tabelle 9: Typische temperaturbezogene Kenntage mit ihren zugehörigen Definitionen, die im Rahmen der Stadtklimaanalyse Siegburg ausgewertet wurden	40
Tabelle 10: Historische Entwicklung der typischen Heißen Tage für Siegburg.....	42
Tabelle 11: Dynamik der Windhauptkomponenten im Jahresverlauf für die Tagessituationen (oben) und die Nachtsituation (unten) an den ausgewerteten DWD-Stationen „Königswinter-Heiderhof“ und „Flughafen Köln/Bonn“	45
Tabelle 12: Tabellarische Zusammenfassung der für das RCP 8.5 (Zeiträume: 2031-2060 / 2071-2100) ausgewerteten Parameter Lufttemperatur, Kenntage, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz sowie dem jeweiligen Änderungssignal (Δ) zum historischen (projizierten) 30-jährigen Mittel (1971-2000).....	85
Tabelle 13: Tabellarische Zusammenfassung der für das RCP 4.5 (Zeiträume: 2031-2060 und 2071-2100) ausgewerteten Parameter Lufttemperatur, Kenntage, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz sowie dem jeweiligen Änderungssignal (Δ) zum historischen (projizierten) 30-jährigen Mittel (1971-2000).....	91

9.5 Diagrammverzeichnis

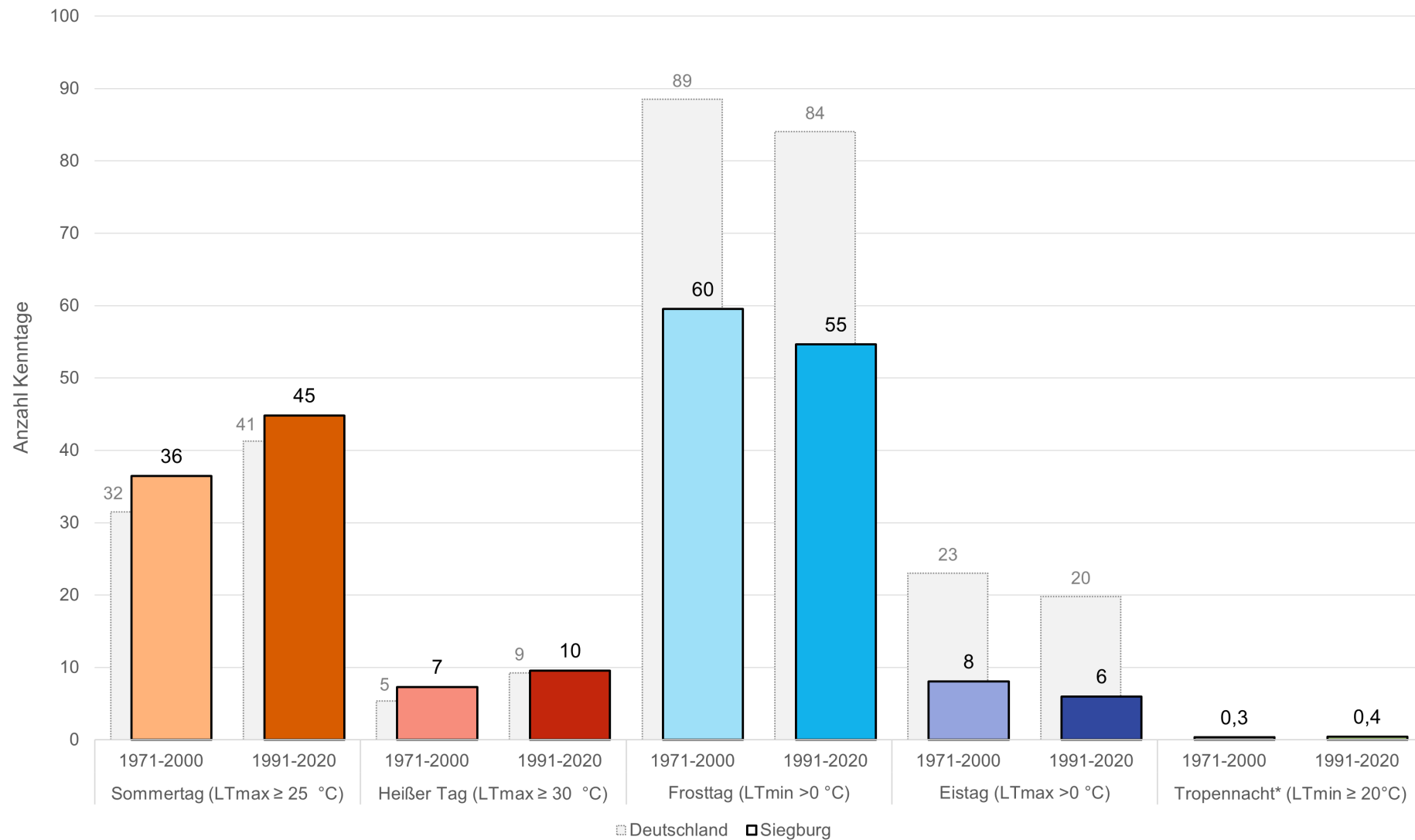
- Diagramm 1: Historische Dynamik (1971 – 2000) der klimatischen Parameter Lufttemperatur (orange, in °C), Niederschlag (blau) und klimatische Wasserbilanz (grün, in l/m²) innerhalb der VWG Siegburg, aufgeschlüsselt nach Monaten Eine größere Abbildung des Diagramms findet sich im Anhang.37
- Diagramm 2: Darstellung der klimatischen Kenntage des jüngsten 30-jährigen Mittels für die Kreisstadt Siegburg (bunte Säulen) und im deutschlandweiten Vergleich (graue Säulen). Bei den hitzebezogenen Kenntagen (Sommertage und Heiße Tage) liegt Siegburg nur leicht über dem deutschen Durchschnitt. Bei den frostbezogenen Kenntagen (Frosttage und Eistage) liegt Siegburg hingegen deutlich unter dem deutschen Durchschnitt. Auf Grund der von den übrigen Kenntagen abweichenden Erfassungsmethode für Tropennächte liegen hier keine Durchschnittswerte für Deutschland vor. Eine größere Abbildung des Diagramms findet sich im Anhang. ...41
- Diagramm 3: Darstellung der Windstärken in Abhängigkeit zu den Jahreszeiten und Tages- und Nachtzeiten an den DWD-Stationen (ID 603 und 2667) in Siegburg.44
- Diagramm 4: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an den DWD-Messstationen „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667, rechts) und „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603, links) im Jahresdurchschnitt (eigene Darstellung nach Daten von [20]).45
- Diagramm 5: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Tagessituation (8-18 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [20])46
- Diagramm 6: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Tagessituation (8-18 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [20])47
- Diagramm 7: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Königswinter-Heiderhof“ (ID 603) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Nachtsituation (22-04 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [20])48
- Diagramm 8: Vergleich der regionalen Windverhältnisse (Windstärke und -richtung) an der DWD-Messstation „Flughafen Köln/Bonn“ (ID 2667) in Abhängigkeit der Jahreszeiten für die Nachtsituation (22-04 Uhr) (eigene Darstellung nach Daten von [20])49

9.6 Abbildungen und Diagramme

Langjährige klimatische Dynamik (30-jähriges Mittel) im Jahresverlauf
innerhalb der VWG Siegburg
für die klimatischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz

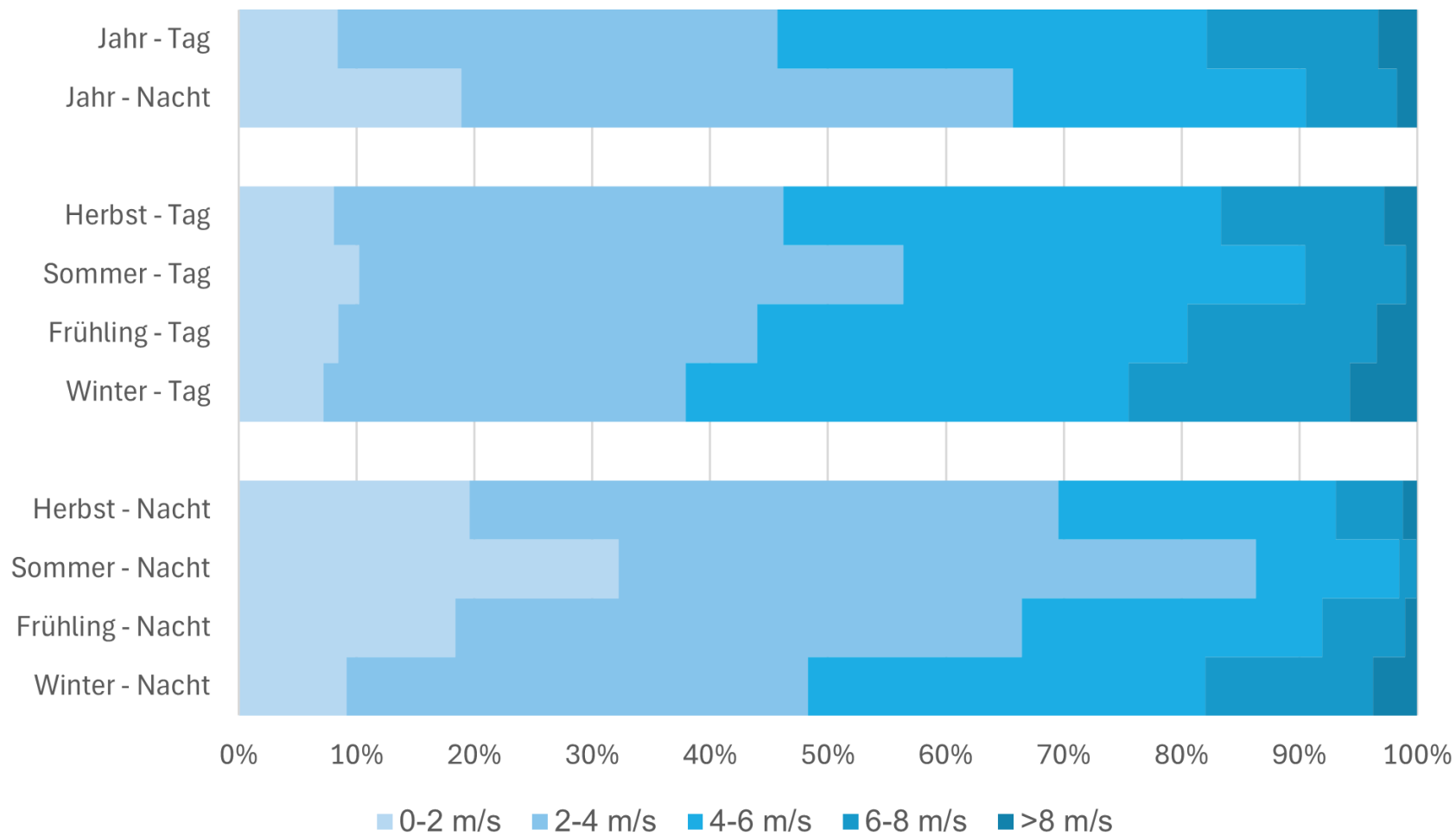


Langjährige klimatische Dynamik (1991-2000) innerhalb der Verwaltungsgrenzen der Kreisstadt Siegburg
für unterschiedliche klimatische Kenntage

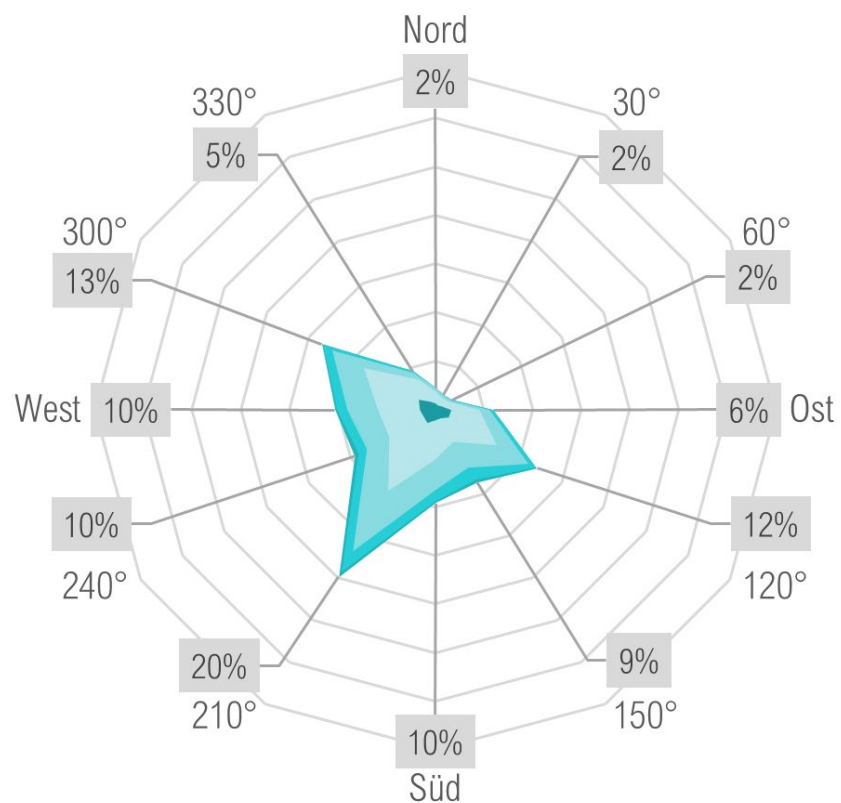


Windstärken im langjährigen Mittel (1994-2023)

nach den Daten der Messstation (ID 603 u. 2667)(DWD)

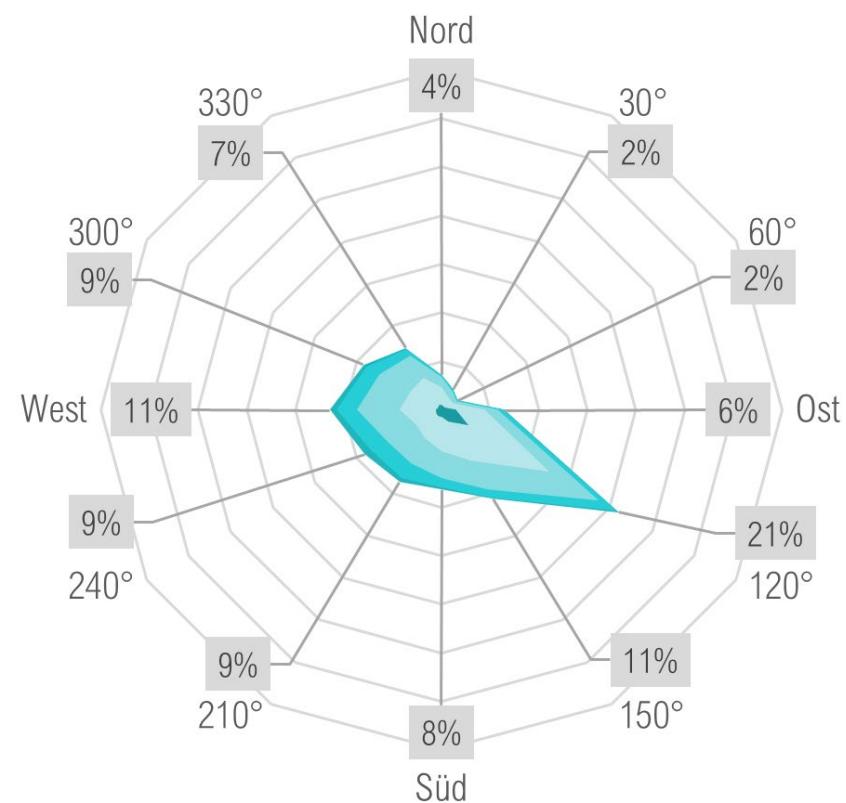


Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
für das **Gesamtjahr**
nach Daten der Messstation 603 (DWD)



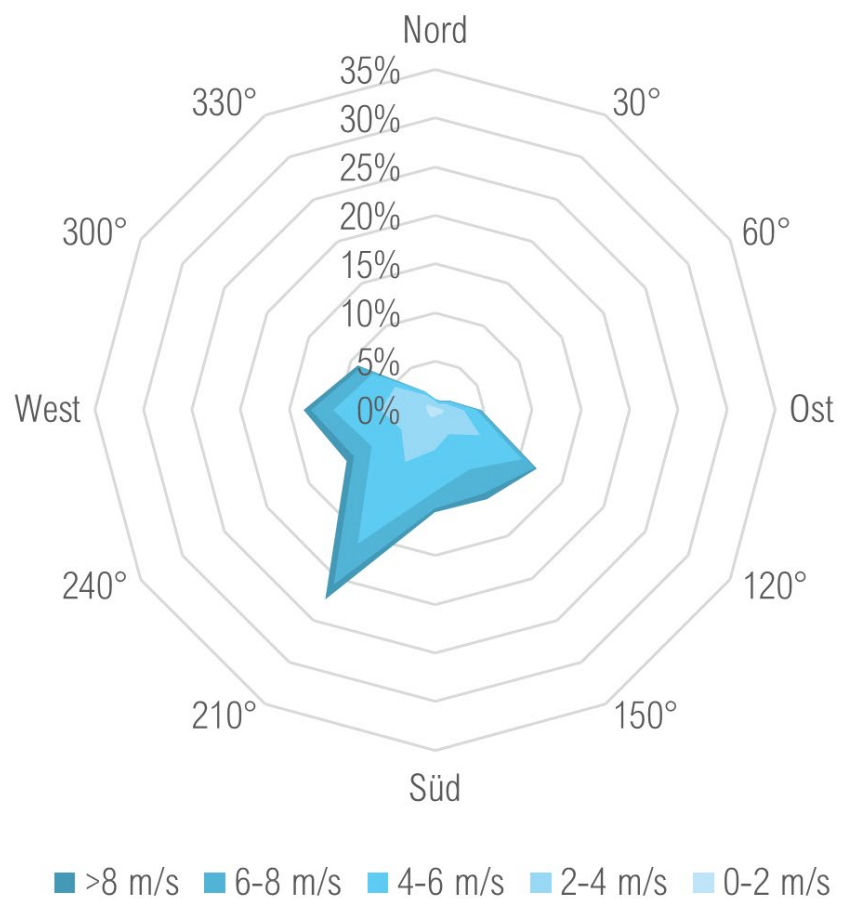
■ >8 m/s ■ 6-8 m/s ■ 4-6 m/s ■ 2-4 m/s ■ 0-2 m/s

Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
für das **Gesamtjahr**
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)

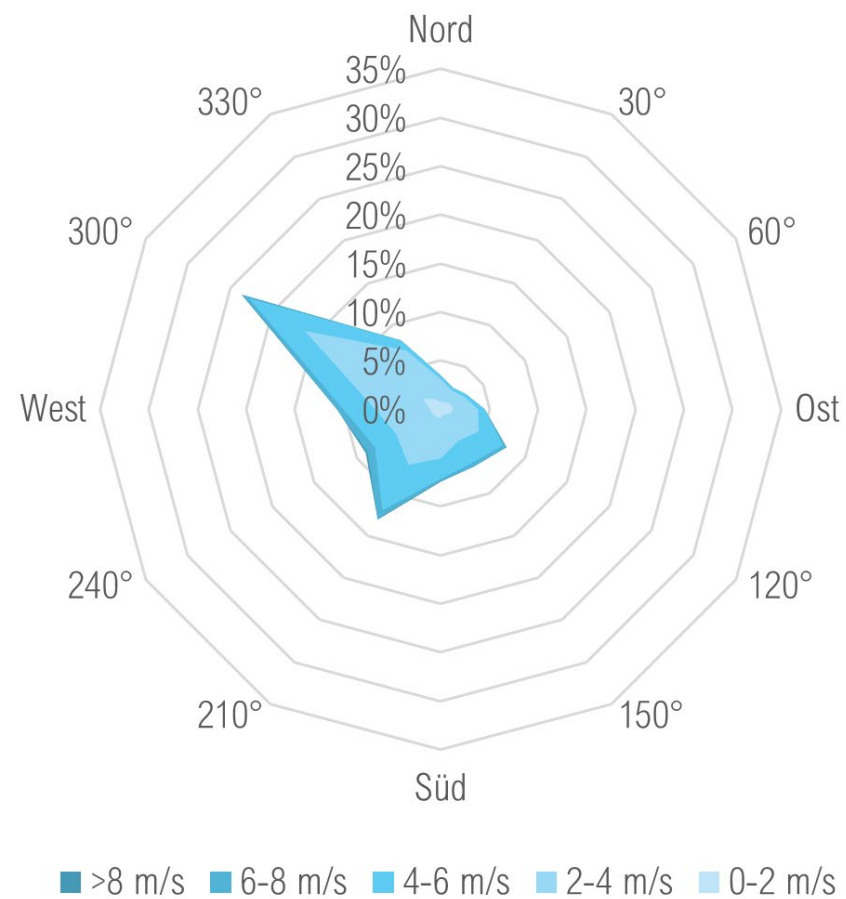


■ >8 m/s ■ 6-8 m/s ■ 4-6 m/s ■ 2-4 m/s ■ 0-2 m/s

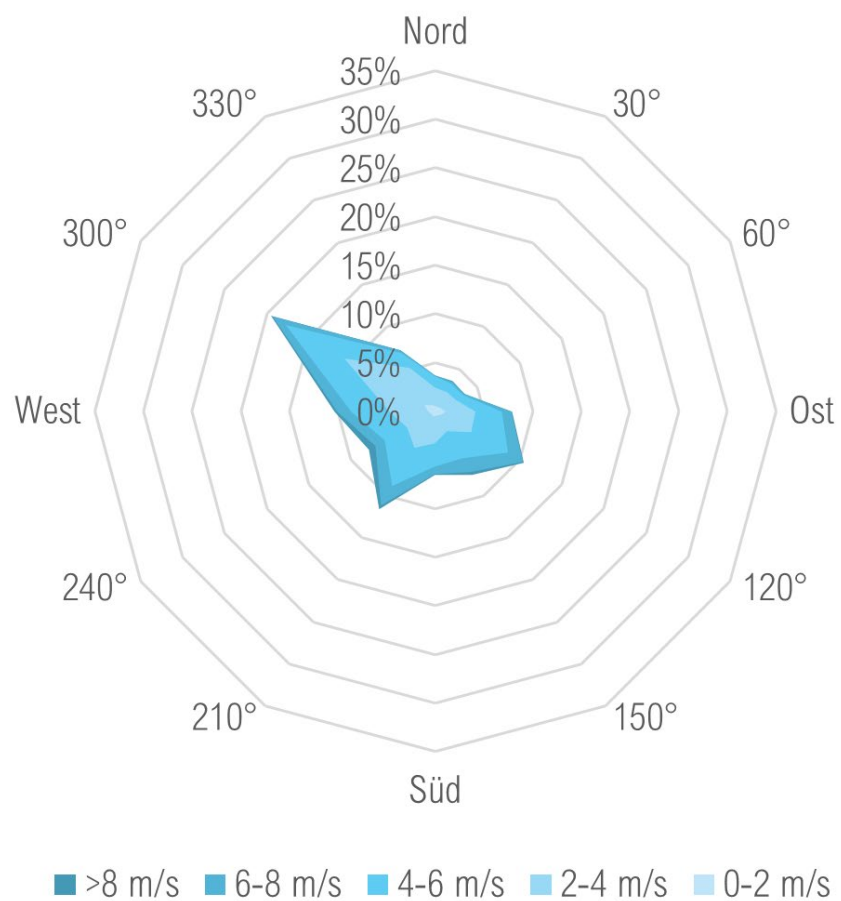
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Winter** (DJF)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



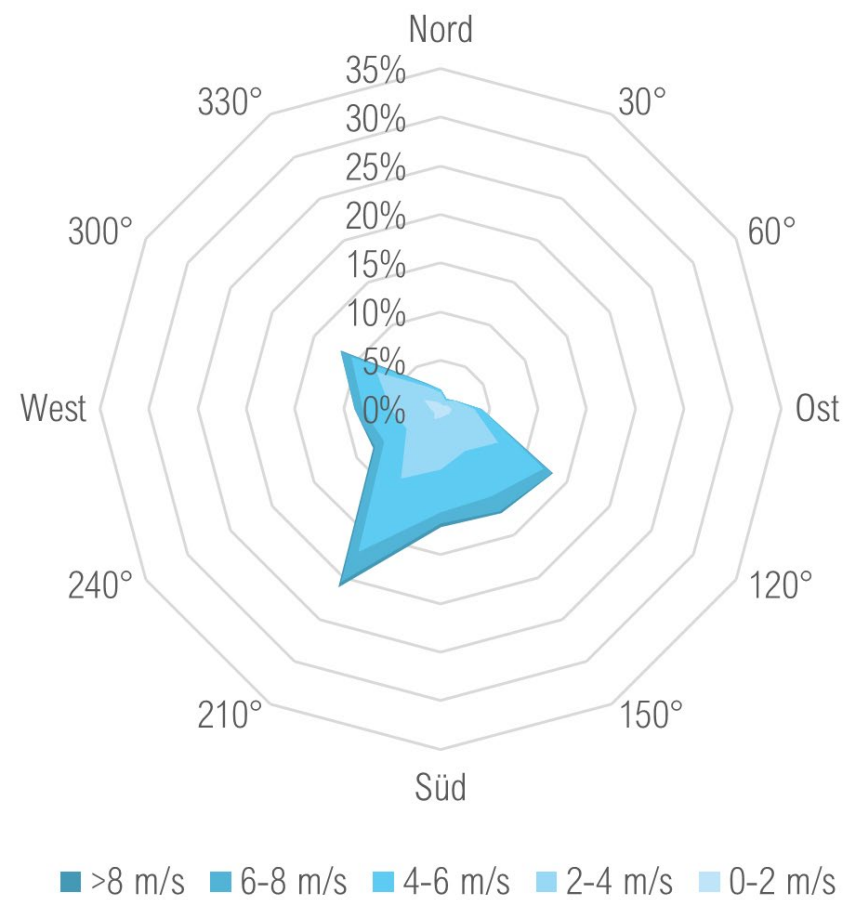
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Sommer** (JJA)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



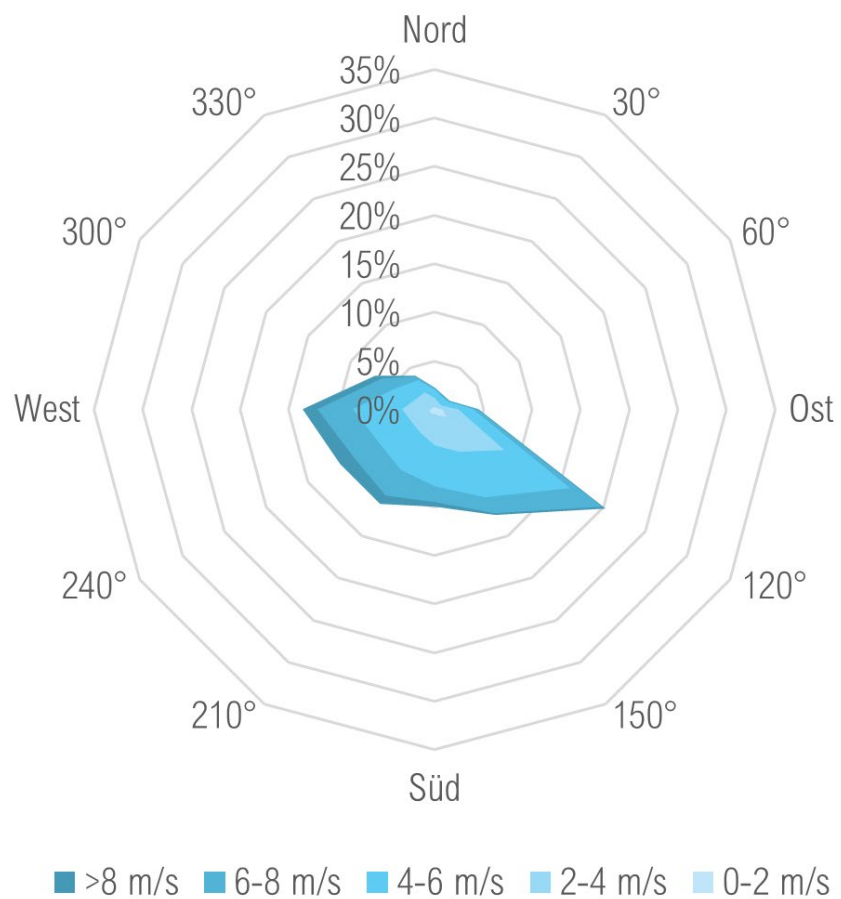
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Frühling** (MAM)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



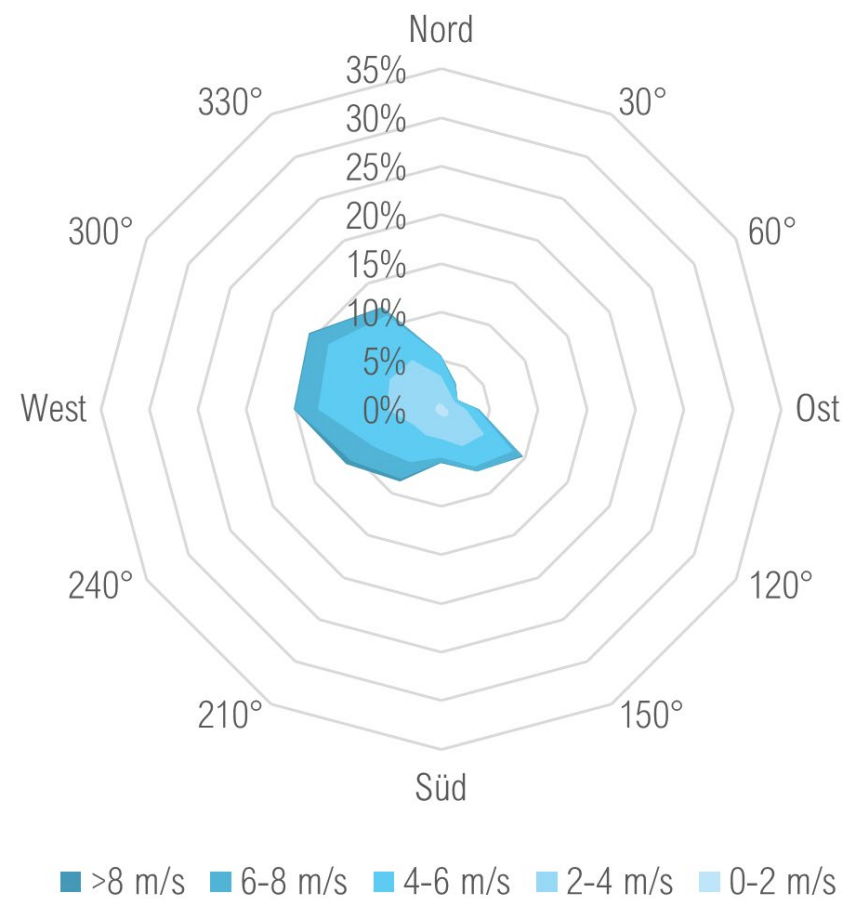
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Herbst** (SON)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



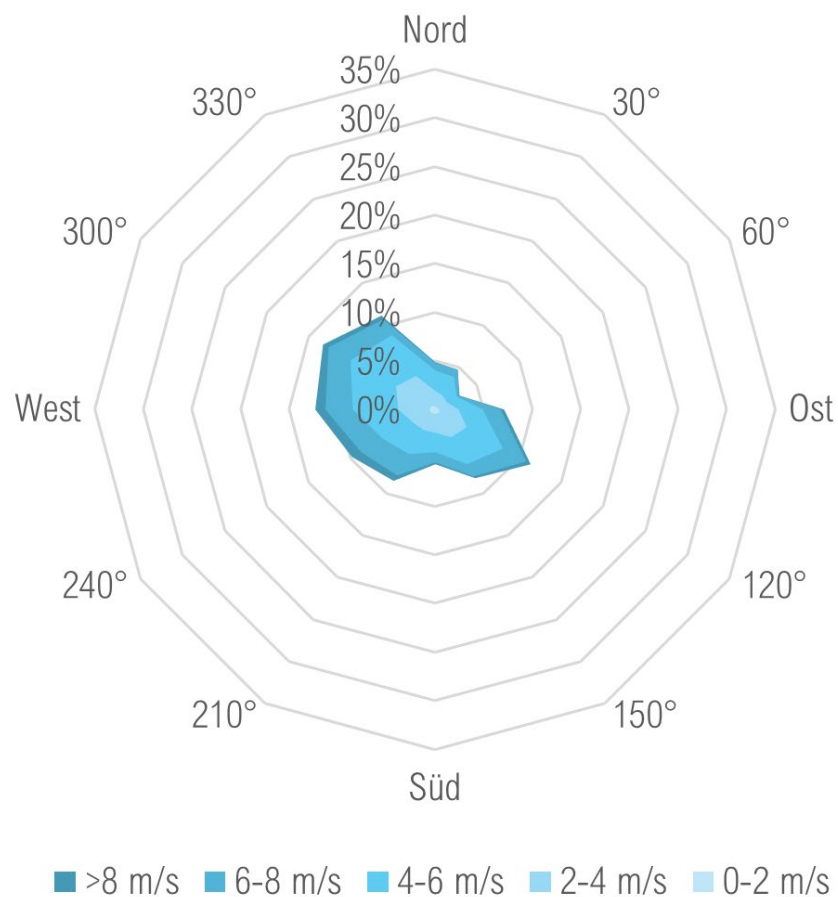
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Winter** (DJF)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



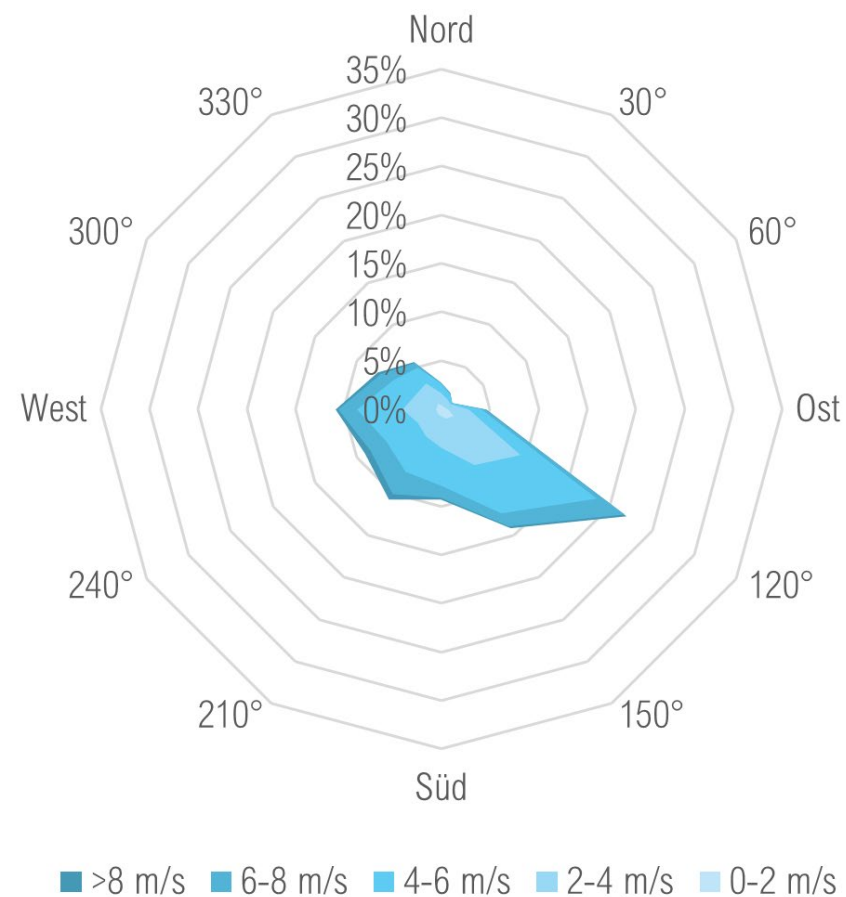
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Sommer** (JJA)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



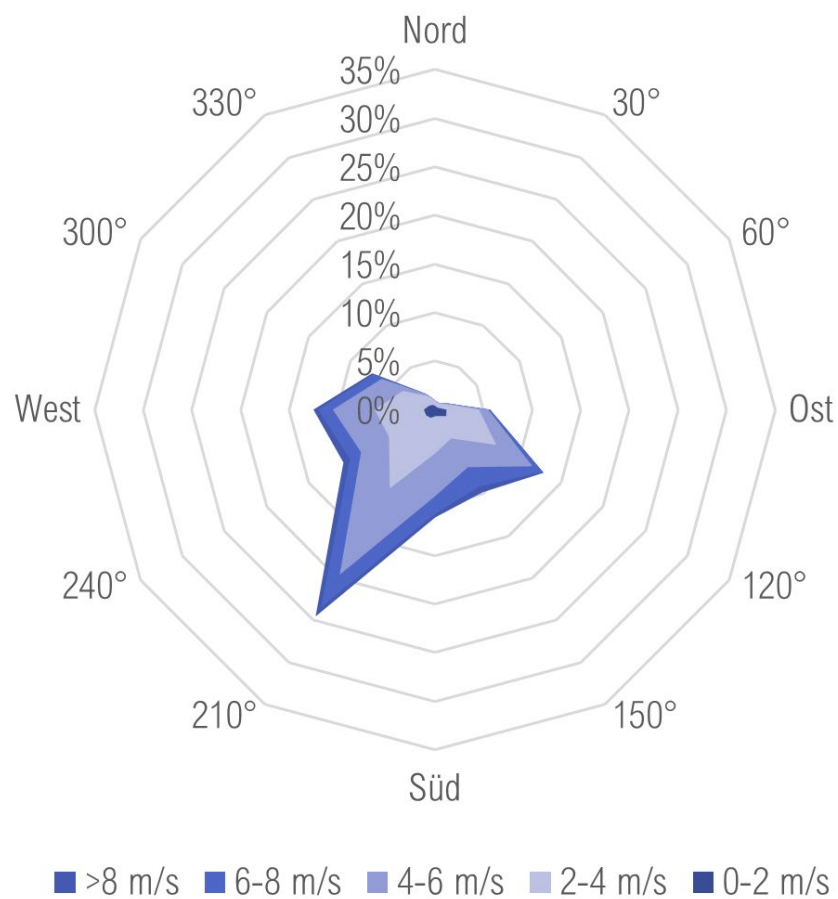
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Frühling** (MAM)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



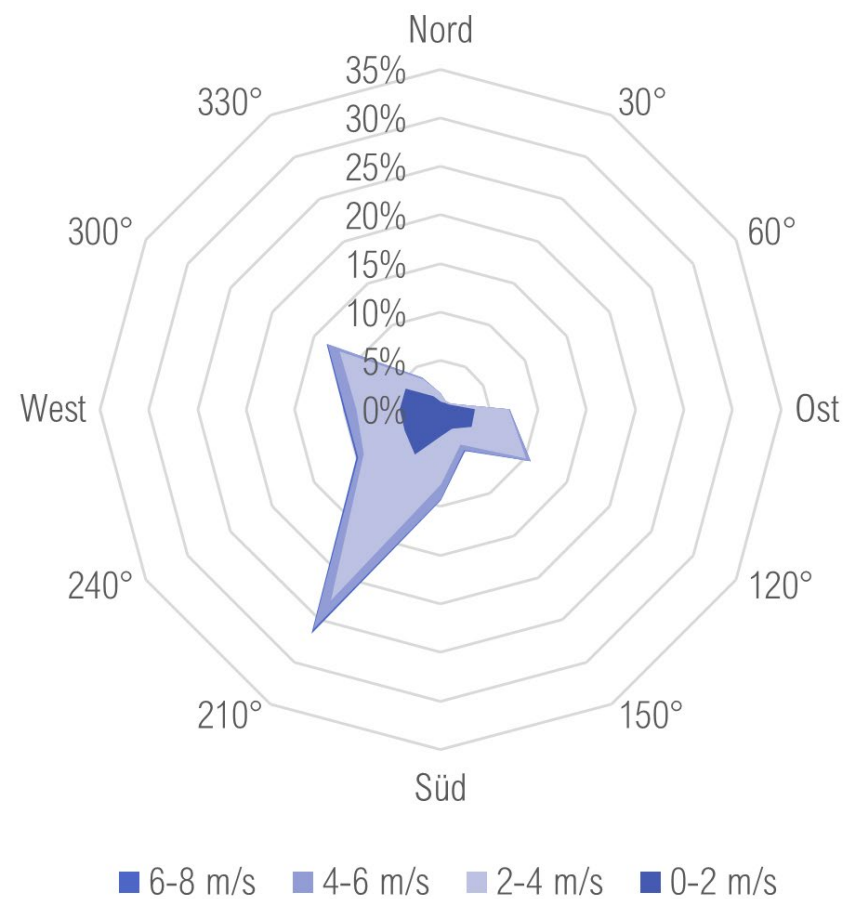
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während des **Tages** (8-18 Uhr)
für den **Herbst** (SON)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



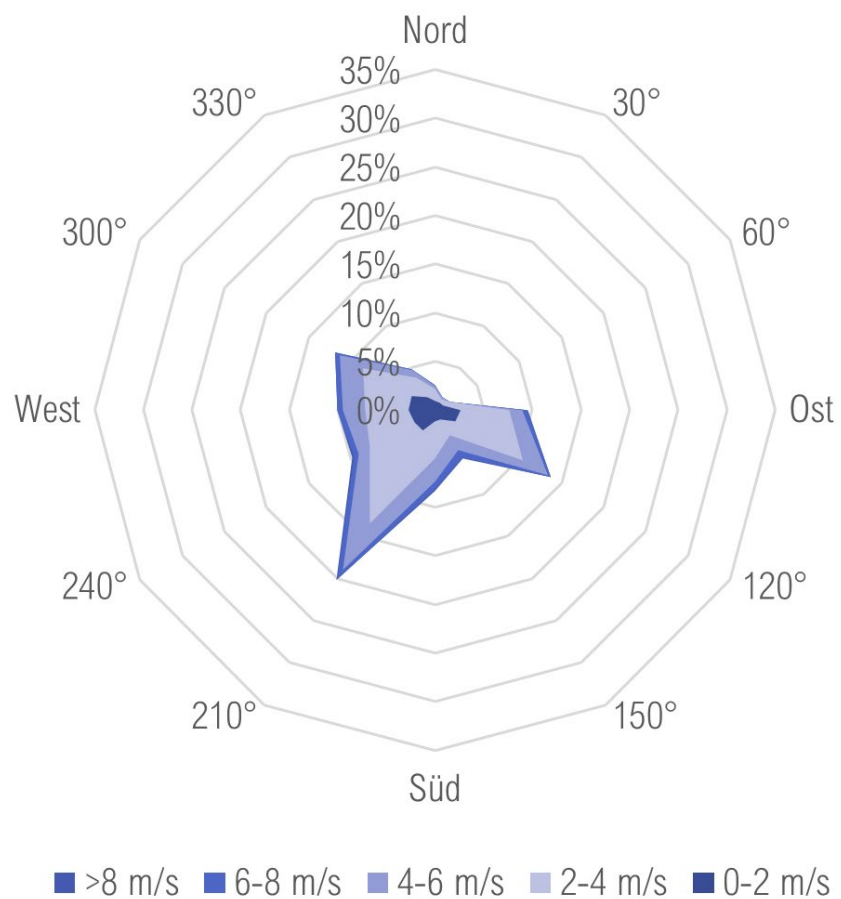
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Winter** (DJF)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



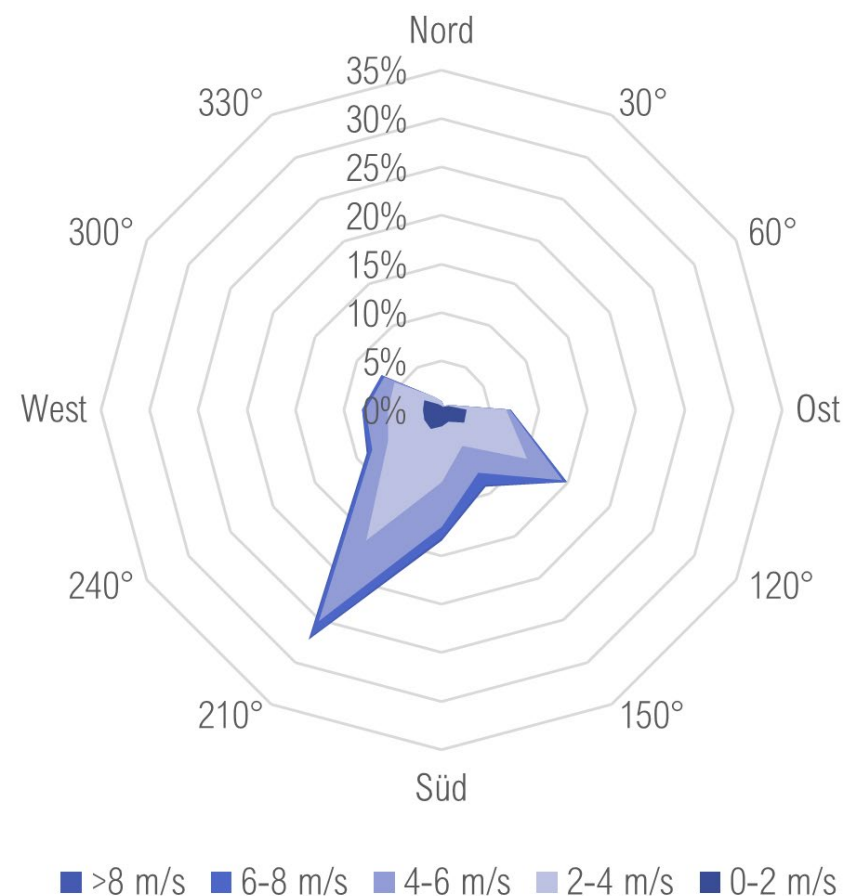
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Sommer** (JJA)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



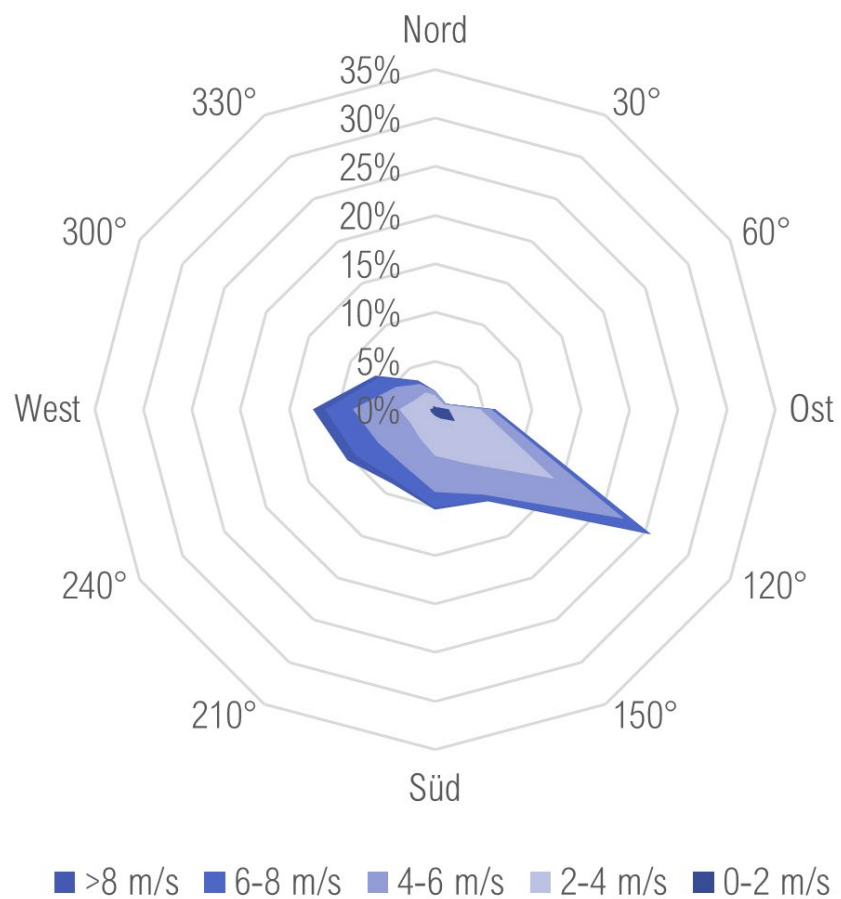
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Frühling** (MAM)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



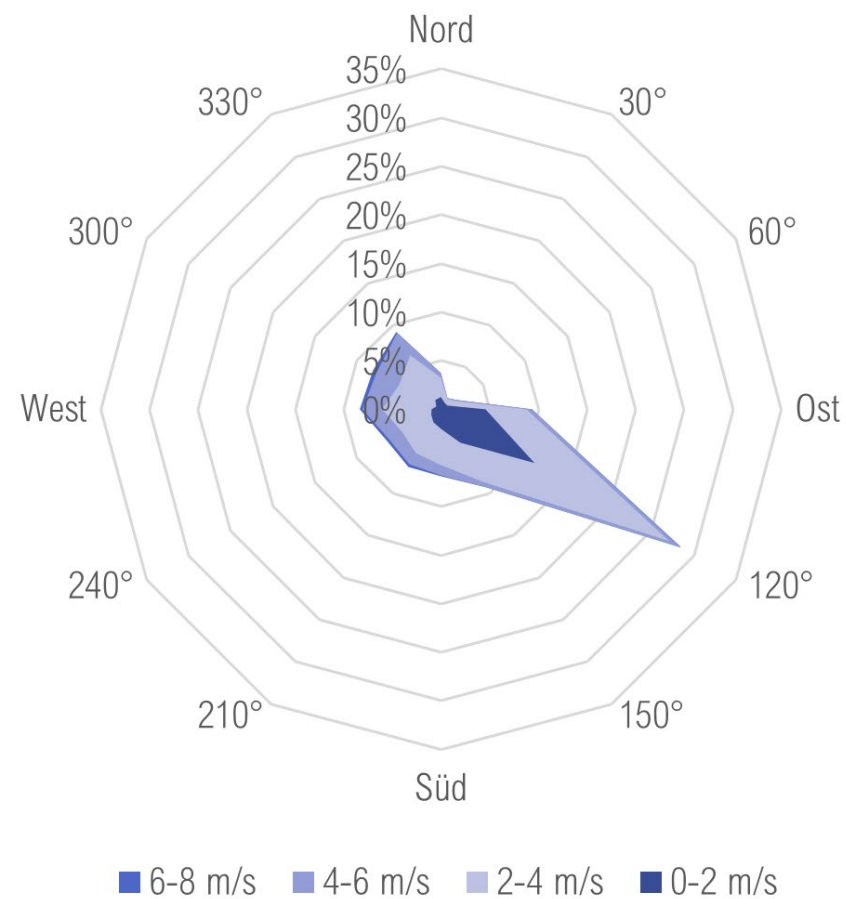
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Herbst** (SON)
nach den Daten der Messstation 603 (DWD)



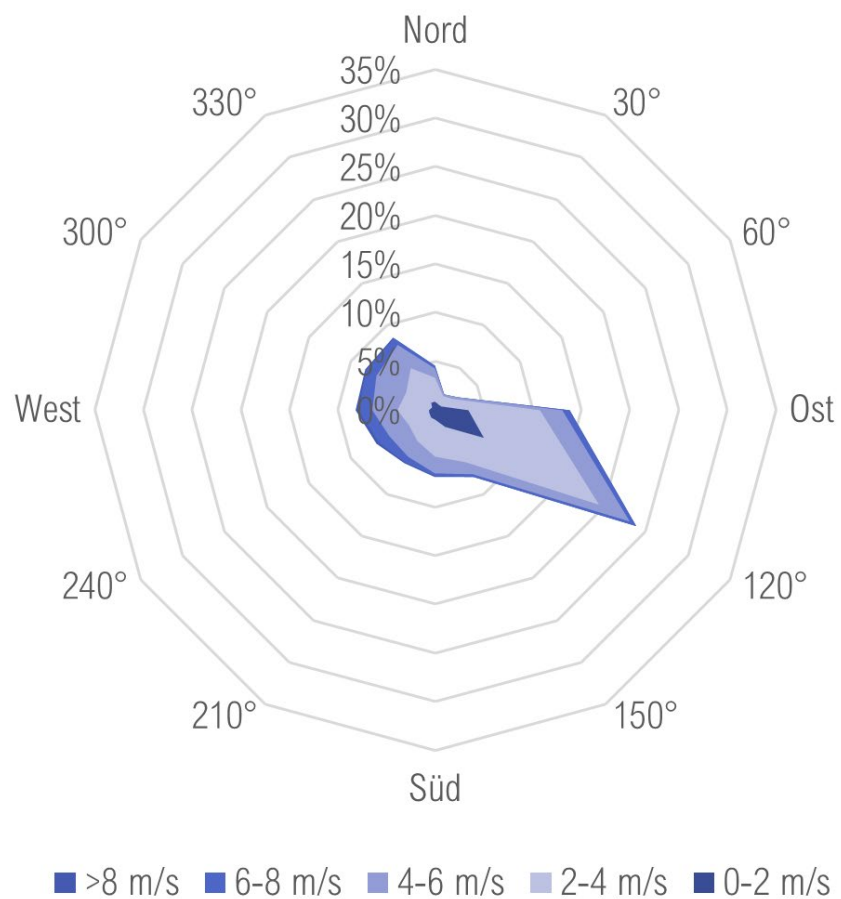
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Winter** (DJF)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



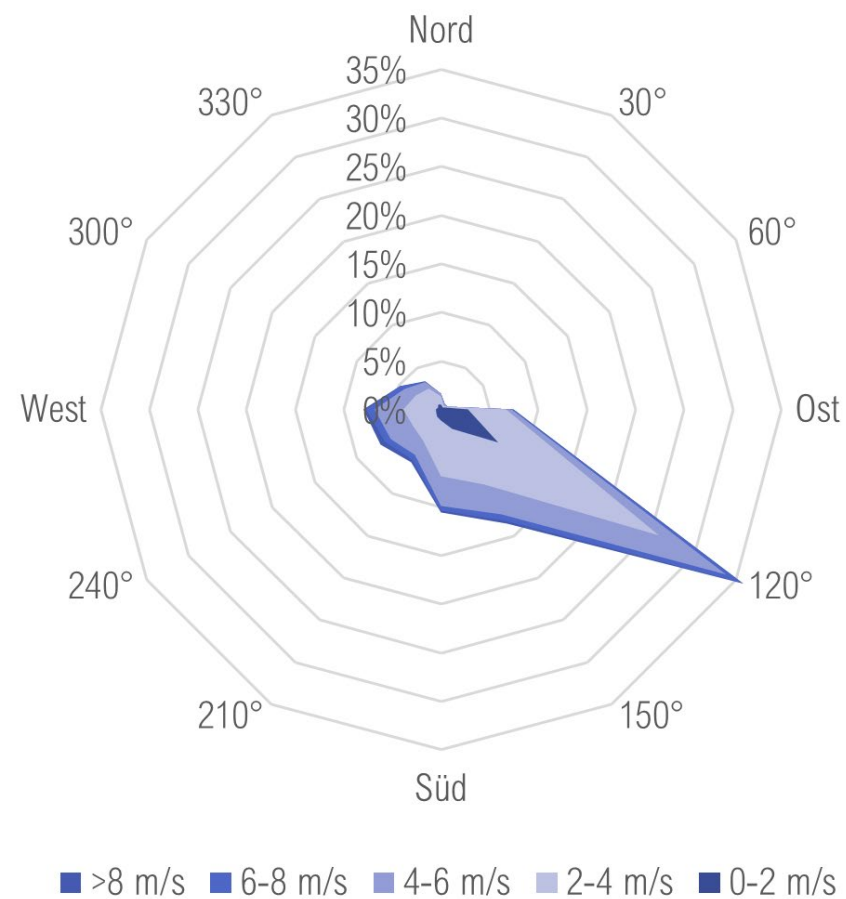
Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Sommer** (JJA)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Frühling** (MAM)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)



Windstärke u. -richtung im langjährigen Mittel
(1994 - 2023)
während der **Nacht** (22-4 Uhr)
für den **Herbst** (SON)
nach Daten der Messstation 2667 (DWD)

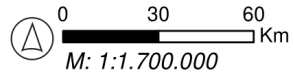
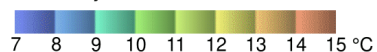


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

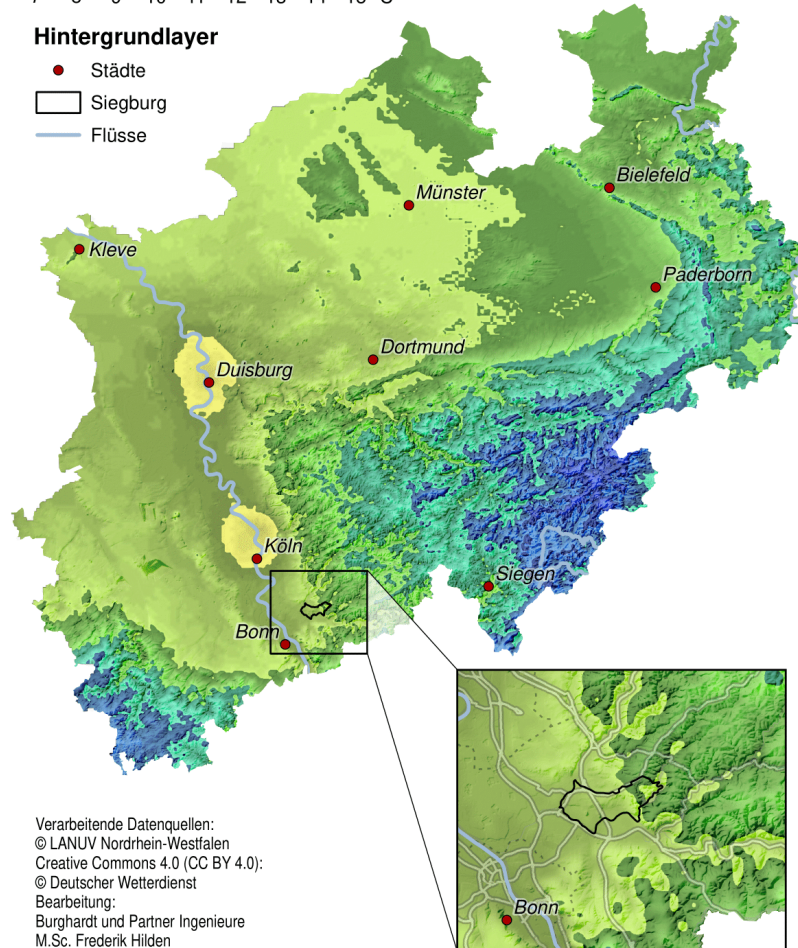
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

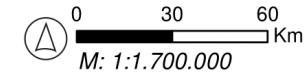
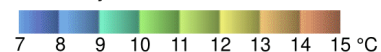


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

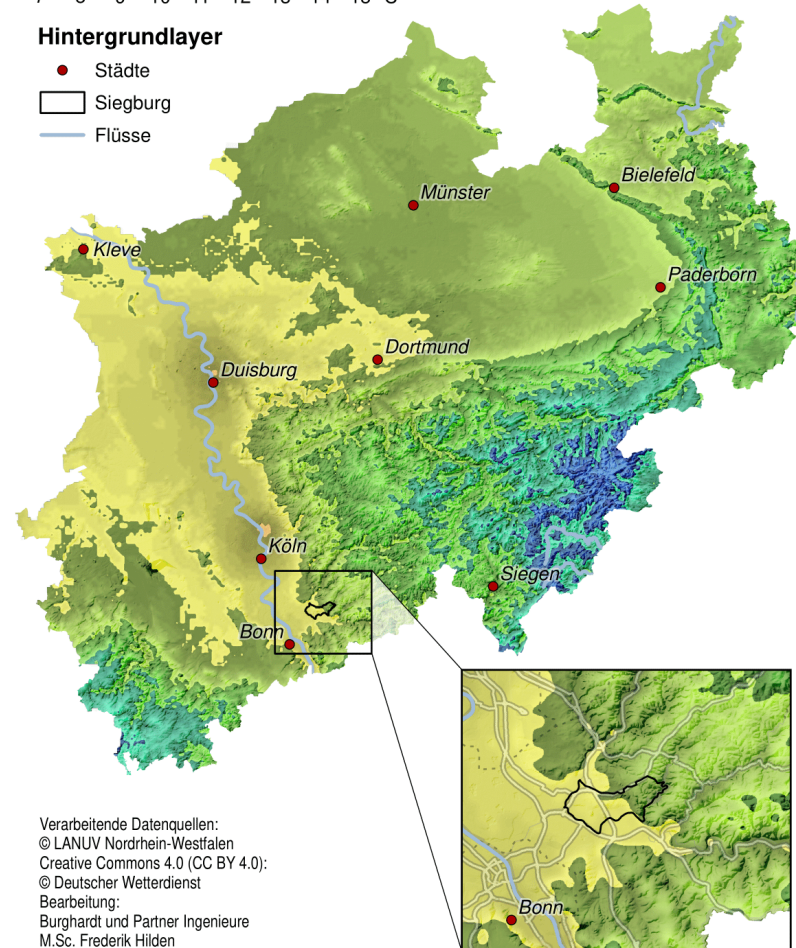
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

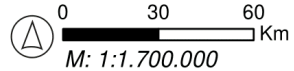
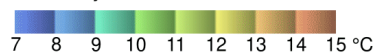


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

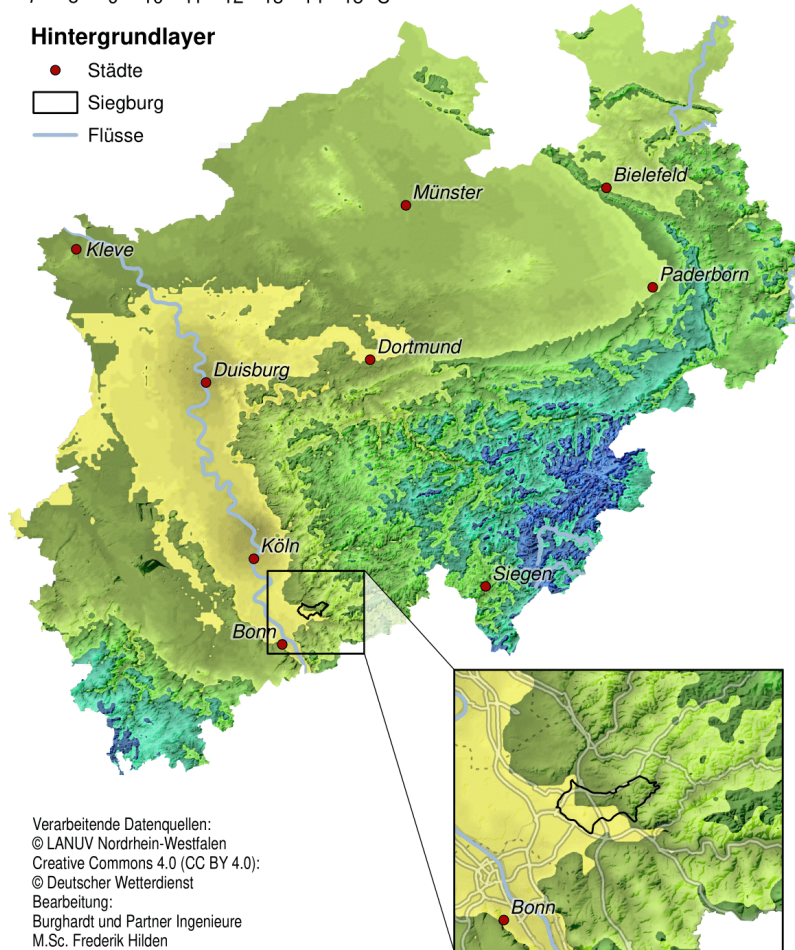
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

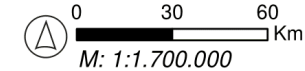
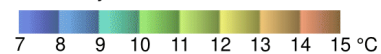


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

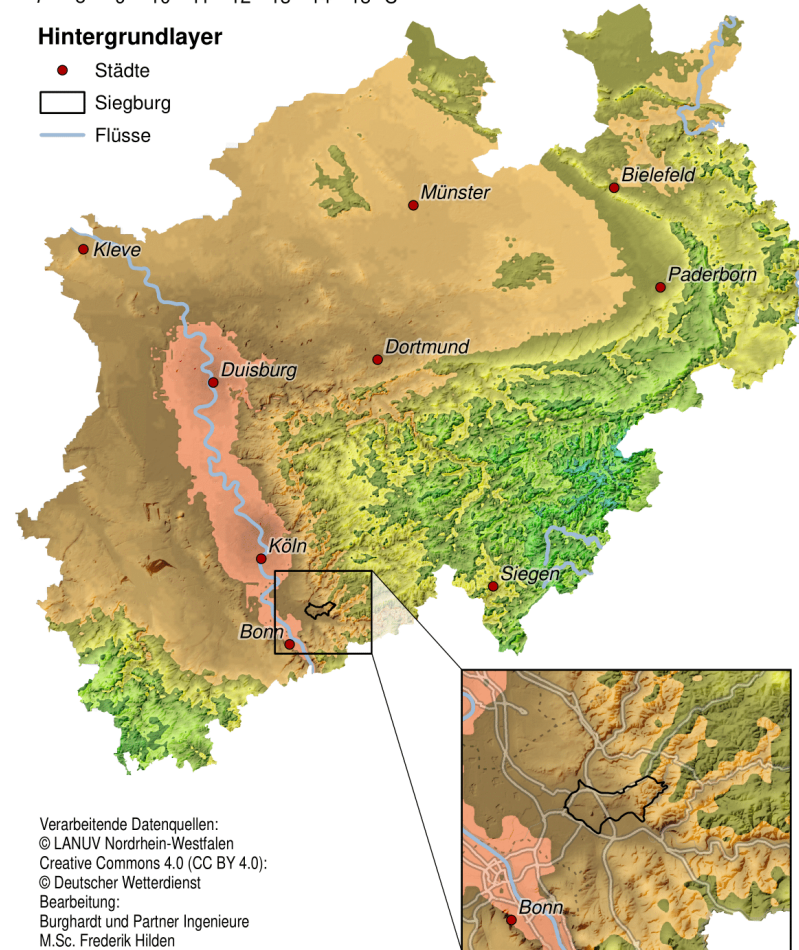
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse



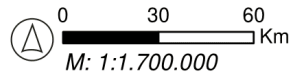
Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

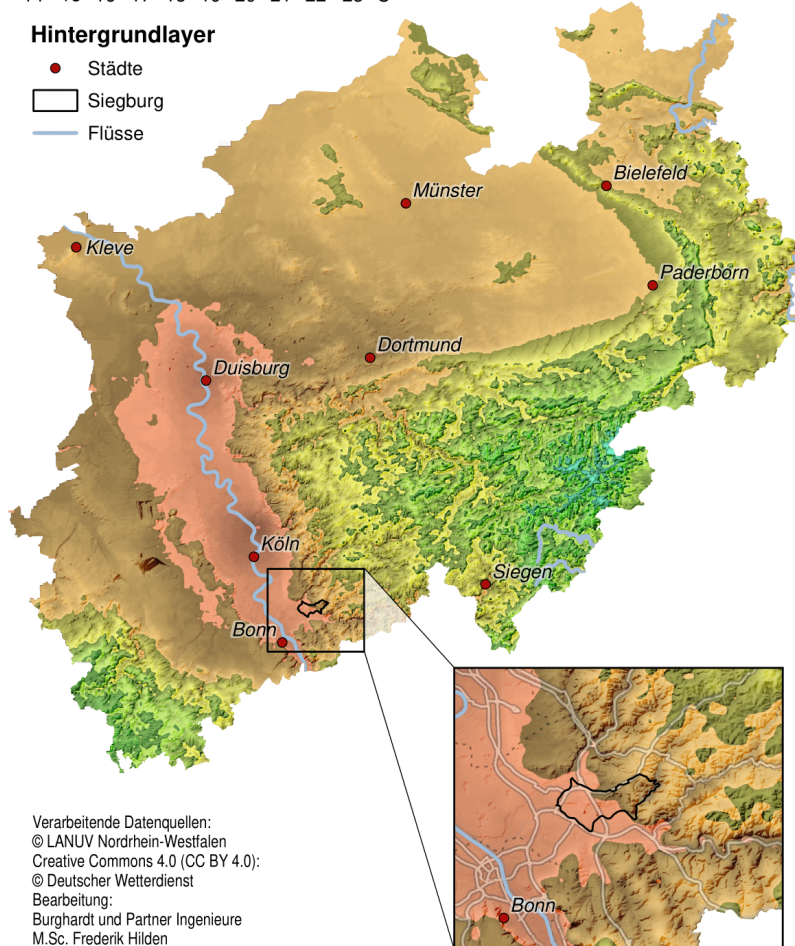
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Sommermonate (Juni, Juli, August)

14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 °C

**Hintergrundlayer**

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

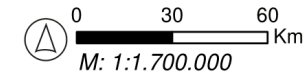
**Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100**

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

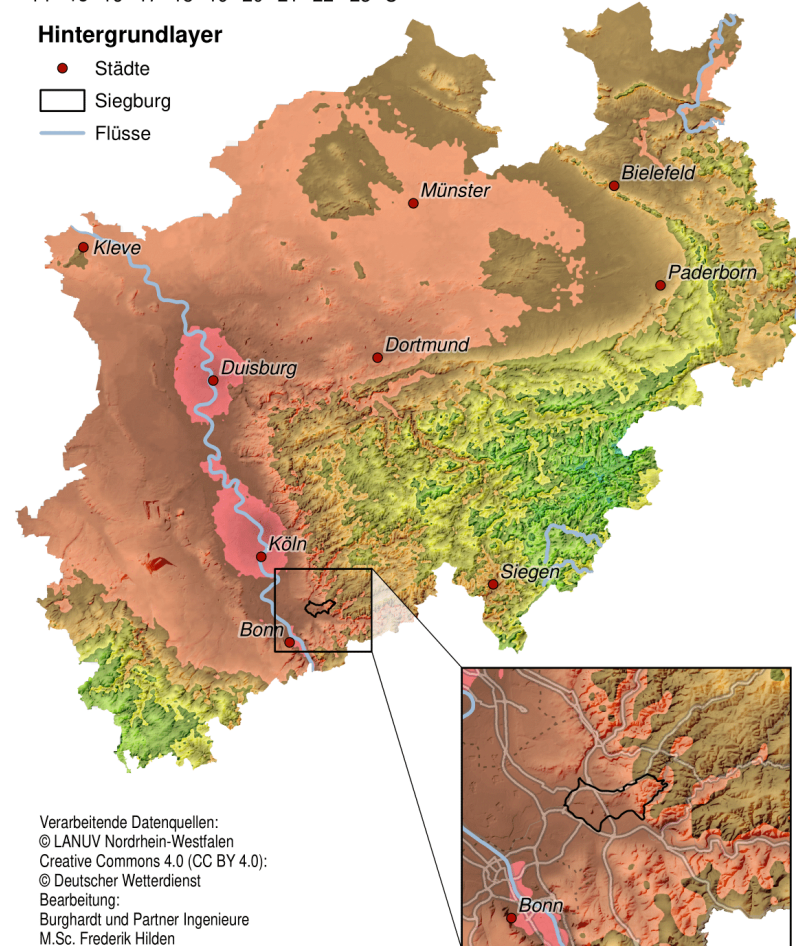
Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Sommermonate (Juni, Juli, August)

14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 °C

**Hintergrundlayer**

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

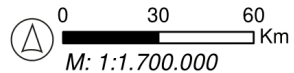
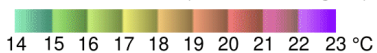


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

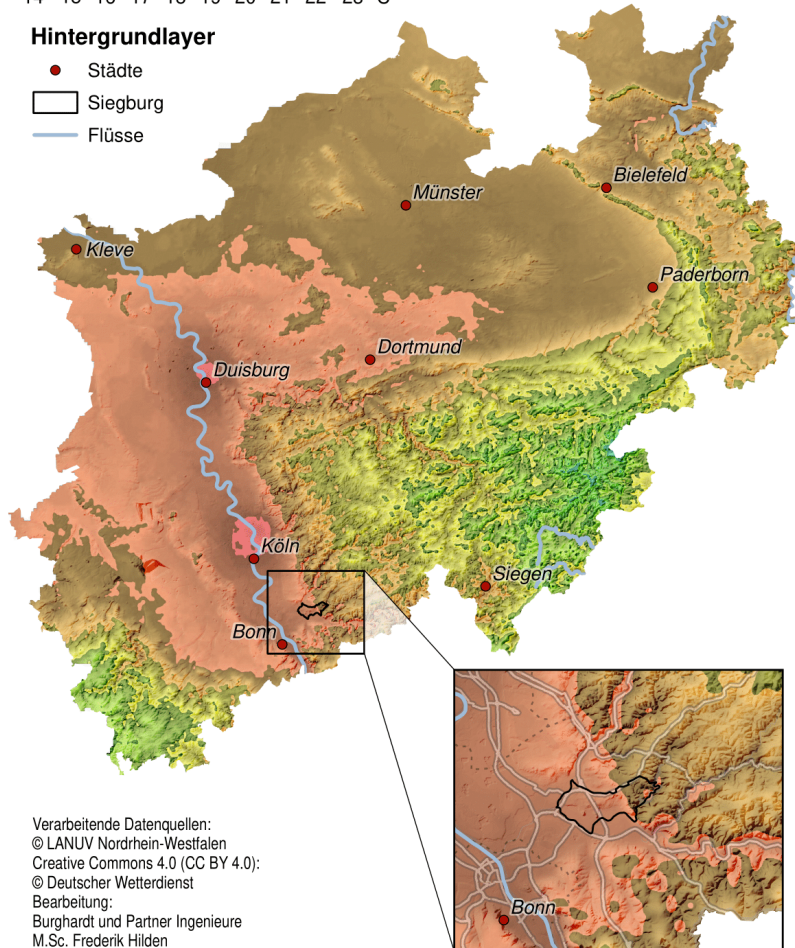
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Sommermonate (Juni, Juli, August)

**Hintergrundlayer**

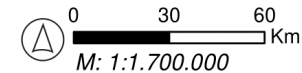
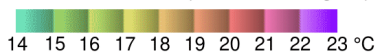
- Städte
- Siegburg
- Flüsse

**Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100**

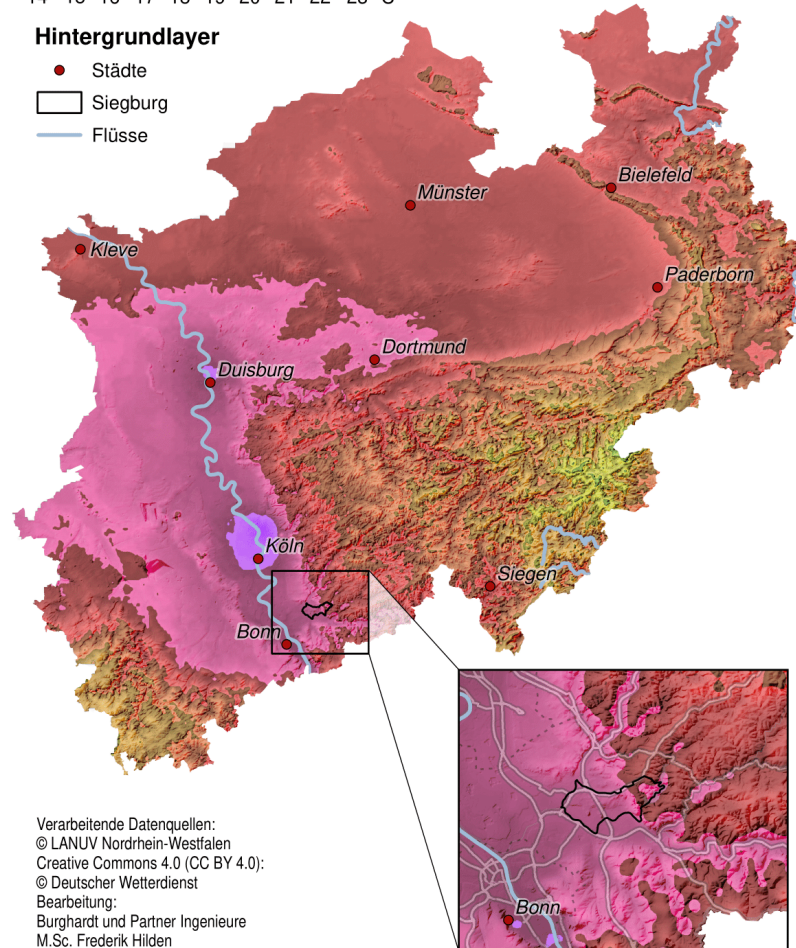
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Durchschnittliche Lufttemperatur (°C)

Sommermonate (Juni, Juli, August)

**Hintergrundlayer**

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

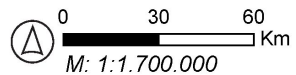
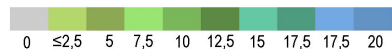


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

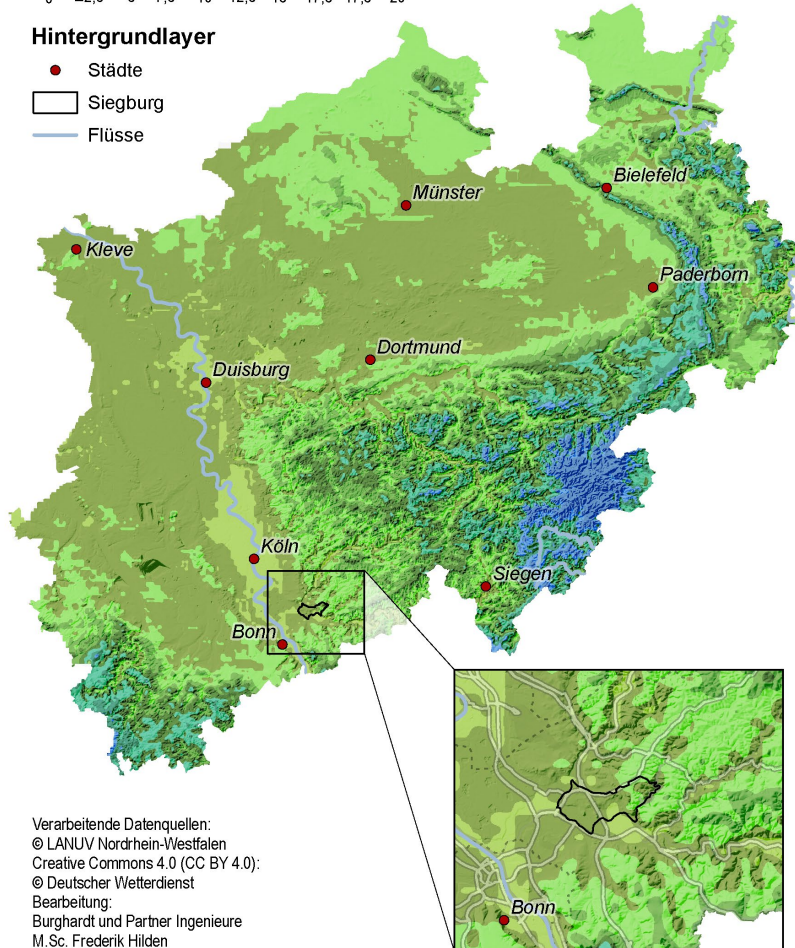
Eistage (LTmax < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

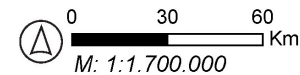
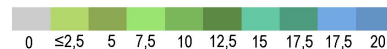


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

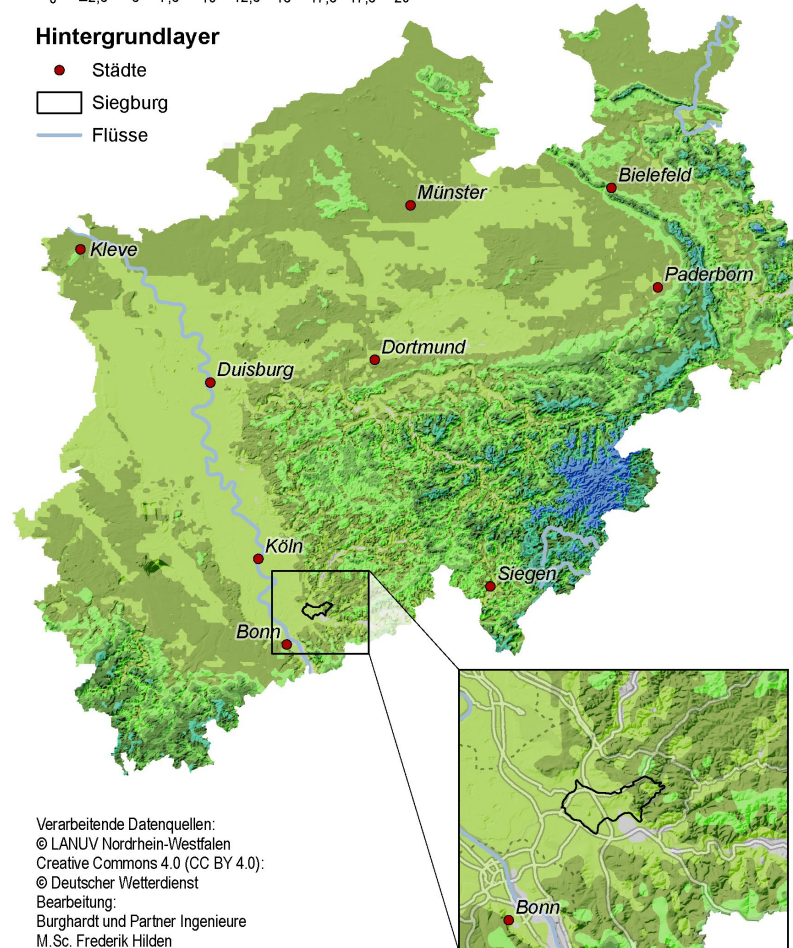
Eistage (LTmax < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

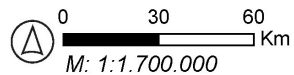
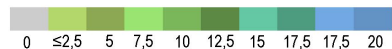


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

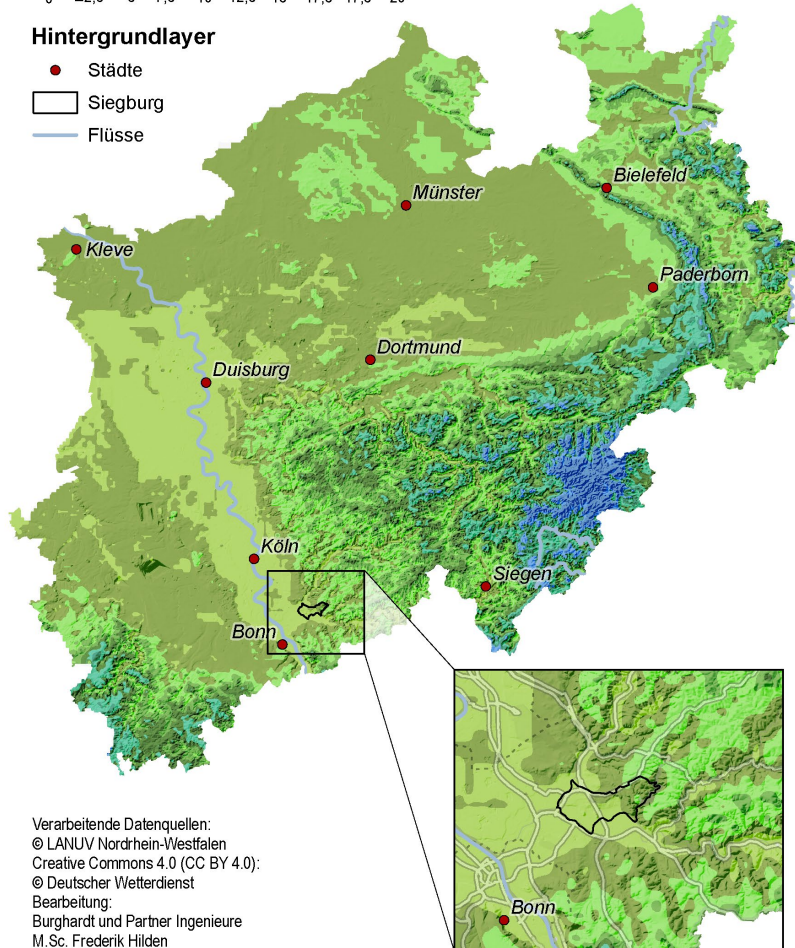
Eistage (LTmax < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

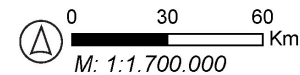
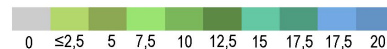


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

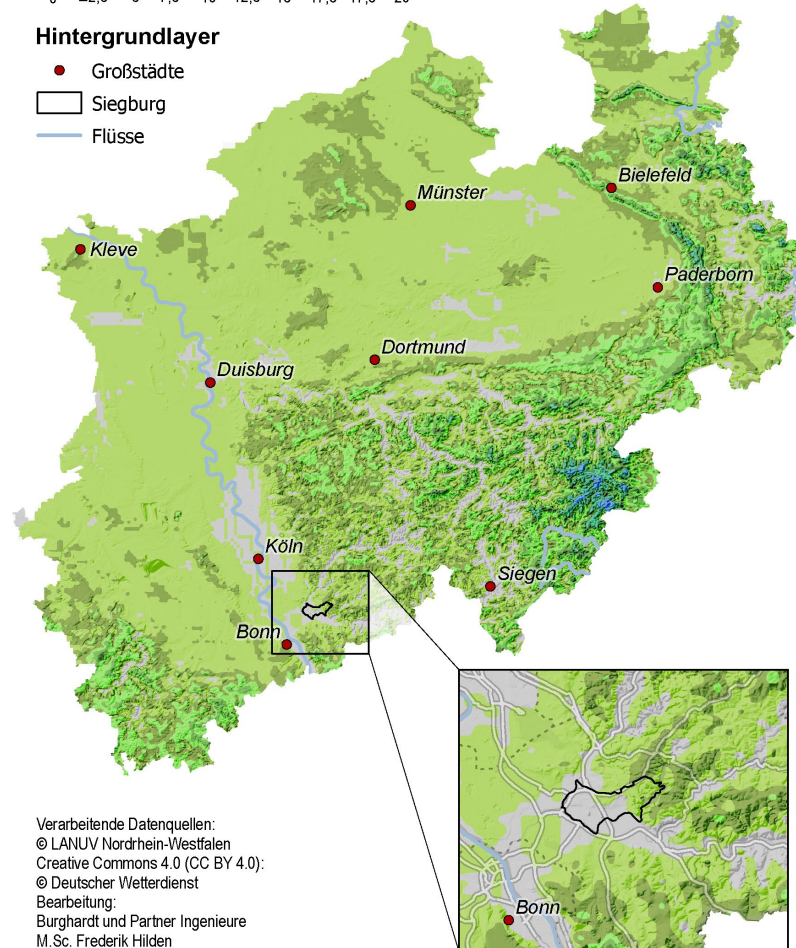
Eistage (LTmax < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Großstädte
- Siegburg
- Flüsse

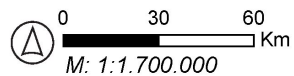
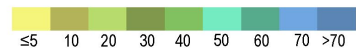


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

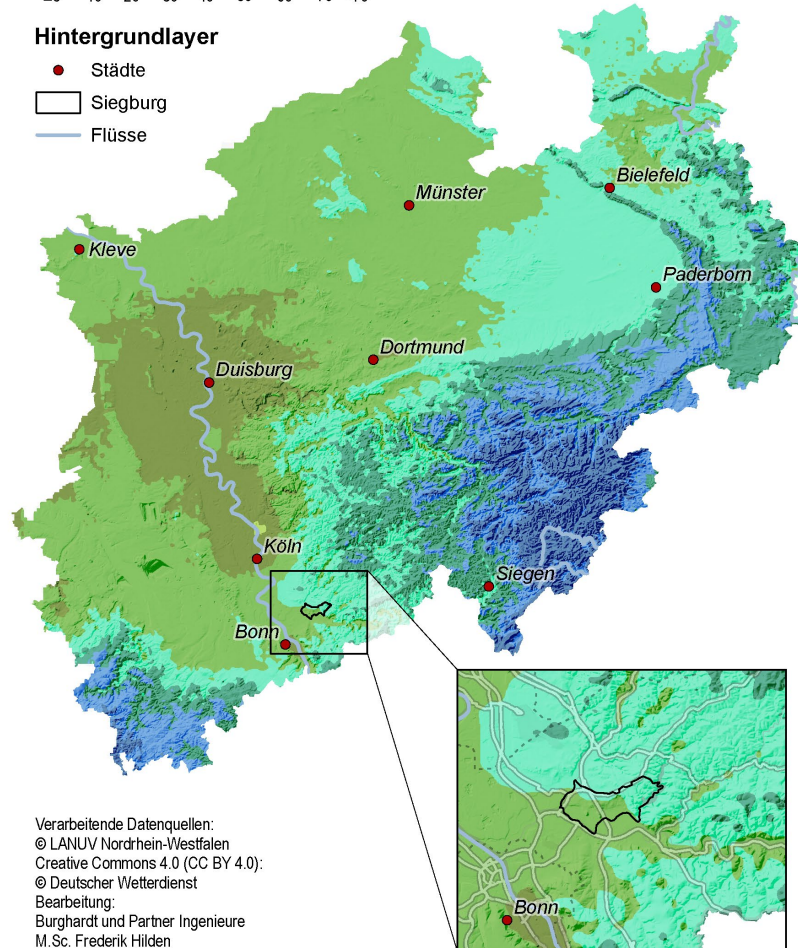
Frosttage (LTmin < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

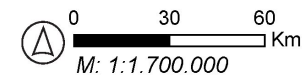
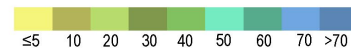


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

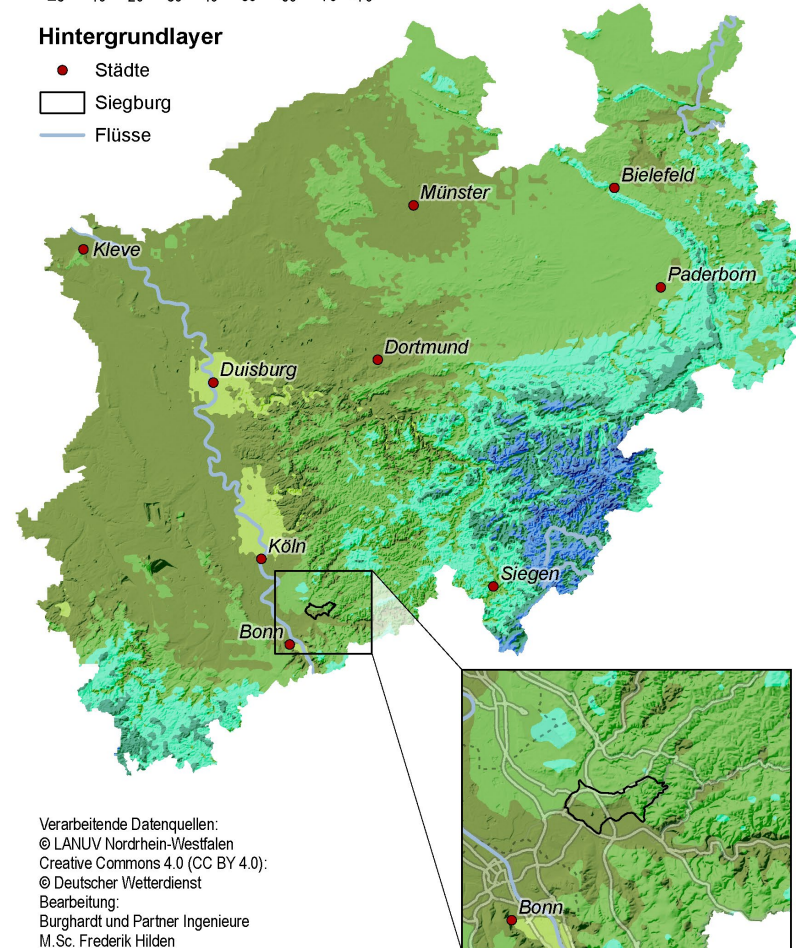
Frosttage (LTmin < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

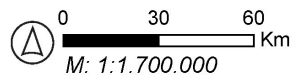
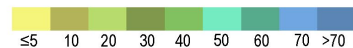


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

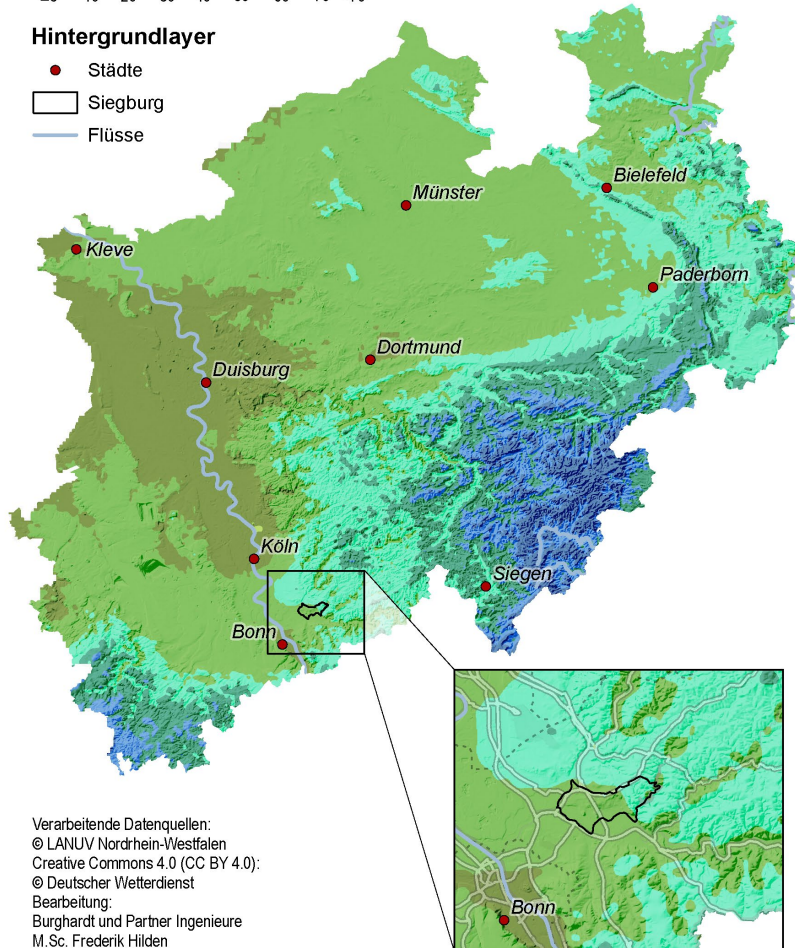
Frosttage (LTmin < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

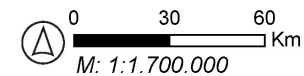
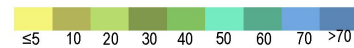


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

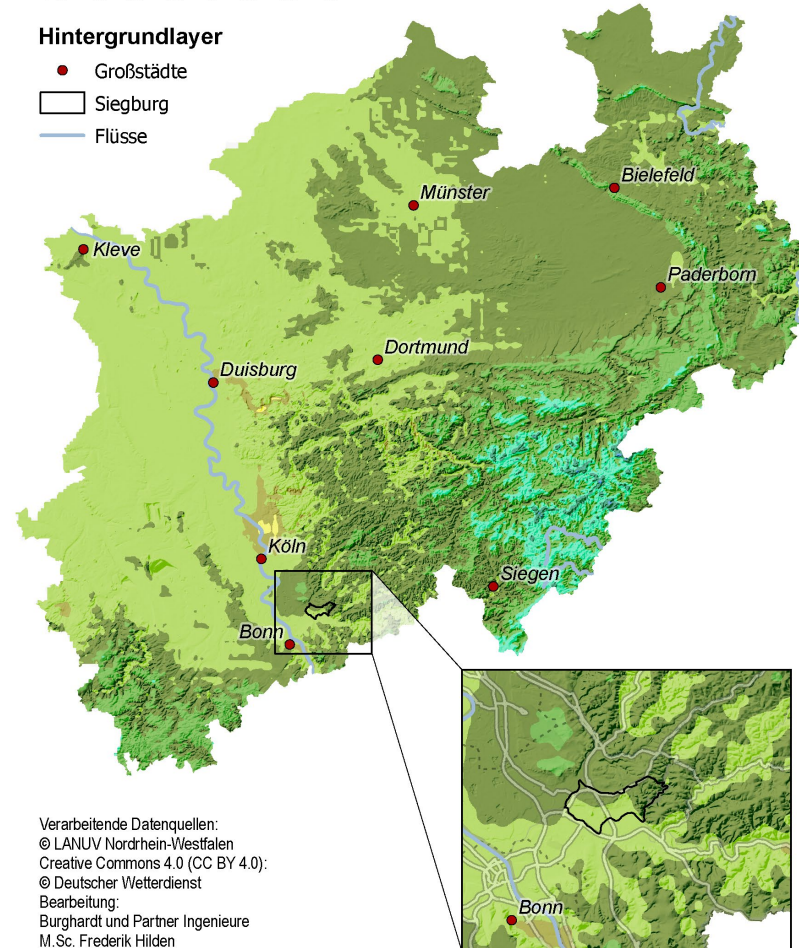
Frosttage (LTmin < 0 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Großstädte
- Siegburg
- Flüsse

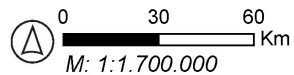
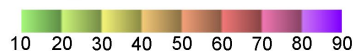


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

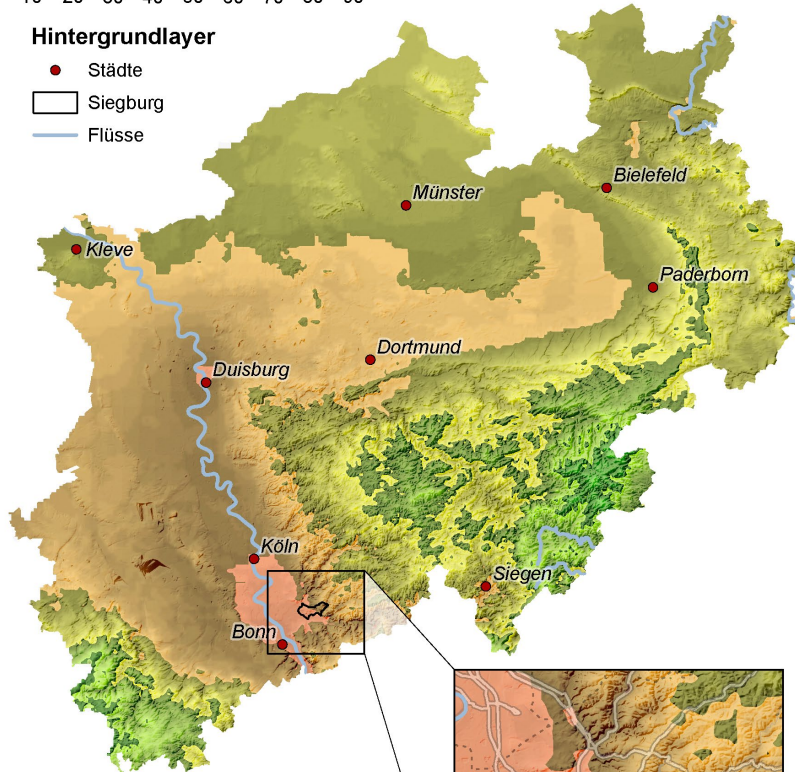
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse



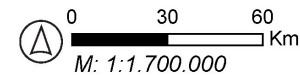
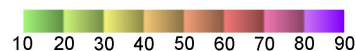
Verarbeitende Datenquellen:
© LANUV Nordrhein-Westfalen
Creative Commons 4.0 (CC BY 4.0);
© Deutscher Wetterdienst
Bearbeitung:
Burghardt und Partner Ingenieure
M.Sc. Frederik Hilden

Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse



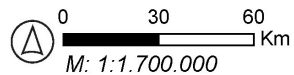
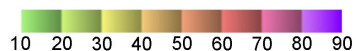
Verarbeitende Datenquellen:
© LANUV Nordrhein-Westfalen
Creative Commons 4.0 (CC BY 4.0);
© Deutscher Wetterdienst
Bearbeitung:
Burghardt und Partner Ingenieure
M.Sc. Frederik Hilden

Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

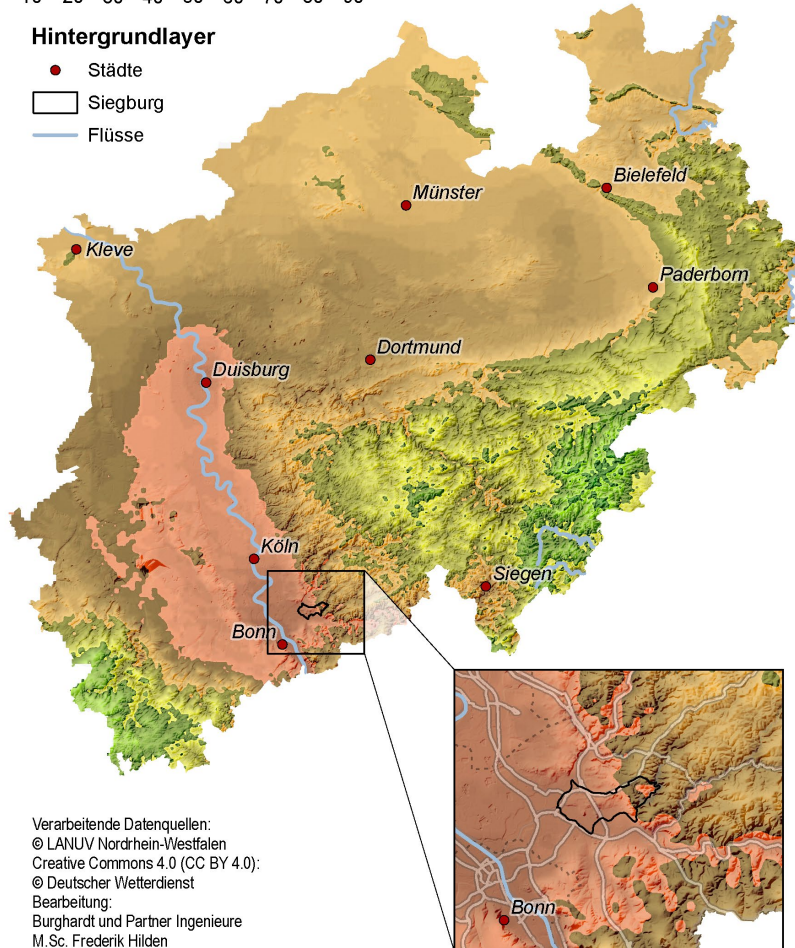
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

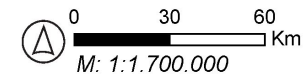
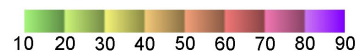


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

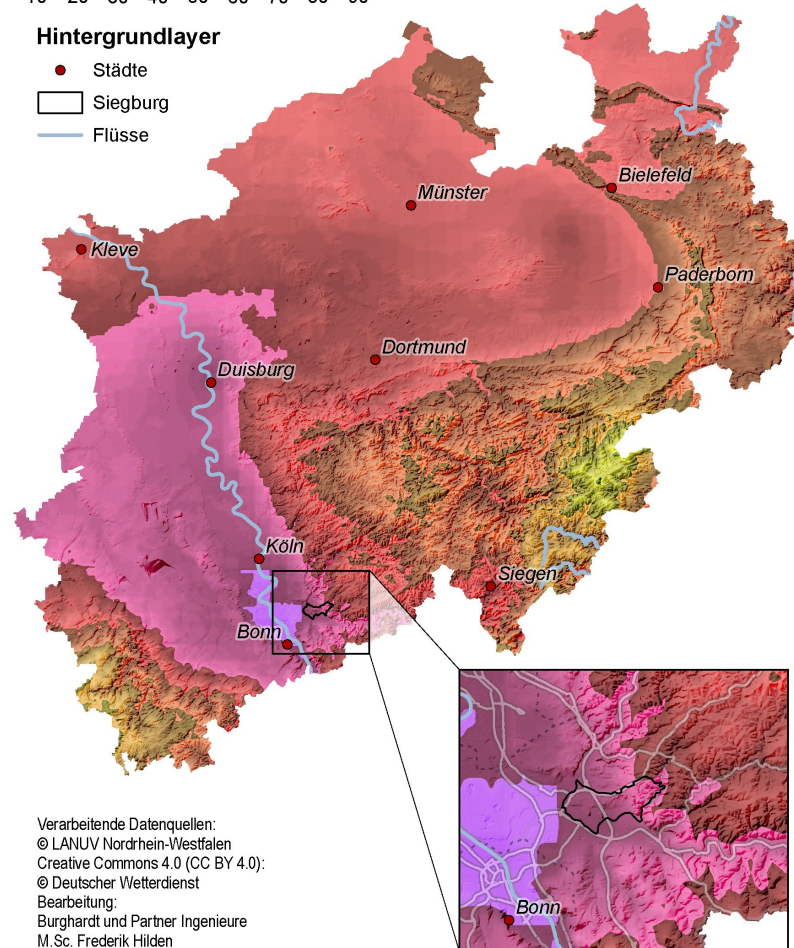
Sommertage (LTmax ≥ 25 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

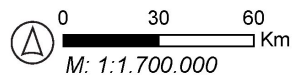
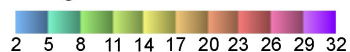


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

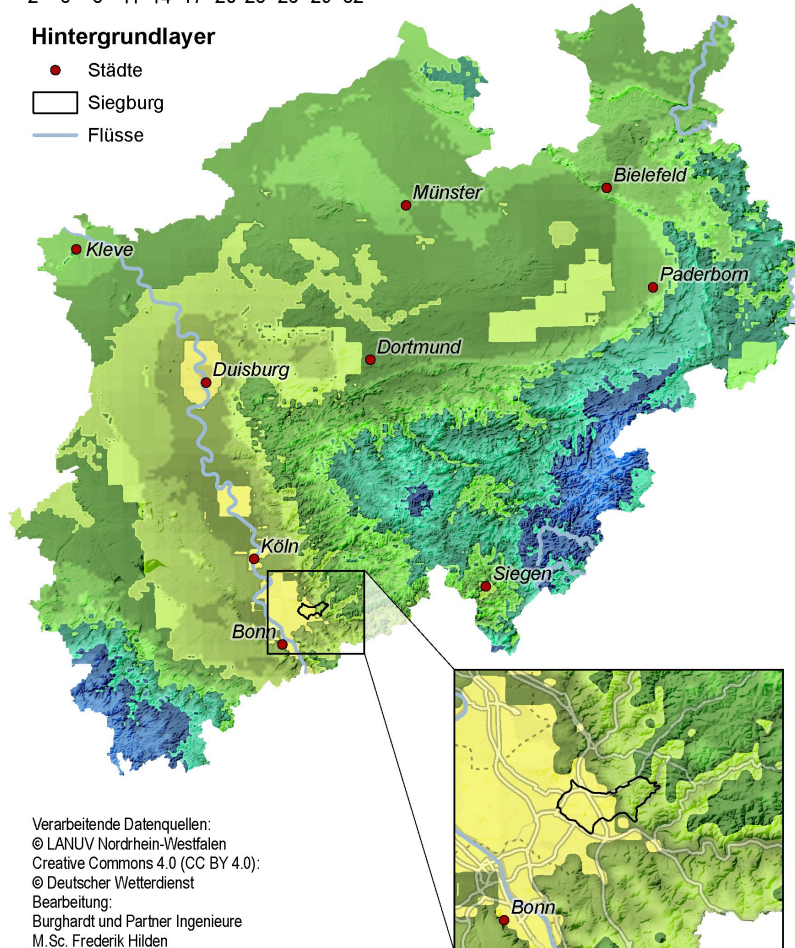
Heiße Tage (LTmax $\geq 30^\circ\text{C}$)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

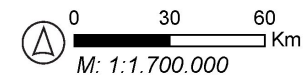
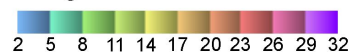


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

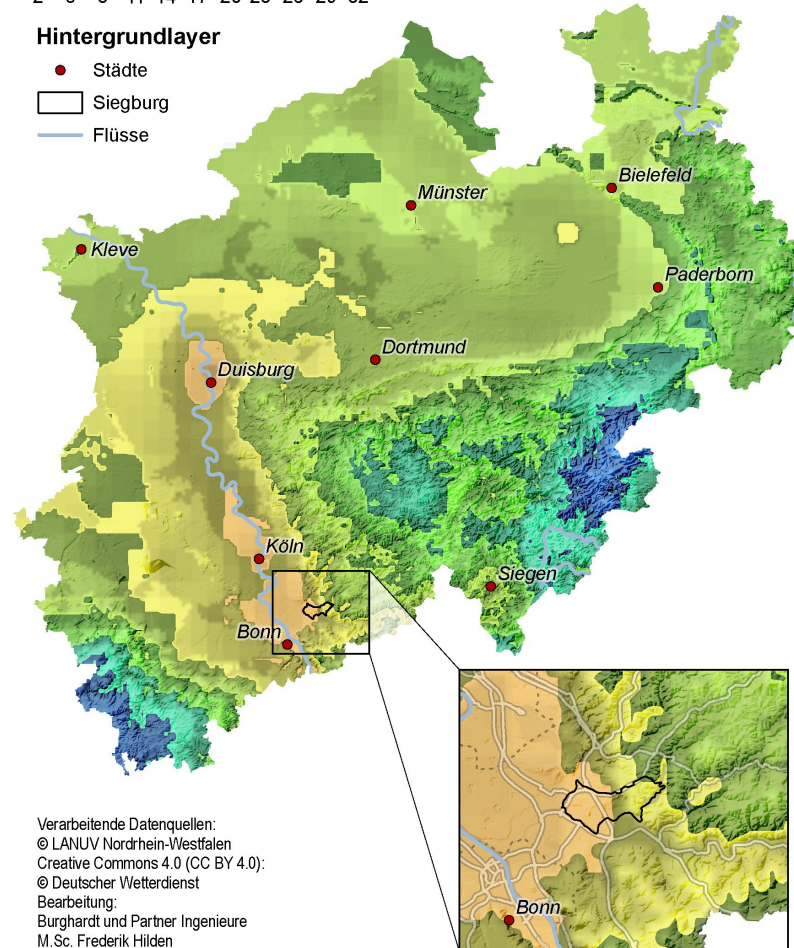
Heiße Tage (LTmax $\geq 30^\circ\text{C}$)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

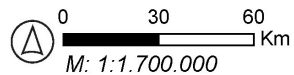
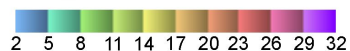


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

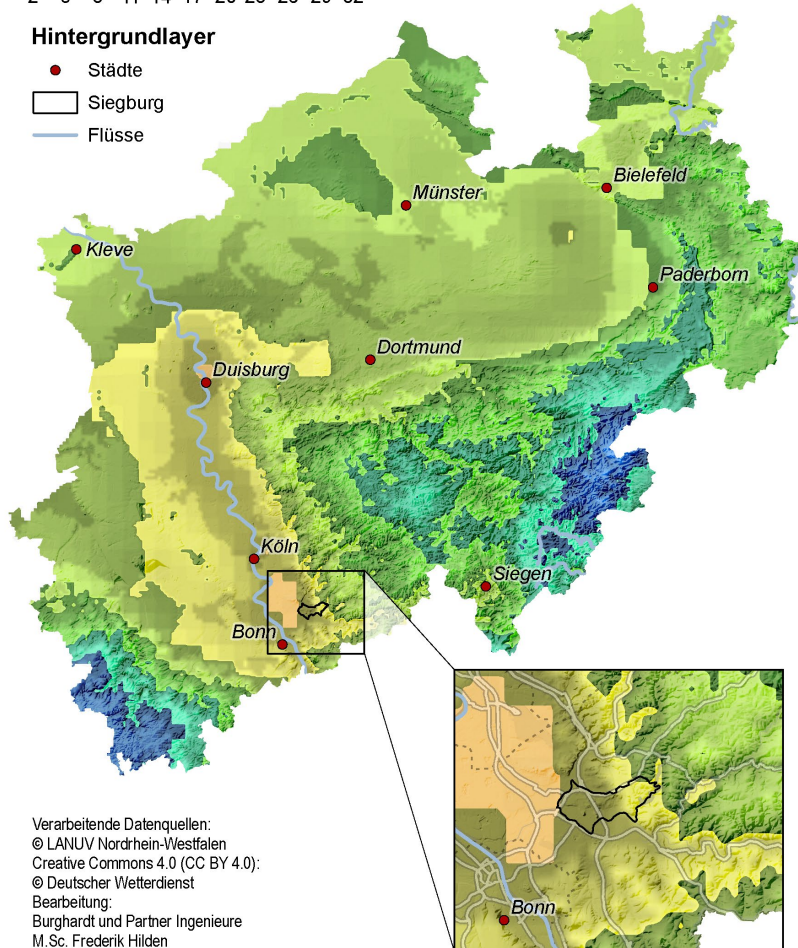
Heiße Tage (LTmax ≥ 30 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

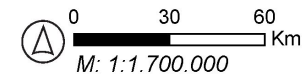
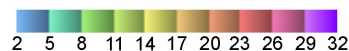


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

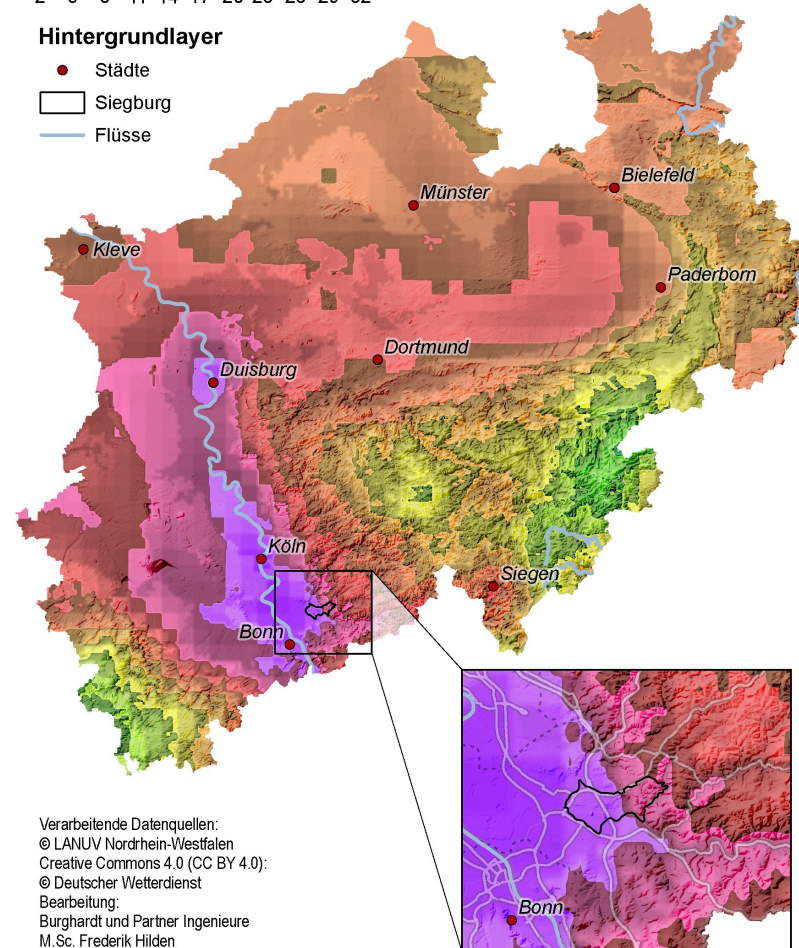
Heiße Tage (LTmax ≥ 30 °C)

Ø Tage / Jahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

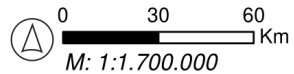


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

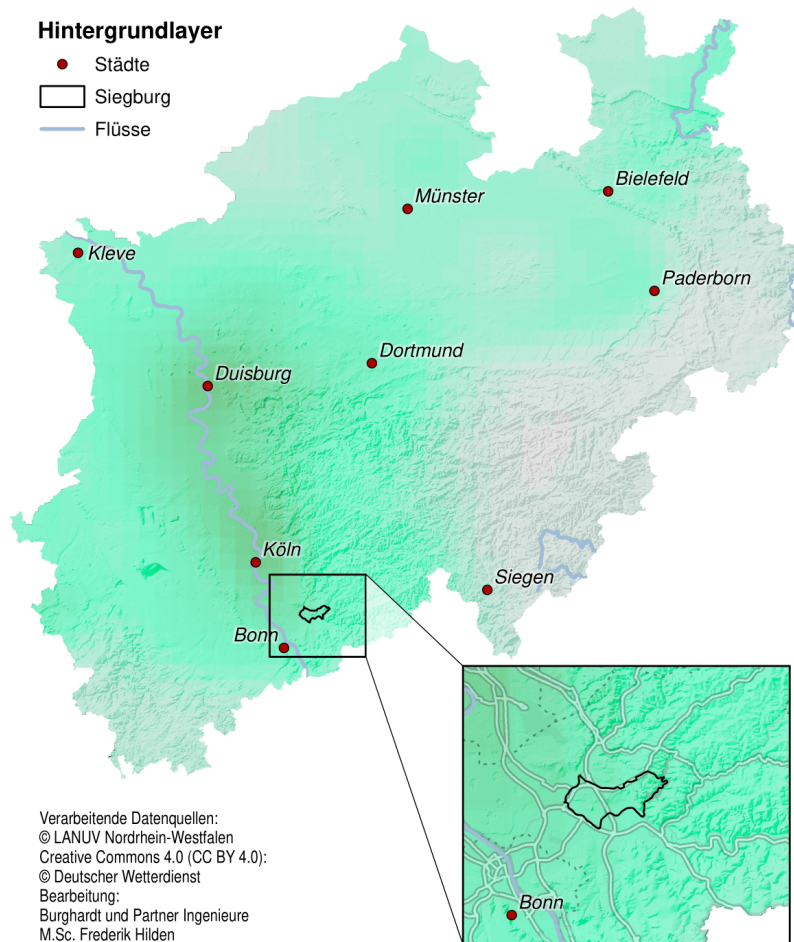
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)

Ø Tage / Jahr

**Hintergrundlayer**

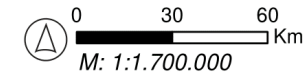
- Städte
- Siegburg
- Flüsse

**Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100**

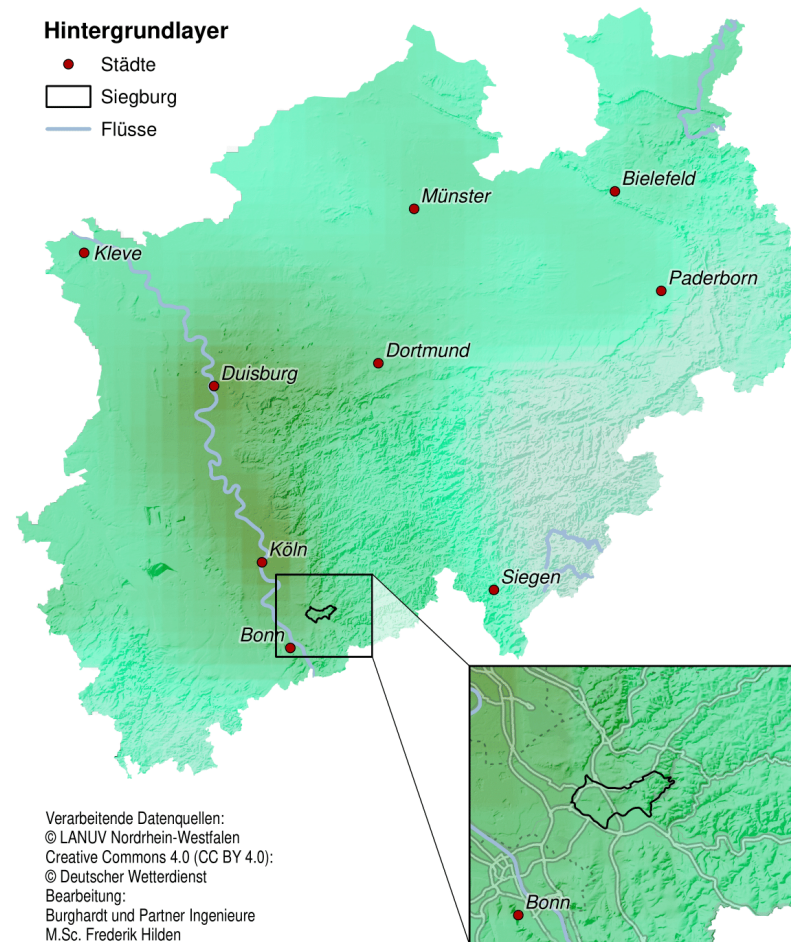
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)

Ø Tage / Jahr

**Hintergrundlayer**

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

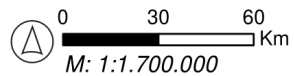


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

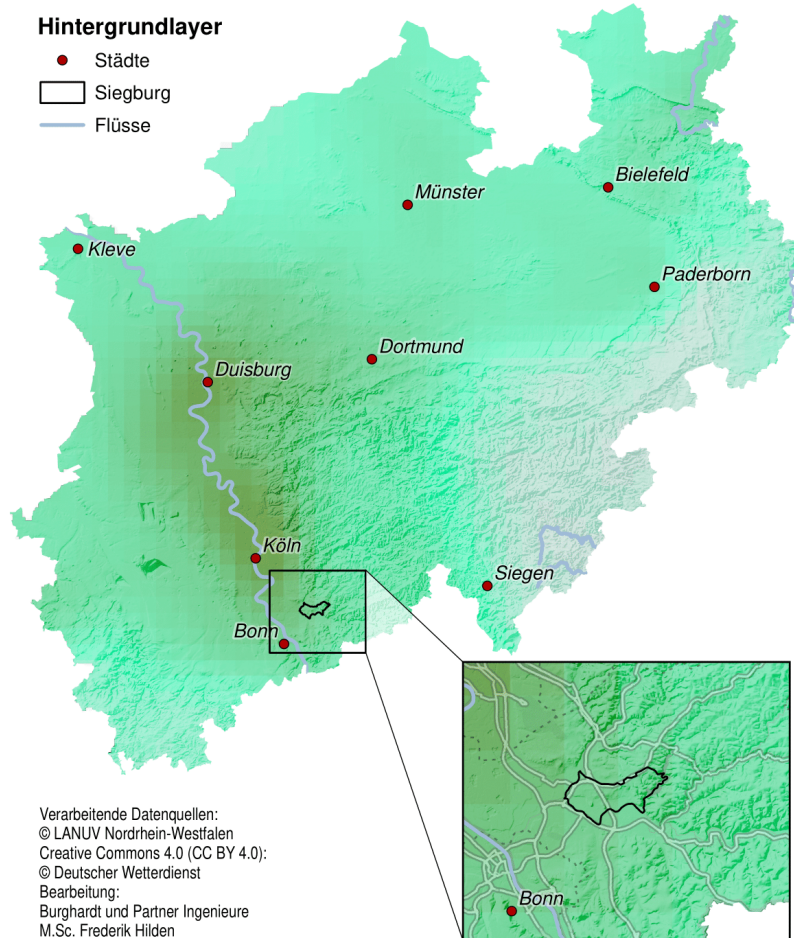
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)

Ø Tage / Jahr

**Hintergrundlayer**

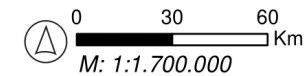
- Städte
- Siegburg
- Flüsse

**Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100**

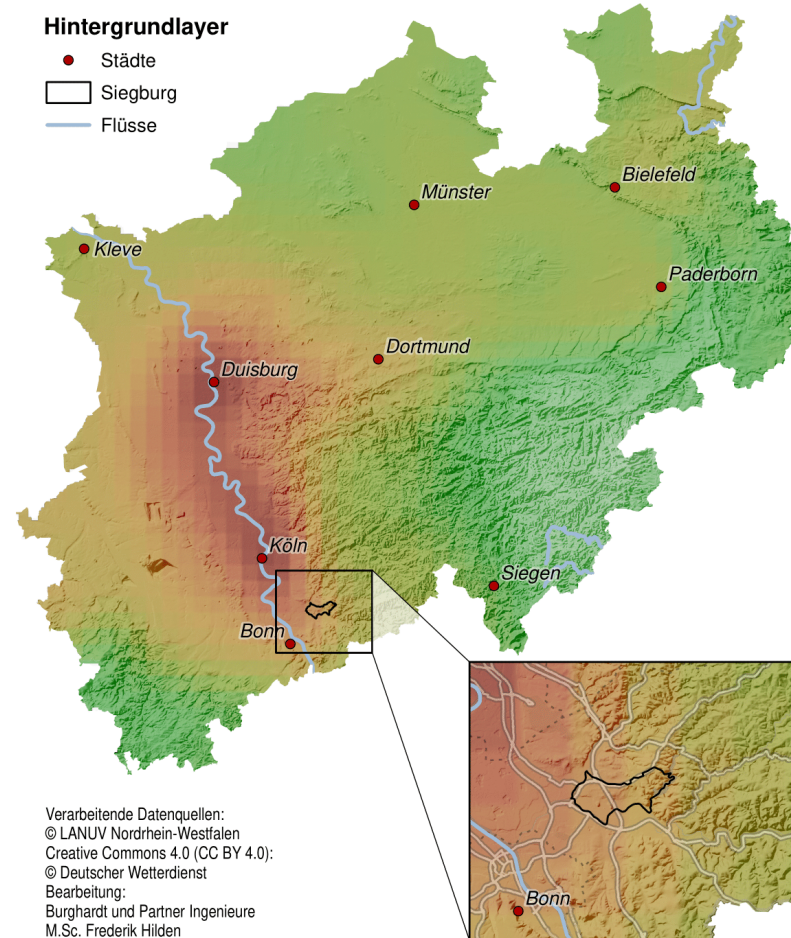
Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Tropennächte (LTmin ≥ 20 °C)

Ø Tage / Jahr

**Hintergrundlayer**

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

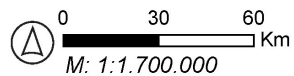


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

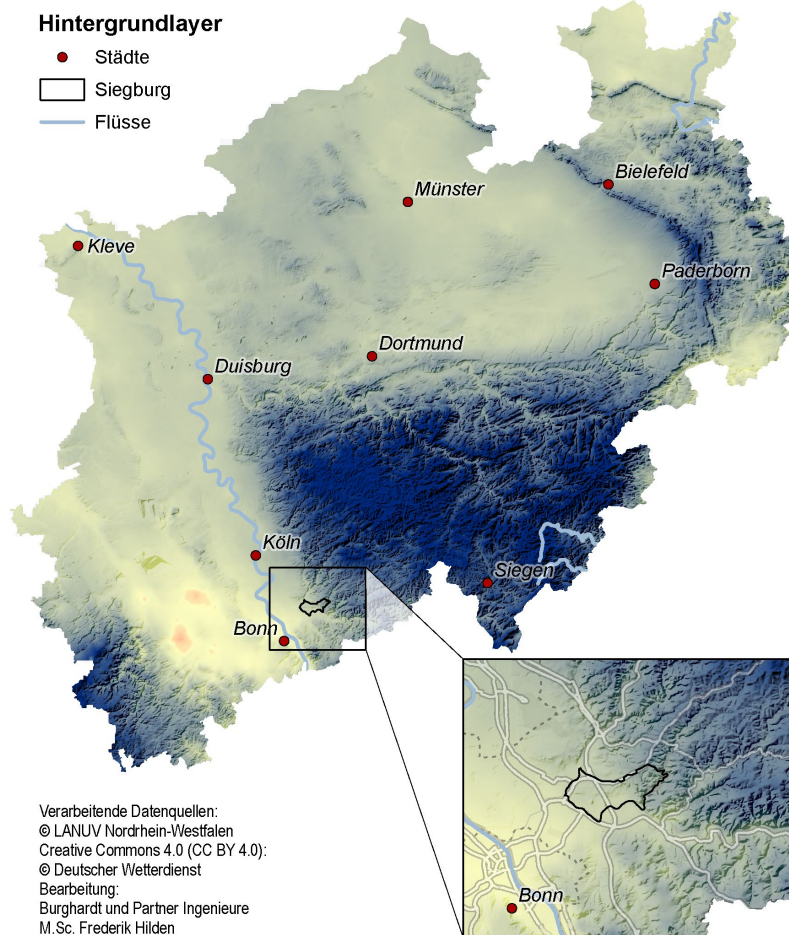
Klimatische Wasserbilanz

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

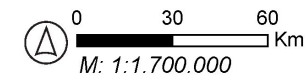


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

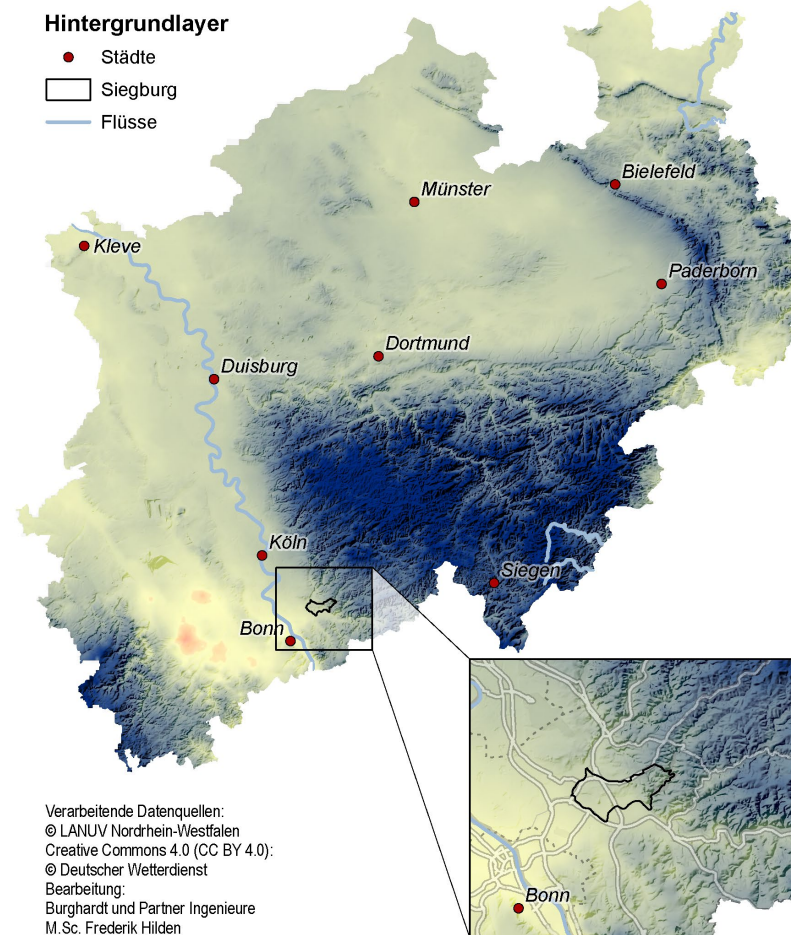
Klimatische Wasserbilanz

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

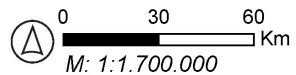


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

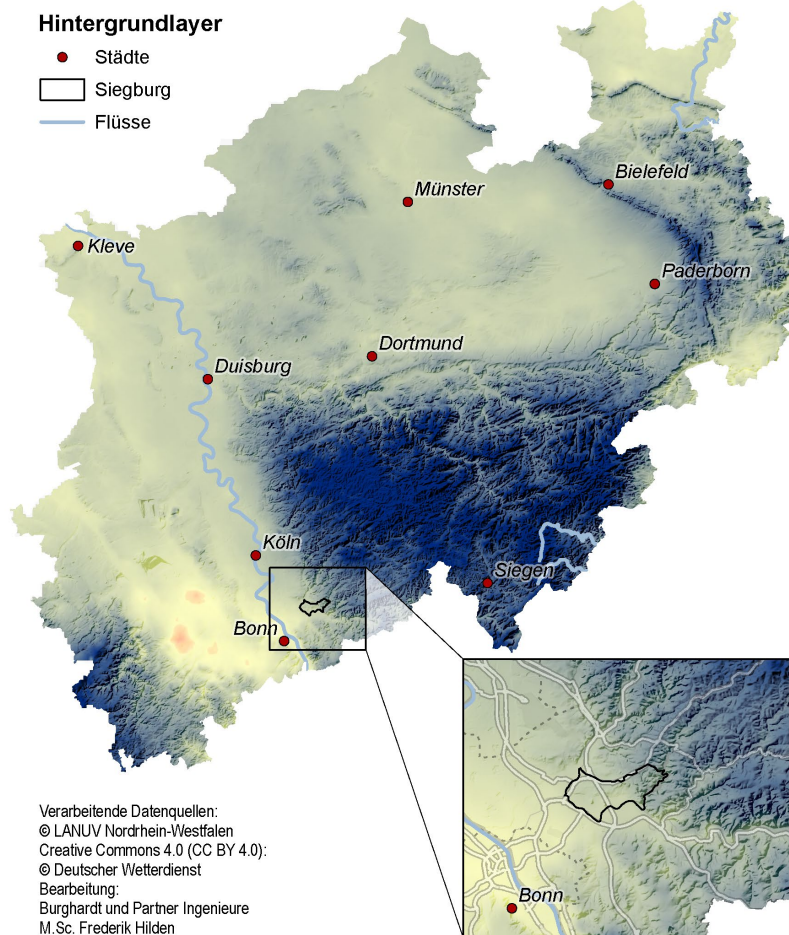
Klimatische Wasserbilanz

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

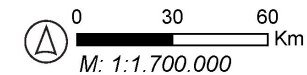


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

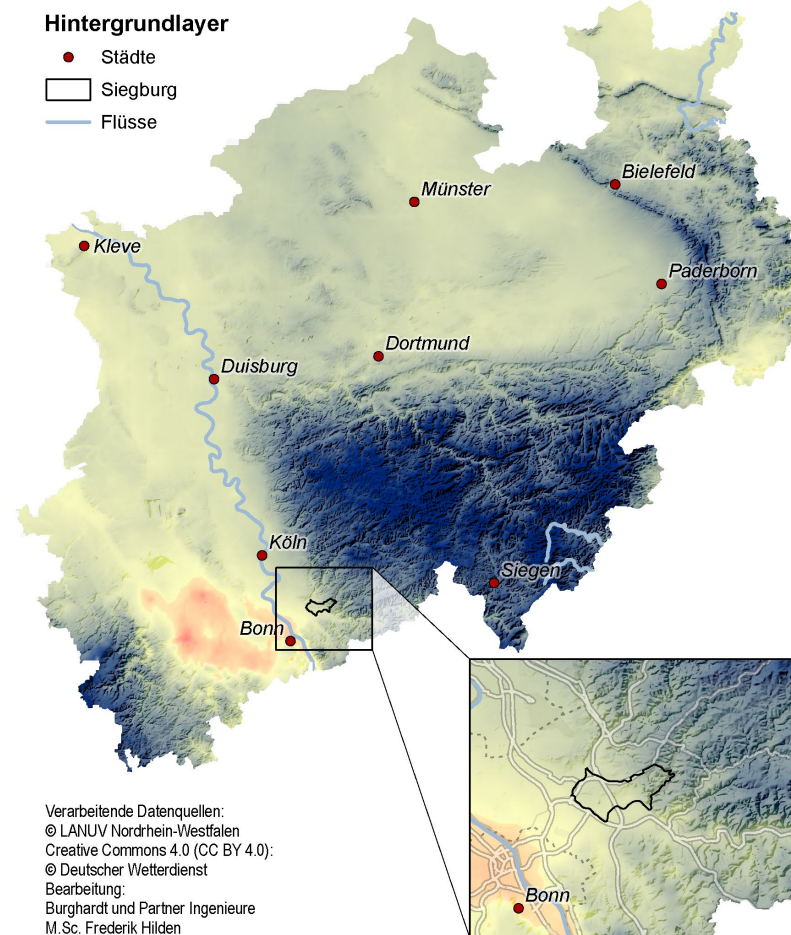
Klimatische Wasserbilanz

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

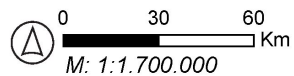


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

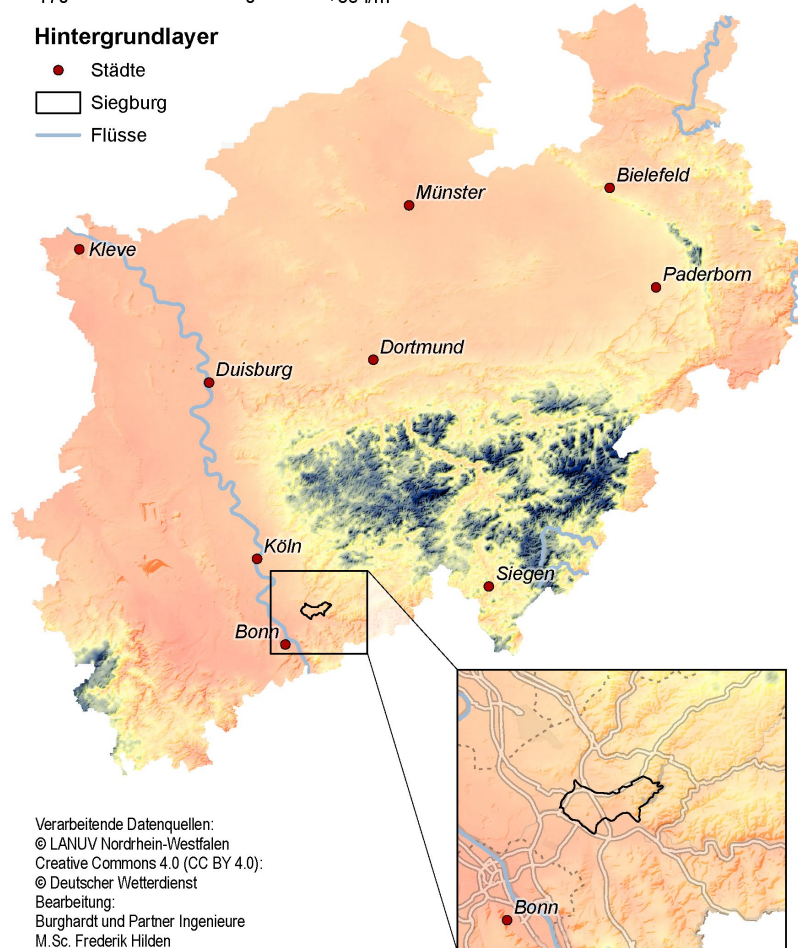
Klimatische Wasserbilanz

Sommermonate (Juni, Juli, August)



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

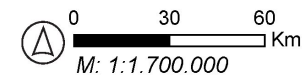


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

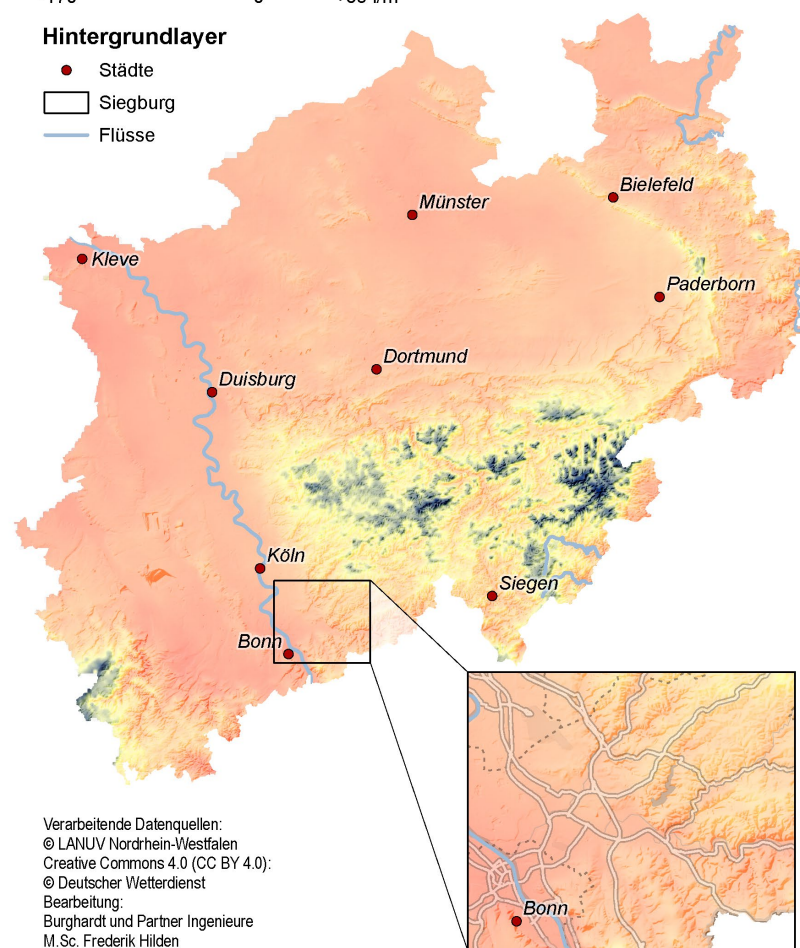
Niederschlagssumme (l/m²)

Sommermonate (Juni, Juli, August)



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

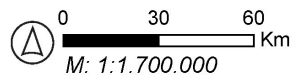


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

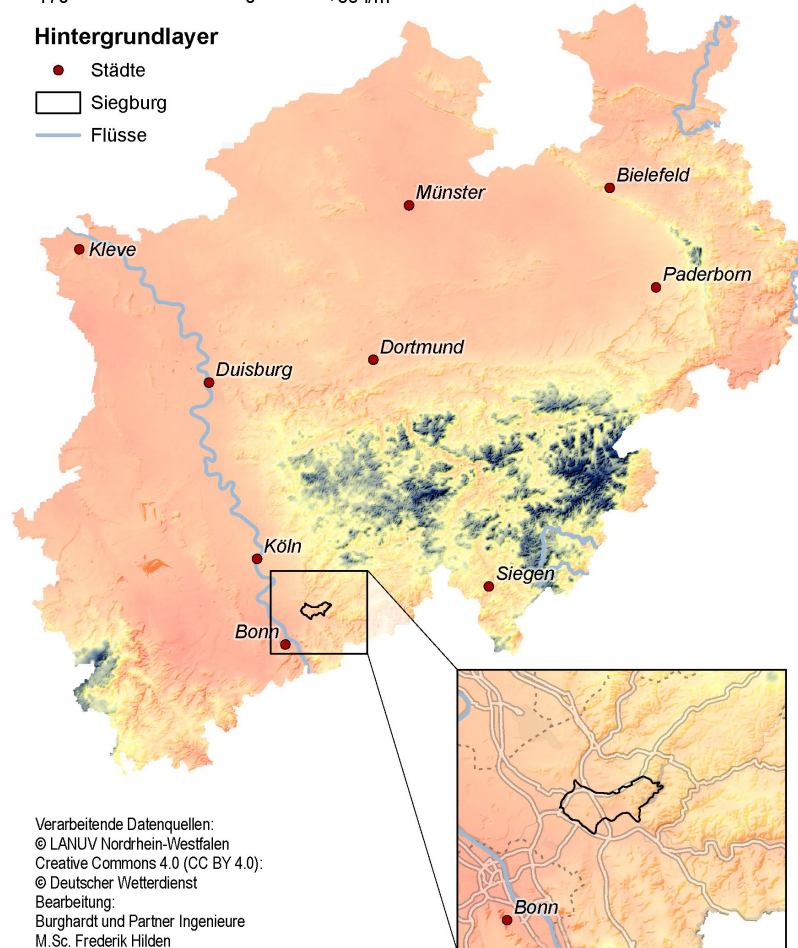
Klimatische Wasserbilanz

Sommermonate (Juni, Juli, August)



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

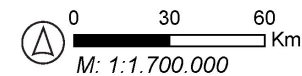


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

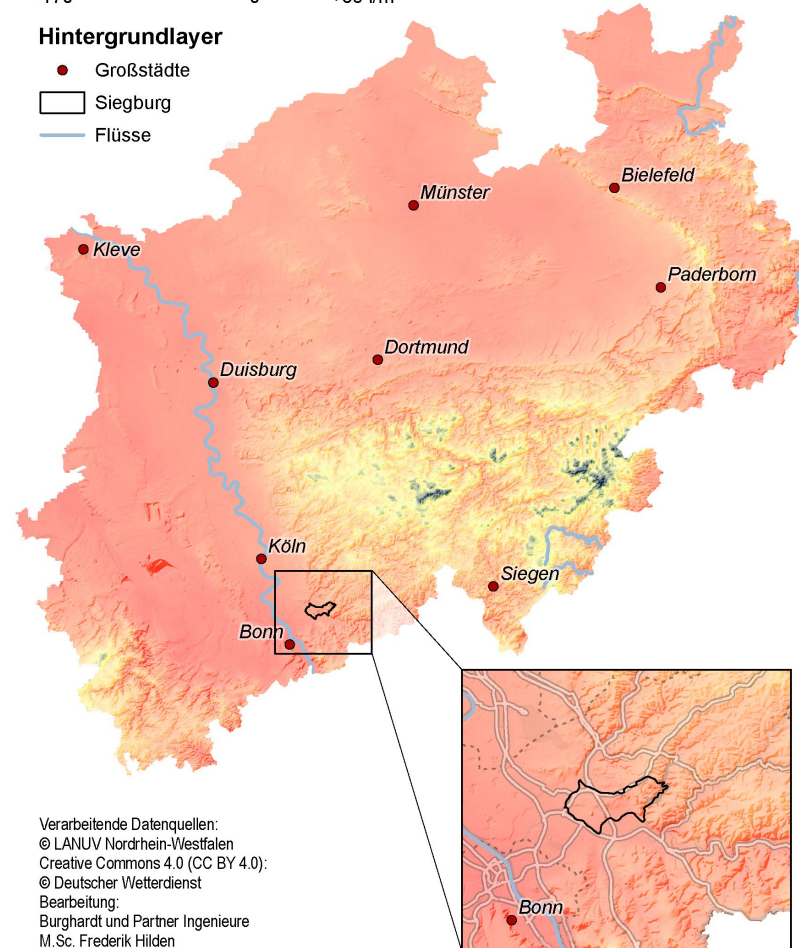
Klimatische Wasserbilanz

Sommermonate (Juni, Juli, August)



Hintergrundlayer

- Großstädte
- Siegburg
- Flüsse

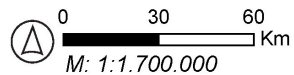


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

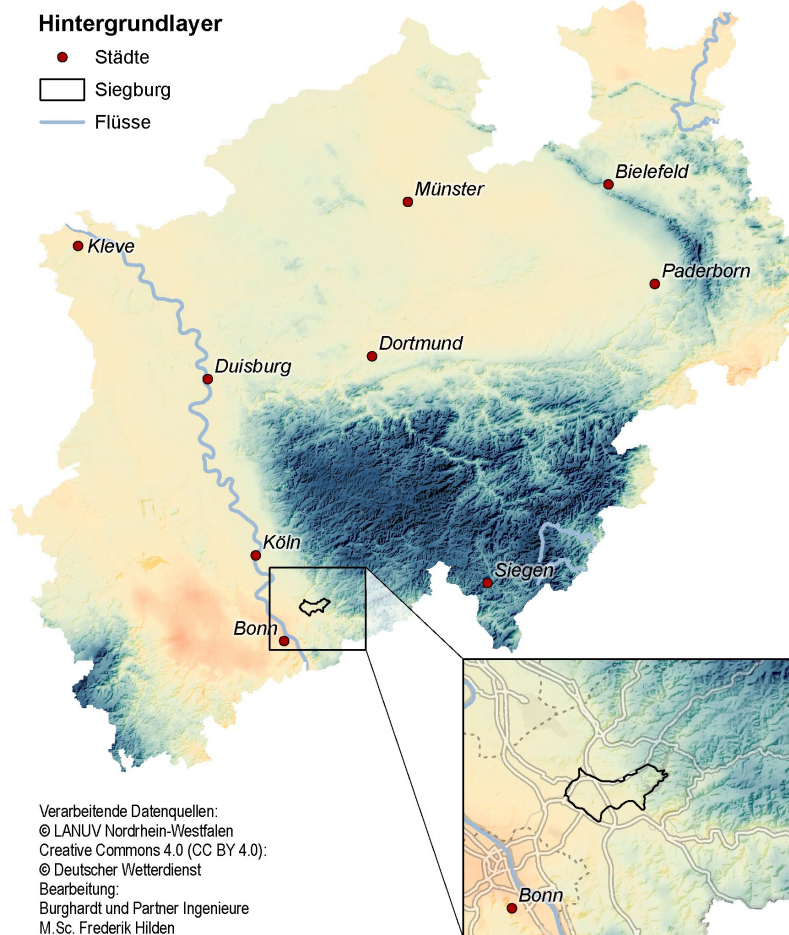
Niederschlagssumme (l/m²)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

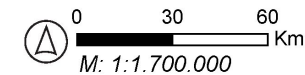


Klimaprojektion RCP 4.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

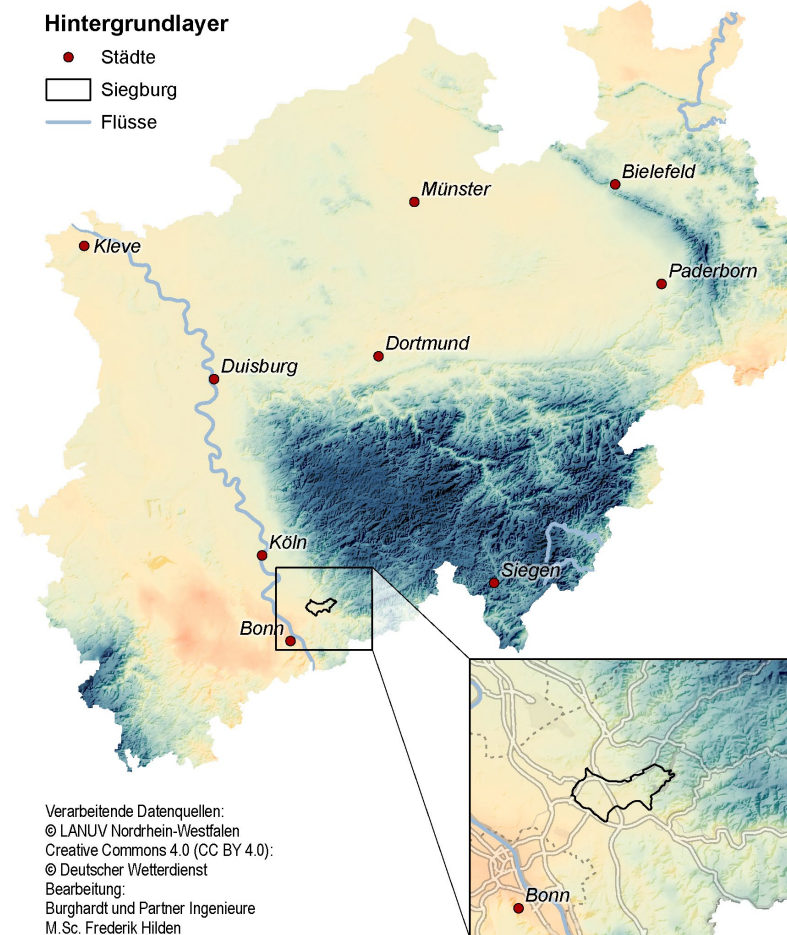
Niederschlagssumme (l/m²)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

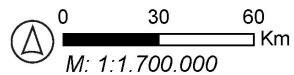


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

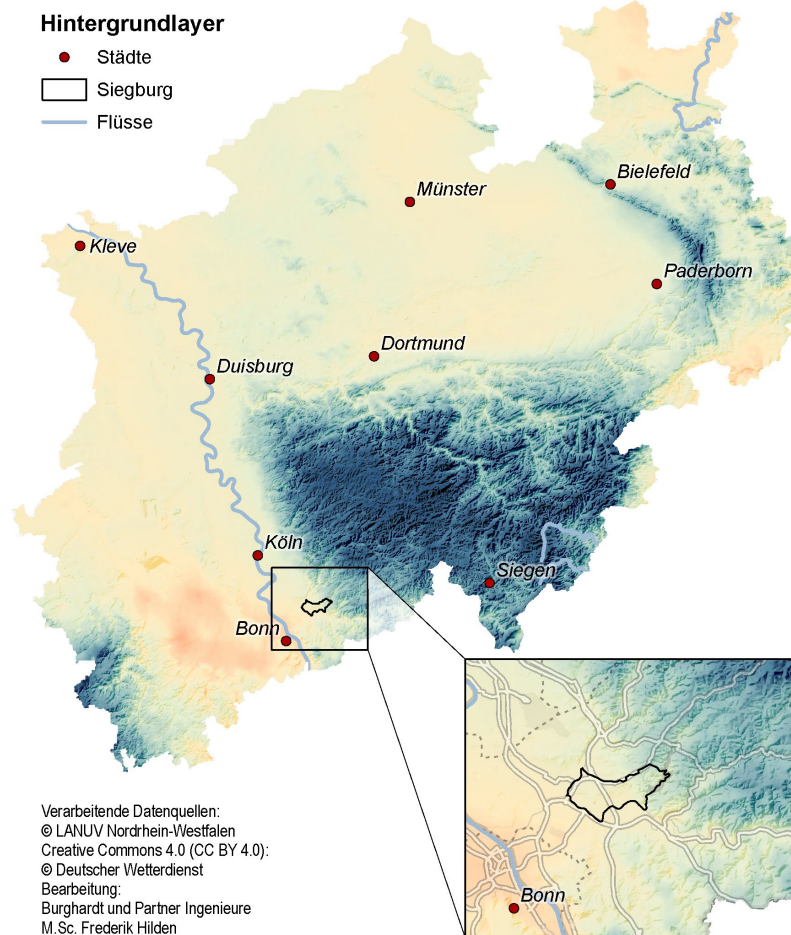
Niederschlagssumme (l/m²)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

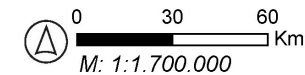


Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

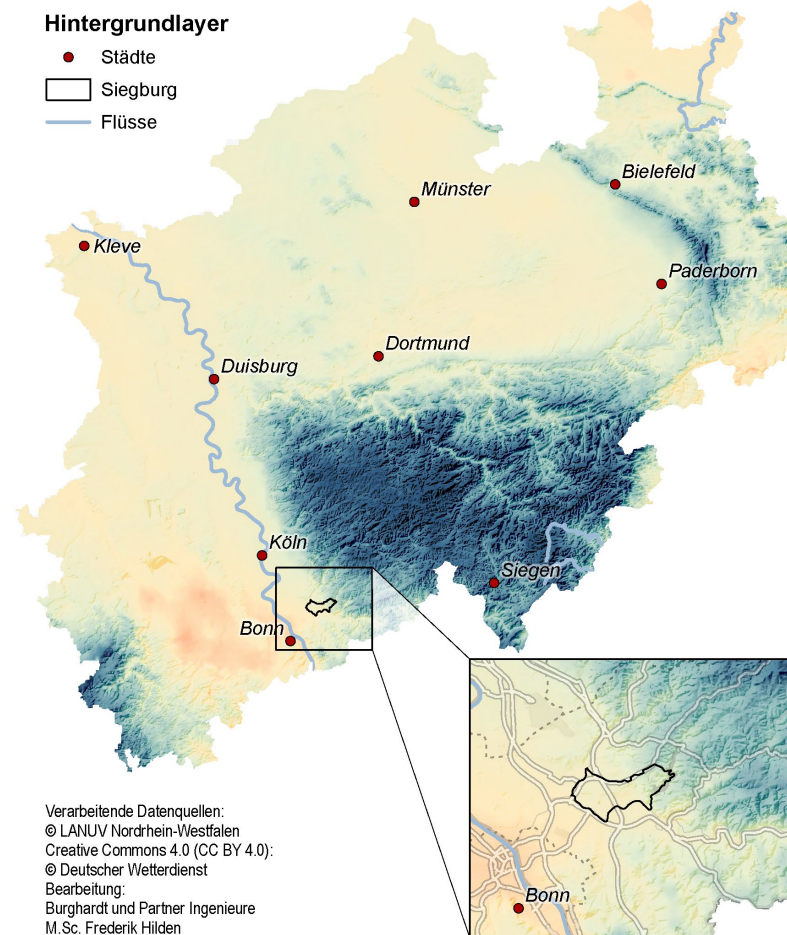
Niederschlagssumme (l/m²)

Gesamtjahr



Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse



Klimaprojektion RCP 8.5 | 2031-2060

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Niederschlagssumme (l/m²)

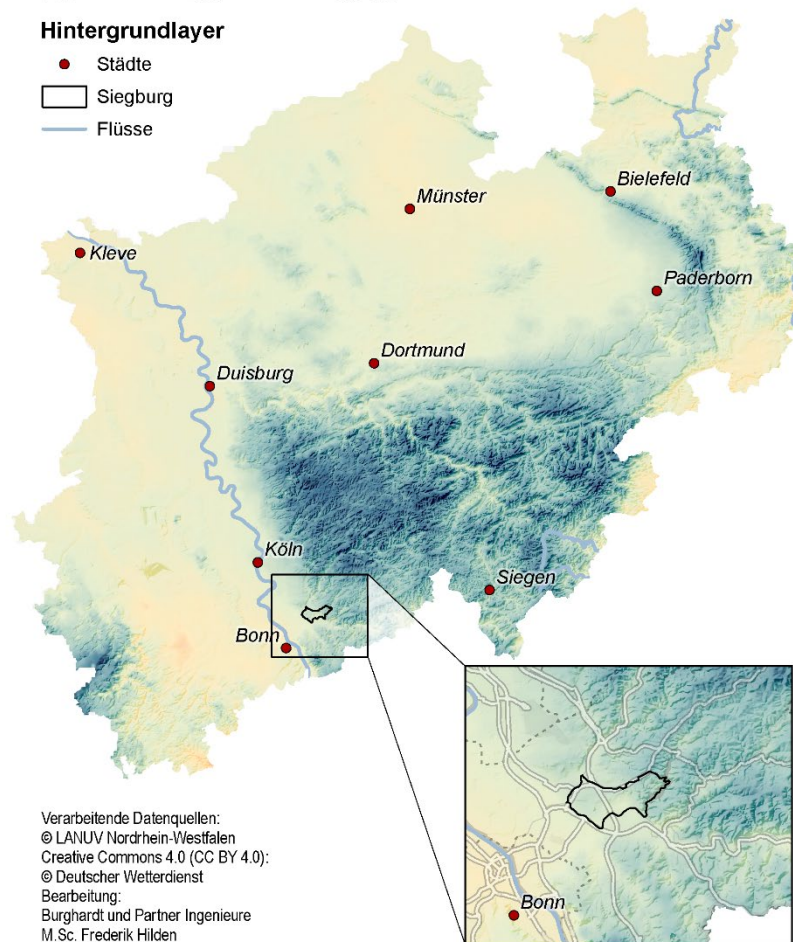
Sommermonate (Juni, Juli, August)

140 235 330 l/m²

0 30 60 Km
M: 1:1.700.000

Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse



Klimaprojektion RCP 8.5 | 2071-2100

Nordrhein-Westfalen | Siegburg

Niederschlagssumme (l/m²)

Sommermonate (Juni, Juli, August)

140 235 330 l/m²

0 30 60 Km
M: 1:1.700.000

Hintergrundlayer

- Städte
- Siegburg
- Flüsse

