



Klimawandelgerechte Metropole Köln

Abschlussbericht

LANUV-Fachbericht 50



**Klimawandelgerechte Metropole Köln
Abschlussbericht
Fachbericht 50**

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Recklinghausen 2013

IMPRESSUM

- Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
- Autoren: Ellen Grothues, Dr. Barbara Köllner, Dr. Dominika Ptak (LANUV)
Dr. Clementine Dalelane, Dr. Thomas Deutschländer, Heinz Ertel, Mario Hafer, Guido Halbig,
Thomas Kessler-Lauterkorn, Christian Koch, Dr. Meinolf Koßmann, Dr. Gabriele Malitz,
Ortrun Roll, Anna Schmitt, Elmar Weigl, Dr. Tanja Winterrath (DWD)
Christian Hartwig, Yvonne Wieczorrek (Stadt Köln)
Frank Rüsing, Ingo Schwerdorf (StEB Köln)
- Fachredaktion: Dr. Dominika Ptak, Ellen Grothues, Dr. Barbara Köllner, Guido Halbig, Thomas Kessler-Lauterkorn
- Projektleitung: Dr. Barbara Köllner und Dr. Dominika Ptak (LANUV), Guido Halbig (DWD)
- Gestaltung: Jutta Schlotthauer, dot.blue – communication & design, www.dbcd.de
- Bildnachweise: Titelfoto: © davis – Fotolia.com
© **Fotolia.com**: Tom Bayer (11), Marco2811 (13), fotos4people (31 re.), Christian Müller (34 li.),
Daniel Loretto (34 re.), K.-U. Häbler (36), Thaut Images (41), olga demchishina (58 re.), amadeus
(67), Blackosaka (71), Tom Bayer (74), The Photos (81), JS (94), fotos4people (115), Mikhail
Markovskiy (116), Kristan (120 li.), Schlegelfotos (120 mitte), unpict (132), goodluz (133)
shutterstock.com: gyn9037 (25), Abramov Timur (39), chalabala (44), Anton Oparin (110),
testing (120 re.), Portokalis (129)
Stadt Köln: (31 li., 58 li., 98, 123, 127, 130)
thinkstockphotos.de: (86, 90, 145)
- Endredaktion
und Lektorat: Susanne Nickel, www.sun-mediakomm.de
- ISSN: 1864-3930 LANUV-Fachberichte
- Informationsdienste: Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179
- Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Sehr geehrte Damen und Herren,



Nordrhein-Westfalen ist das bevölkerungsreichste und am dichtesten besiedelte Bundesland; jeder zweite Einwohner lebt oder arbeitet in einer Großstadt.

Großstädte sind jedoch für die Folgen des Klimawandels besonders anfällig. Gerade in den meist verdichteten Innenstädten mit wenigen Grünflächen sind die zu erwartenden längeren Hitzeperioden und häufiger auftretenden Starkregenereignisse eine besondere Herausforderung für die Stadtentwicklung.

Als größte Stadt Nordrhein-Westfalens ist Köln ein gutes Beispiel, um die Folgen des Klimawandels zu untersuchen und geeignete Anpassungsmaßnahmen für Großstädte und Ballungsräume zu entwickeln.

Das Projekt „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ wurde vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen mit dem Deutschen Wetterdienst in enger Kooperation mit der Stadt Köln und den Stadtentwässerungsbetrieben Köln, AöR, durchgeführt.

In dem vorliegenden Abschlussbericht sind die wesentlichen Methoden und Ergebnisse beschrieben. Darauf basierend werden Empfehlungen für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung gegeben.

Das Projekt soll dazu beitragen, die Lebensqualität in unseren Städten auch unter den Vorzeichen des Klimawandels zu sichern und zu steigern.

Ich wünsche Ihnen eine spannende und aufschlussreiche Lektüre.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Bottermann', written in a cursive style.

Dr. Heinrich Bottermann
Präsident des
Landesamtes für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhalt

	Zusammenfassung	8
1	Einleitung	10
2	Untersuchungsgebiet	12
3	Methoden	24
	3.1 Stationäre Messungen	25
	3.2 Profildfahrten	29
	3.3 Wärmebelastung und Hitzewarnung	31
	3.4 Stadtklimamodell Muklimo_3	32
	3.5 Extremwertstatistische Auswertungen von stündlichen Radarniederschlagsdaten	35
	3.6 Niederschlagstrends in Köln auf der Basis regionaler Klimamodellierung und Extremwertstatistik	40
4	Ergebnisse	44
	4.1 Stationäre Messungen	45
	4.2 Profildfahrten	55
	4.3 Wärmebelastung und Hitzewarnung	59
	4.4 Ergebnisse der Modellierungen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3	62
	4.5 Extremwertstatistische Auswertungen von stündlichen Radarniederschlagsdaten	80
	4.6 Niederschlagstrends in Köln auf der Basis regionaler Klimamodellierung und Extremwertstatistik	88
5	Fallstudien	90
	5.1 Human-bioklimatische Bewertung für den Gestaltungsplan eines Teils des Großmarktgeländes in Köln	91
	5.2 Klimawandel und Überflutungsrisikobetrachtungen mit Einsatz neuer Niederschlag- Abfluss-Modelle	106
6	Planungsempfehlungen	116
	6.1 Planungshinweiskarte	117
	6.2 Betroffenheitsgebiete in Köln	123
	6.3 Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel in Köln	125

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist Realität. Weltweit muss mit Auswirkungen auf Natur- und Umwelt gerechnet werden – auch in Nordrhein-Westfalen. NRW ist durch seine großen Ballungsräume und Städte besonders hinsichtlich des Stadtklimas von dieser Problematik betroffen. Daher ist es wichtig, frühzeitig Maßnahmen zu ergreifen und sich an die – nach derzeitigem Wissensstand – nicht mehr aufzuhaltenden Folgen des Klimawandels anzupassen.

Im Rahmen des Projektes „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ wurde die größte Stadt Nordrhein-Westfalens hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels untersucht. Mit Blick auf die im Vordergrund stehenden Aspekte „Wärmebelastung“ und „Starkniederschläge“ wurden für die Untersuchung verschiedene Ansätze gewählt. Ein mobiles Messnetz, das zusätzlich zu den bereits bestehenden Klimamessstationen in Köln eingerichtet wurde, trug dazu bei, dass die aktuelle meteorologische Situation im Stadtgebiet über zwei Jahre räumlich differenziert beobachtet werden konnte. Darüber hinaus kamen verschiedene Methoden zur Anwendung, um Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Stadtklimas zu erhalten. Hier stellt insbesondere das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wichtige Aussagen bereit. Pilothafte Auswertungen von Radar-Niederschlagsdaten und Klimaprojektionsdaten liefern für die Thematik der Starkniederschläge wichtige Aussagen. Im Rahmen von zwei Fallstudien wurden für zwei ausgewählte Gebiete in der Stadt Köln beispielhaft eine Wärmebelastungsanalyse mit dem Stadtklimamodell ENVI-met und eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung durchgeführt. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für Planungsempfehlungen, die das Projekt abrunden.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Innenstadt und die dicht bebauten Stadtteile in Köln bereits heute gegenüber dem Stadtrand eine deutliche Wärmeinsel darstellen. Es wurden maximale Differenzen zwischen Umland und Innenstadt von mehr als zehn Grad gemessen. Überwärmt sind insbesondere die sehr dicht bebauten Bereiche in der Innenstadt. Hier ist vor allem die nächtliche Abkühlung durch die Speicherung der Wärme in Gebäuden und Straßen sehr verzögert. In Teilen der Stadt mit Grünzügen hingegen ist die Wärmebelastung geringer, unter anderem durch Kaltluftproduktion und Transpirationsprozesse der Vegetation.

Anhand vieljähriger meteorologischer Zeitreihen konnte gezeigt werden, dass die Temperatur im Stadtgebiet von Köln während der letzten Jahrzehnte signifikant angestiegen ist. Ein Blick auf die Situation zur Mitte des Jahrhunderts mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3, das regionale Klimaprojektionen nutzt, verdeutlicht, dass dieser Trend sich fortsetzen wird und zukünftig noch häufiger mit starker Wärmebelastung zu rechnen ist. Tage mit Temperaturen über 25 (Sommertage) oder 30 Grad (heiße Tage) werden im gesamten Stadtgebiet zunehmen: Sommertage um 30 bis 70 Prozent, und die Zahl der heißen Tage kann sich sogar verdoppeln. Insbesondere in Stadtteilen mit starker Wärmebelastung und zugleich hohem Anteil sensibler Bevölkerung, wie beispielsweise älterer Menschen, kann die Gesundheit der Stadtbewohner beeinträchtigt werden und sich die Lebensqualität erheblich vermindern. Zugleich wurde aufgezeigt, dass die Stadtteile genau zu betrachten sind, in denen es durch Bebauungsverdichtung oder Zunahme an Versiegelung zu einem starken Anstieg der Wärmebelastung kommen kann.

Um hinsichtlich dieser Problematik zu konkreten Lösungsvorschlägen zu gelangen, wurde im Rahmen einer Fallstudie mit dem Modell ENVI-Met am Beispiel des „Großmarktgeländes Raderberg“ eine Modellierung der Wärmebelastung vorgenommen. Dieses Gelände soll zukünftig neu beplant werden, ein Gestaltungsvorschlag liegt bereits vor. Im Rahmen der Fallstudie konnte anhand verschiedener Planungsvarianten gezeigt werden, dass mit Hilfe von konkreten Maßnahmen die Luftzufuhr deutlich optimiert und eine Überhitzung an heißen Tagen stellenweise deutlich reduziert werden kann. Hierzu gehören beispielsweise die Ausrichtung der Gebäude-Längsachsen in Richtung der Durchlüftungsbahnen, die Verschattung von südlich und westlich ausgerichteten Fassaden mit Bäumen beziehungsweise Fassadenbegrünung und die klimatisch optimale Anlage von Grünflächen und Parks. Im Sinne einer vorausschauenden Planung sollten diese Erkenntnisse frühzeitig bei der Stadtplanung berücksichtigt werden.

Abschließend wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eine Planungshinweiskarte erstellt. Dieser Karte kann entnommen werden, welche Bereiche in Köln besonders klimarelevant sind und daher von dichten Bebauungen freigehalten beziehungsweise durch eine

klimaangepasste Bebauung möglichst wenig beeinträchtigt werden sollten. Eine Betroffenheitskarte zeigt darüber hinaus die Bereiche in Köln, die durch die Kombination von Hitzebelastung und einem hohen Anteil älterer Menschen besonders sensibel gegenüber Hitze sind. Die Karten dienen als Grundlage, bei Neuplanungen (z. B. von Seniorenstiften) Gebiete mit hoher Betroffenheit zu meiden, genauer zu analysieren oder den Mehraufwand zur Gestaltung klimawandelangepasster Wohnungssituationen und für ein gesundes Umfeld im Vorfeld abzuschätzen.

Bezüglich des Themas Starkniederschlag wurden langjährige Messreihen von Messstationen in Köln (DWD, LANUV, StEB) ausgewertet. Dabei deutet sich an, dass in den vergangenen Jahrzehnten Starkniederschläge zugenommen haben, wenn auch nicht statistisch signifikant. Die Untersuchung hat gezeigt, dass fast alle hier relevanten Starkniederschlagsereignisse im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) zu verzeichnen waren. Im Rahmen einer extremwertstatistischen Untersuchung wurden ergänzend regionale Klimaprojektionen für den Raum Köln ausgewertet. Diese Ergebnisse geben Hinweise darauf, dass lokale Starkregenereignisse infolge des Klimawandels zukünftig deutlich zunehmen können. Die hohe räumliche Variabilität von Starkniederschlagsereignissen ist mit einem ortsfesten Bodenmessnetz aufgrund der eingeschränkten Messnetzdicke meist nur unzureichend erfassbar. Eine adäquate Vorsorge in Hinblick auf die Folgen von Starkniederschlagsereignissen erfordert jedoch eine hohe zeitliche und räumliche Kenntnis solcher Ereignisse. Es wurden daher erstmalig angeeichete Radarbilder auf der Basis des RADOLAN-Verfahrens des DWD verwendet, um Aussagen über Starkniederschlagsereignisse flächendeckend für das Stadtgebiet Kölns zu erhalten. Das Verfahren liefert ein deutlich differenzierteres räumliches Muster hinsichtlich des Starkregenverhaltens für das Stadtgebiet Kölns. Bisher umfasst die RADOLAN-Zeitreihe nur sechseinhalb Jahre, so dass nicht abschließend bewertet werden kann, ob die dargestellte räumliche Verteilung der Maxima durch zufällige Einzelereignisse bestimmt ist. Die Ergebnisse vermitteln jedoch einen ersten Eindruck, welches mächtige Werkzeug in wenigen Jahren den Städteplanern zur Verfügung stehen kann mit räumlich hochaufgelösten radarbasierten Niederschlagsklimatologien und Aus-

gen zu der Häufigkeit von Extremniederschlagsereignissen. Gerade auch in Verbindung mit Niederschlags-Abfluss-Modellierungen können dann detaillierte Maßnahmen für das Stadtgebiet abgeleitet werden.

Im Rahmen einer Fallstudie wurde anhand von Modellregenen für den Stadtteil Porz eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung durchgeführt. Anpassungsmaßnahmen zur Wasserrückhaltung im Kanalnetz (z. B. an Sonderbauwerken) und an der Geländeoberfläche führten dazu, dass überstautes Regenwasser besser abgeleitet, beziehungsweise auf der Oberfläche zurückgehalten werden konnte. Durch diese Maßnahmen konnten die errechneten Wasserstände auf der Oberfläche deutlich gesenkt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass für eine Überflutungsvorsorge eine Kombination von Maßnahmen der Stadtentwässerung im Kanalnetz sowie der Stadtplanung und -entwicklung auf der Oberfläche notwendig ist. Ergänzend sind jedoch zur Vorsorge gegen extreme Niederschläge zusätzliche Objektschutzmaßnahmen zu empfehlen. Beispielhaft wurde als Hilfe ein Stufenkonzept zur Bewertung des Gefährdungspotenzials der von Überflutung betroffenen Stadtbereiche erarbeitet. Insgesamt werden auf der Basis der Projektergebnisse Planungsempfehlungen und Maßnahmen für sieben Handlungsfelder vorgeschlagen. Im Sinne einer vorausschauenden Stadtplanung und -entwicklung sollte es das Ziel sein, bereits heute bei anstehenden Planungen das Thema Klimawandel mit einzubeziehen. Den Auswirkungen von Hitzebelastung und Starkniederschlägen kann auf diese Weise entgegengewirkt werden. Diese Maßnahmen können nicht nur in Köln, sondern analog auch in den anderen Kommunen Anwendung finden.

1 Einleitung

Der Klimawandel ist Realität. Global steigen die Temperaturen an. Auch in Nordrhein-Westfalen ist dies anhand meteorologischer Zeitreihen zu belegen (LANUV 2011). So ist die Temperatur seit Anfang des 20. Jahrhunderts bis heute um 1,1 °C angestiegen. Seit 1988 liegen mit Ausnahme von zwei Jahren alle Jahresmittelwerte oberhalb des vieljährigen Mittelwertes von 9,1 °C. Auswirkungen dieser Temperaturzunahme sind auch heute schon in Natur und Umwelt Nordrhein-Westfalens zu beobachten.

Das Weißbuch der Kommission der Europäischen Gemeinschaften zur Anpassung an den Klimawandel (KOM 2009) benennt Stadtgebiete als Bereiche, die mit besonderen Problemen aufgrund des sich wandelnden Klimas konfrontiert werden. Speziell für städtische Ballungszentren müssen mögliche Gesundheitsgefährdungen durch eine verstärkte und andauernde Aufheizung (Hitze-/Wärmebelastung) sowie andere Extremereignisse wie Starkniederschläge (Überlastung der Kanalisation) untersucht werden. Diese Ergebnisse sind die Grundlage für die Entwicklung von Planungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen, um die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels zu mindern oder zu vermeiden (DAS 2008).

In Nordrhein-Westfalen leben mehr als acht Millionen Menschen in Städten mit mehr als 100.000 Einwohnern und Einwohnerinnen. Gerade hier gilt es somit, sich vorausschauend und rechtzeitig den Folgen des Klimawandels anzupassen und zu erwartende Risiken abzumildern.

Die Klimaverhältnisse in der Stadt unterscheiden sich bereits ohne den Einfluss des Klimawandels deutlich von denen im Umland. So absorbieren Fassaden und Straßen die einfallende Sonnenstrahlung und speichern sie als Wärmeenergie. Hausbrand, Autos und Industrie setzen Wärme frei und heizen die Stadt zusätzlich auf. Gleichzeitig sind Vegetation und Wasserflächen im Vergleich zum Umland in geringerem Umfang vorhanden, so dass Abkühlungsprozesse durch Verdunstung und Transpiration vermindert sind. Oft ist zusätzlich die Zufuhr kühlerer Luft aus dem Umland gestört oder nur auf wenige Durchlüftungsbahnen, wie zum Beispiel große

Straßenzüge, begrenzt. Städte bilden daher gegenüber ihrem Umland Wärmeinseln aus. Innerhalb der Städte zeigt sich dieser Effekt in unterschiedlicher Intensität.

Durch die steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels werden Ballungsräume zukünftig insbesondere durch zwei Aspekte zusätzlich belastet. Zum einen wird erwartet, dass Hitzeperioden häufiger auftreten, länger andauern und durch höhere Temperaturen gekennzeichnet sein können. Während solcher lang andauernder Hitzeperioden steigt die Wärmebelastung stark an und die fehlende Abkühlung in der Nacht führt dazu, dass die Erholung deutlich vermindert wird: Dies kann die Gesundheit insbesondere von Kindern, älteren und kranken Menschen gefährden, aber auch das Wohlbefinden und die Arbeitsfähigkeit der Stadtbewohner und -bewohnerinnen beeinträchtigen. Zum anderen ist damit zu rechnen, dass die ansteigenden Temperaturen zu veränderten Niederschlagsmustern führen. Es wird erwartet, dass Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen zunehmen und Ballungsräume dadurch noch stärker als bisher gefährdet sind, führen diese doch bereits heute hier oft zu Schäden an der Infrastruktur und verursachen hohe Kosten. Das Wasser kann in Städten vielfach nur oberirdisch abfließen, die Kanalisationen sind in der Regel nicht für besonders heftige Ereignisse ausgelegt.

Im Rahmen dieser Pilotstudie wurden die Thematiken der Wärmebelastung beziehungsweise Hitzeinseln und der Starkniederschläge im Kontext des Klimawandels und am Beispiel der Stadt Köln analysiert, die als größte Stadt in NRW in besonderem Maße dafür geeignet scheint.

Die Studie wurde als Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen und dem Deutschen Wetterdienst durchgeführt. Weitere Partner waren die Stadt Köln mit dem Umwelt- und Verbraucherschutzamt und die Stadtentwässerungsbetriebe Köln (StEB). Durch diese Zusammenarbeit war eine an der Praxis orientierte Ausrichtung des Projektes möglich. Zudem wird sichergestellt, dass die Ergebnisse in der Planung Verwendung finden können.

1.1. Ziele

Ziel der Studie ist es, das Kölner Stadtgebiet hinsichtlich der Gefährdung durch Wärmebelastung und Starkniederschläge zu untersuchen. Durch umfangreiche Messungen und Analysen sollen Bereiche aufgezeigt werden, in denen bereits heute das Stadtklima zu einer besonderen Wärmebelastung führt. Darauf aufbauend sollen – anhand von regionalen Klimaprojektionen – städtische Räume identifiziert werden, in denen zukünftig mit verstärkten Wärmebelastungen zu rechnen ist. Da aber die Wärmebelastung insbesondere dort zu Betroffenheit und Anfälligkeit führt, wo zusätzlich sensible Bereiche vorliegen, werden parallel zur Wärmebelastung diejenigen Bereiche identifiziert, in denen die Bevölkerung durch bestimmte Aspekte besonders anfällig ist: Indikatoren hierfür sind zum Beispiel die Altersstruktur und die Verteilung der Alten- und Pflegeheimplätze.

Analog wird die Stadt Köln auf ihre Anfälligkeit bezüglich extremer Niederschlagsereignisse untersucht. Neben der Frage, ob Extremniederschläge bis Mitte des Jahrhunderts zunehmen werden, wird beispielhaft aufgezeigt, wo in der Stadt große Mengen an Niederschlagswasser in kurzer Zeit zu Schäden führen können. Im Rahmen einer Kanalnetzmodellierung werden für den Stadtteil Porz Fließwege und Sammelstellen dargestellt. Darauf aufbauend werden Schwachstellen im Kanalnetz und in der Stadtplanung angesprochen.

Basierend auf diesen detaillierten Untersuchungen zum derzeitigen und zukünftigen Klima werden beispielhaft Ideen, Lösungsvorschläge und Planungsempfehlungen aufgezeigt, die dazu beitragen sollen, die Auswirkungen des Klimawandels in Köln abzumildern und die Gesundheit und Lebensqualität der Stadtbewohner und -bewohnerinnen nachhaltig zu sichern.



Literatur

- DAS, 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- KOM, 2009: Weißbuch der Kommission der Europäischen Gemeinschaften „Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen“ (KOM(2009) 147)
- LANUV, 2011: Klima und Klimawandel in NRW, LANUV-Fachbericht 27. Recklinghausen



2 Das Untersuchungsgebiet

Nach der Einordnung des Untersuchungsgebietes in die **naturräumliche Lage** (Kap. 2.1) werden die **Stadtstruktur** (Kap. 2.2) mit Einwohnerzahlen sowie die **Flächennutzungsverteilung** (Kap. 2.3) der Stadt Köln beschrieben. Die Darstellung des Stadtklimas erfolgt über das **Makroklima** (Kap. 2.4) (Periode 1981 bis 2010) sowie die **Klimaentwicklung** (Kap. 2.5) der vieljährigen Periode 1958 bis 2010.

2.1 Die naturräumliche Lage der Stadt Köln

Das Stadtgebiet von Köln befindet sich hinsichtlich der naturräumlichen Gliederung weitestgehend im Bereich der Köln-Bonner Rheinebene (auch als Kölner Bucht im engeren Sinne bezeichnet). Lediglich der Ostrand der Stadt zählt zu den Bergischen Heideterrassen. Beide bilden zusammen mit den weiter westlich gelegenen naturräumlichen Haupteinheiten der Ville sowie der Jülicher und Zülpicher Börde die Niederrheinische Bucht, mit der das Nordwestdeutsche Tiefland trichterförmig in das Mittelgebirge eingreift (Naturräumliche Gliederung, 1963; 1978). Der Nordabfall der Eifel und des Vennvorlandes im Westen sowie die Ränder des Bergischen Landes, des Westerwaldes und des Siebengebirges im Osten bilden markante Grenzen der Niederrheinischen Bucht, die sich nach Norden hin weit und frei ins Niederrheinische Tiefland öffnet. Somit liegt die Kölner Bucht unmittelbar im Übergangsbereich zwischen Nordwestdeutschem Tiefland und Mittelgebirgsschwelle.

Das Stadtgebiet erstreckt sich im Wesentlichen auf die unterste Terrassenstufe des Rheins, die Niederterrasse, und liegt somit zum großen Teil auf einer Höhe zwischen etwa 40 und 50 m über NN (Abb. 2.1). Im Durchschnitt zwischen fünf und sieben Metern in die Niederterrasseplatten eingeschnitten ist die Rheinaue, ihre Breite schwankt zwischen einigen hundert Metern und einem Kilometer. Südlich von Worringen befindet sich in der Aue ein alter, fast völlig verlandeter Mäanderbogen des Rheins, der Worringer Bruch. Er stellt mit 37,5 m über NN den tiefsten Punkt Kölns dar. Der höchste Punkt der Stadt befindet sich mit 118 m über NN im Osten am Anstieg zu den Bergischen Hochflächen.

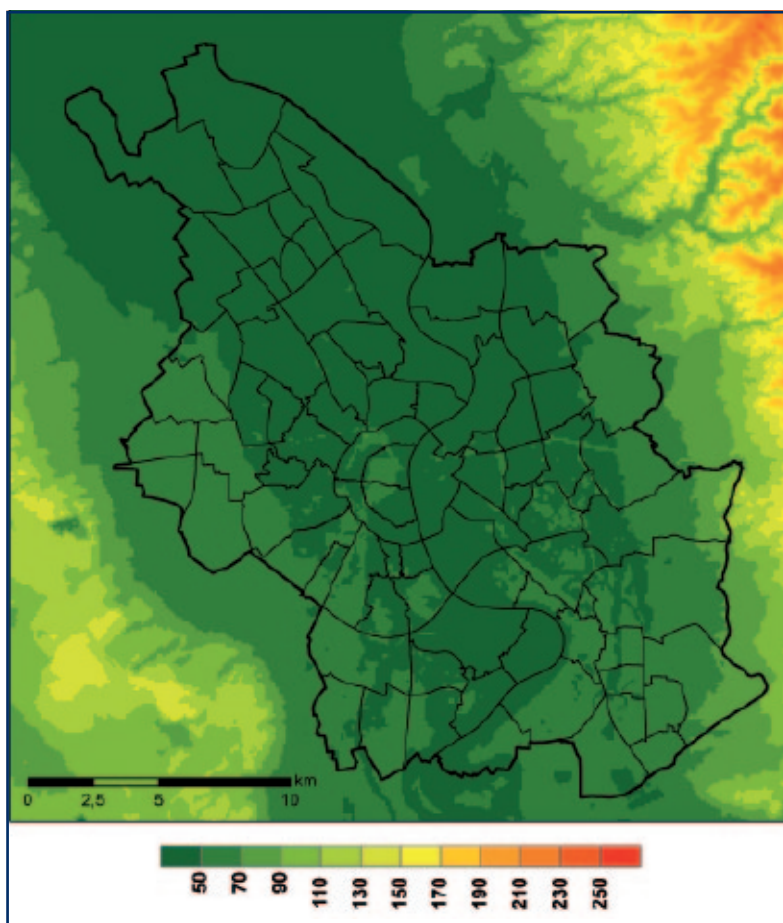


Abb. 2.1: Höhenkarte der Stadt Köln (Kartengrundlage: DGM5, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw).

2.2 Die Stadtstruktur

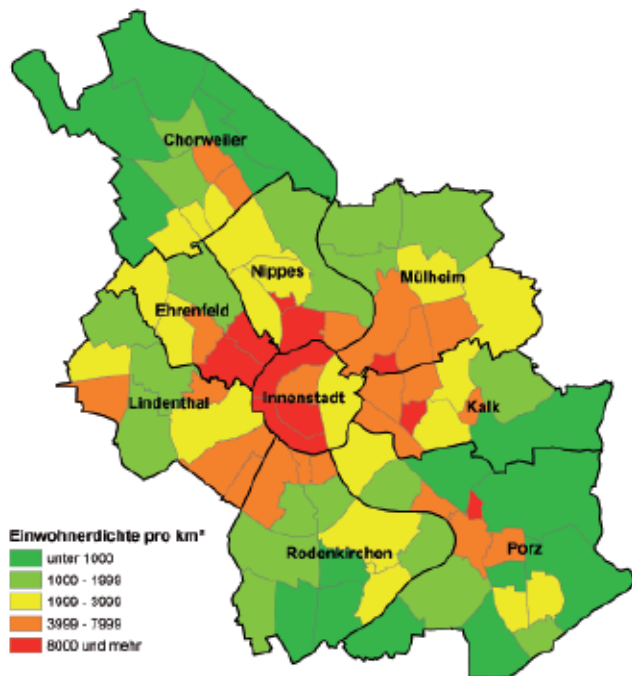


Abb. 2.2: Die Kölner Stadtteile – Einwohnerdichte 2009 (Quelle: Kölner Statistische Nachrichten – 5/2010 Statistisches Jahrbuch 2010, 88. Jahrgang, verändert).

Die geographische Lage der Stadt Köln ist – bezogen auf den Dachreiter des Kölner Doms – 50°56′33″ nördliche Breite und 6°57′32″ östliche Länge. Mit einer Fläche von rund 405 km² und einer Einwohnerzahl von etwa 1.020.000 Einwohnern ist Köln die größte Stadt Nordrhein-Westfalens. Die größte Ausdehnung des Stadtgebietes in Ost-West-Richtung beträgt 27,6 km und in Süd-Nord-Richtung 28,1 km. Die Stadtgrenze ist 130 km lang. Die Länge des Rheinuferes im Stadtgebiet beträgt linksrheinisch 40 km und rechtsrheinisch 27,3 km. Die Stadt umfasst neun Stadtbezirke: Innenstadt, Rodenkirchen, Lindenthal, Ehrenfeld, Nippes, Chorweiler, Porz, Kalk und Mülheim. Die Stadtbezirke sind in 86 Stadtteile unterteilt (Abb. 2.2). Die mittlere Bevölkerungsdichte liegt in Köln bei 2.518 Einwohnern pro km² (Bezugsjahr 2009). Die niedrigsten Einwohnerdichten (< 1.000 Einwohner pro km²) sind im Nordwesten, Süden und Südosten des Stadtgebietes zu finden

(Stadtteile: Chorweiler, Kalk, Rodenkirchen und Porz). Der am dünnsten besiedelte Stadtteil ist Libur (Stadtbezirk Porz) mit 173 Einwohnern pro km². Der linksrheinische Teil der Innenstadt sowie die angrenzenden Stadtbezirke Nippes und Ehrenfeld weisen die höchsten Bevölkerungsdichten mit mehr als 8.000 Einwohnern pro km² auf. Im rechtsrheinischen Teil des Stadtgebietes wird eine so hohe Einwohnerdichte nur in drei Stadtteilen – Buchforst, Vingst und Finkenberg – erreicht. Im Innenstadtteil Neustadt/Süd nimmt die Einwohnerdichte mit 13.293 Einwohnern pro km² ihren höchsten Wert an.

Im Vergleich zum Jahr 2000 hat sich die Einwohnerzahl in einigen Stadtbezirken verändert. Die Abbildung 2.3 stellt die Einwohnerentwicklung in den Stadtbezirken im Zeitraum von 2000 bis 2009 dar. Große Einwohnerrückgänge verzeichnete der Stadtbezirk Innenstadt. In den Stadtbezirken Chorweiler, Lindenthal und Porz ist die Einwohnerzahl ebenfalls zurückgegangen, jedoch nicht so stark wie in der Innenstadt. Im Gegensatz dazu wurde ein starkes Bevölkerungswachstum im Bezirk Ehrenfeld und ein leichter Zuwachs in den Bezirken Rodenkirchen, Nippes und Kalk registriert. Der Stadtbezirk Mülheim blieb in der Bilanz seiner Stadtteile stabil.

Fast die Hälfte der Gesamtbevölkerung in Köln gehört zu den zwei Altersgruppen der 18- bis unter 35-Jährigen (24,9 Prozent) und der 35- bis unter 50-Jährigen (24,3 Prozent) (Abb. 2.4). Durch den Zuzug von Studenten, Auszubildenden und jungen Erwerbstätigen ist der Anteil der jüngeren Generationen an den Stadteinwohnern relativ hoch. Die zwei jüngeren Altersgruppen der unter Sechsjährigen und der Sechs- bis Achtzehnjährigen haben zusammen einen Anteil von lediglich 15,4 Prozent an der Gesamtbevölkerung. Dieser relativ geringe Anteil ist das Ergebnis der niedrigen Geburtenziffern seit Anfang 2000. Der Anteil der Personen über 65 Jahre liegt in Köln bei 18 Prozent und ist deutlich geringer im Vergleich zum Bundesniveau mit 20,7 Prozent (Quelle: Statistisches Bundesamt). Allerdings wird seit dem Jahr 2000 eine kontinuierliche Zunahme der Menschen über 65 Jahre in Köln verzeichnet.

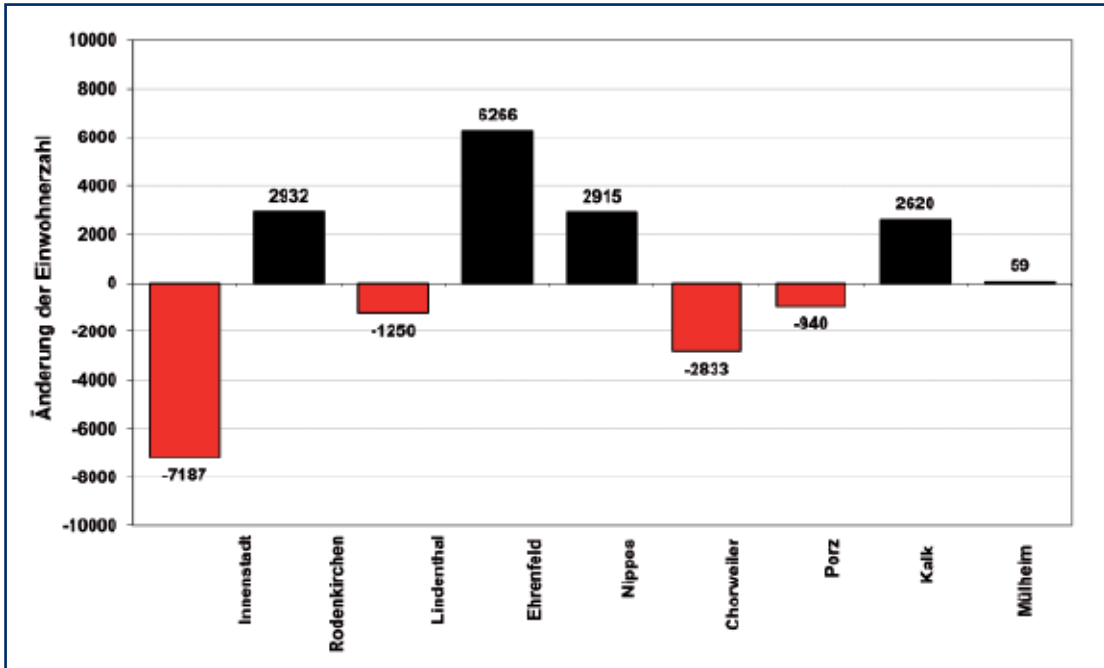


Abb. 2.3: Einwohnerentwicklung in den Stadtbezirken 2000/2009 (Quelle: Kölner Statistische Nachrichten – 5/2010 Statistisches Jahrbuch 2010, 88. Jahrgang, verändert).

Von den 1.020.303 Einwohnern (Bezugsjahr 2009) sind 51,2 Prozent weiblich und 48,8 Prozent männlich. Am geringsten ist der Frauenanteil in der Altersgruppe der 35- bis unter 50-Jährigen (47,8 Prozent). Ebenfalls unter 50 Prozent liegt der Anteil der Frauen in den zwei jüngsten Altersgruppen. In der Gruppe der 50- bis unter

65-Jährigen liegt er mit 51,2 Prozent leicht über dem der Männer und bei den 65- bis 80-Jährigen schon bei 53,3 Prozent. Bei den über 80-Jährigen steigt der Frauenanteil auf 68,6 Prozent an. Allerdings entfallen auf die letzte Altersgruppe nur 4,3 Prozent der Gesamtbevölkerung Kölns.

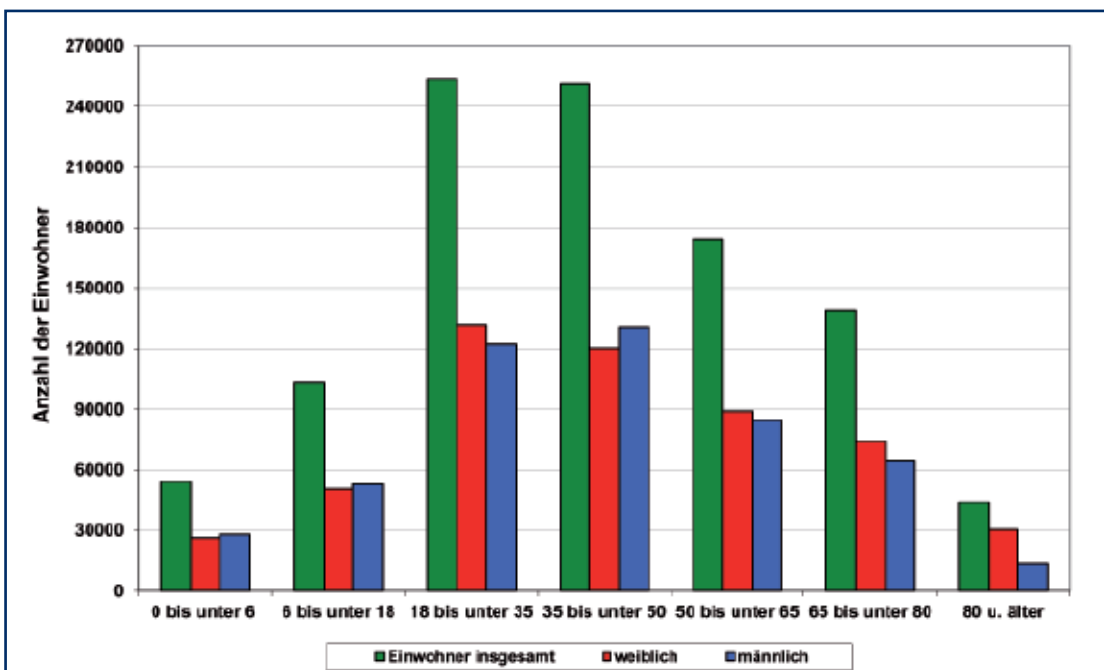


Abb. 2.4: Einwohner nach Altersgruppen 2009 (Quelle: Kölner Statistische Nachrichten – 5/2010 Statistisches Jahrbuch 2010, 88. Jahrgang).

2.3 Die Flächennutzung

Abbildung 2.5 gibt einen Überblick über die Flächennutzungstypen und ihren prozentualen Anteilen an der Gesamtstadtfläche von Köln. Die Hälfte des Kölner Stadtgebietes wird als versiegelte Fläche ausgewiesen. Ein Drittel der gesamten städtischen Fläche ist bebaut, wobei der größte Flächenanteil auf Wohn- und Mischgebiete entfällt. Während sich die Mischgebiete vorwiegend auf den Innenstadtbereich konzentrieren, dominieren in der nahen Peripherie Wohngebiete. Die Verkehrsflächen weisen einen Flächenanteil von fast 16 Prozent auf.

Der prozentuale Anteil nicht versiegelter Flächen, zu denen hauptsächlich Landwirtschafts-, Wald- und Grünflächen gehören, beträgt in Köln fast 50 Prozent. Während die land- und forstwirtschaftlichen Flächen überwiegend am Stadtrand zu finden sind, treten Grünflächen im gesamten Stadtgebiet von Köln auf. Sie werden zum größten Teil durch städtische Parkanlagen, Sportplätze und Friedhöfe repräsentiert.

Die Wasserflächen, darunter der wichtigste Fluss Nordrhein-Westfalens, der Rhein, weisen einen Anteil von fünf Prozent an der gesamten Stadtgebietsfläche auf.

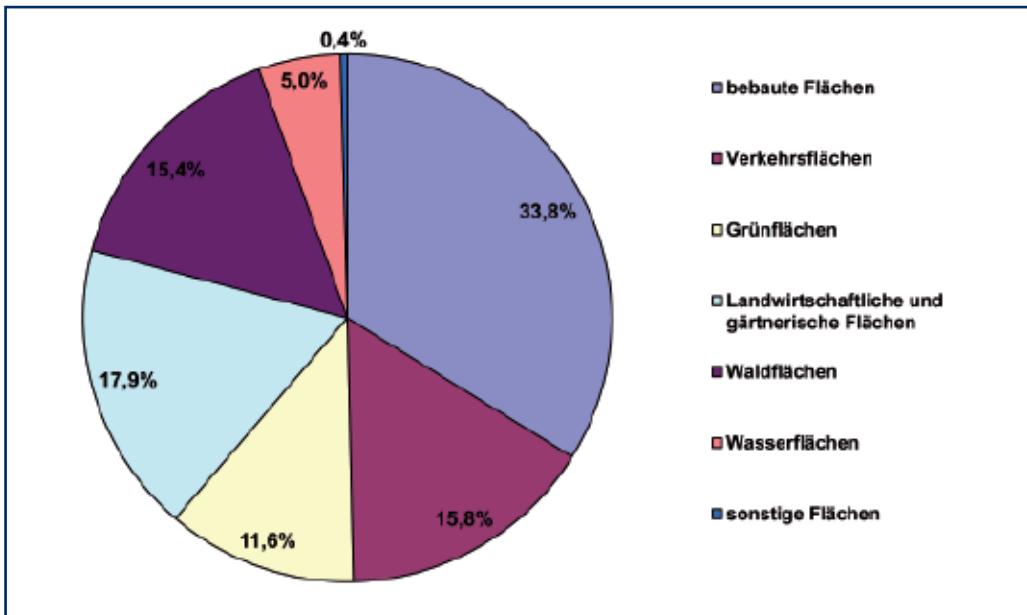


Abb. 2.5: Prozentualer Anteil der Flächennutzungstypen im Stadtgebiet von Köln (Quelle: Kölner Statistische Nachrichten – 5/2010 Statistisches Jahrbuch 2010, 88. Jahrgang, verändert).

2.4 Das Makroklima der Stadt Köln

Großklimatisch gehört Köln zur warmgemäßigten, feuchten Westwindzone Mitteleuropas. Der Charakter dieser Klimazone wird vorwiegend durch ozeanische, das heißt milde, feuchte und damit wolkenreiche Luftmassen bestimmt, die mit den häufig vorkommenden Südwest- bis Westwinden herangeführt werden. Dadurch gestaltet sich der Wetterablauf insgesamt wechselhaft mit allgemein relativ kühlen Sommern und milden Wintern. Gelegentlich setzt sich jedoch kontinentaler Einfluss mit längeren Phasen hohen Luftdrucks durch. Dann kann es

im Sommer bei schwachen östlichen bis südöstlichen Winden zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichem Wetter kommen. Im Winter sind kontinental geprägte Luftmassen häufig mit Kälteperioden verbunden. Im Sommer kann sich zeitweise hoher Luftdruck aus dem Mittelmeer- und Azorenraum durchsetzen. Dann gelangt von Südwesten her unter kräftiger Aufheizung der bodennahen Luftschicht schwülwarme Luft in das Nordwestdeutsche Tiefland. Nordlagen sind selten und bedingen zu allen Jahreszeiten eine zu kalte Witterung.

Köln liegt im Klimabezirk „Niederrheinische Bucht“ (DWD 1960), der sich innerhalb des übergeordneten Klimaraums „Nordwest-Deutschland“ durch Jahresmittel der Lufttemperaturwerte von über 9 °C sowie typische mittlere Niederschlagshöhen von 550 bis 900 mm auszeichnet. Der Hauptanteil der Niederschlagsmenge fällt im Sommer – mit einem Nebenmaximum im Winter. Das Windgeschwindigkeitsmittel liegt zwischen 3 und 3,5 m/s (DWD 1989). Die (südliche) Kölner Bucht gehört zu den wärmsten Gebieten der Niederrheinischen Bucht. Darüber hinaus modifiziert die Buchtlage mit dem Rheintalverlauf und den flankierenden Höhenzügen (Villeville und Bergische Hochflächen) das Klima der Stadt Köln bei den Niederschlagsmengen sowie den Wind- und Feuchteverhältnissen in den unteren Luftschichten.

An der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn beträgt die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur, bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010, 10,3 °C, das Jahresmittel des Niederschlags für den gleichen Bezugszeitraum liegt

bei 839 mm (Abb. 2.6). Wie erwartet werden die höchsten Niederschlagsmengen in den Sommermonaten verzeichnet, wobei der Juni der Spitzenreiter (90,7 mm) ist. Februar und April stellen dagegen die durchschnittlich trockensten Monate dar. Das „herbstliche“ Minimum im Oktober und November ist eher schwach ausgeprägt (beide Monate weisen rund 67 mm auf).

Der Juli ist mit einer durchschnittlichen mittleren Temperatur von 18,8 °C der wärmste Monat, gefolgt vom August mit 18,1 °C (bezogen auf 1981 bis 2010). Der kälteste Monat ist der Januar (durchschnittliches Monatsmittel 2,5 °C), gefolgt von den beiden anderen klimatologischen Wintermonaten Februar (2,9 °C) und Dezember (3,3 °C). Die mittlere Jahresschwankung der Temperatur (Differenz zwischen der Mitteltemperatur des wärmsten und kältesten Monats) beträgt in Köln gut 16 K (K = Kelvin, Maßangabe für Temperaturdifferenzen). Dieser Wert ist charakteristisch für das eher maritim beeinflusste Klima Nordwestdeutschlands.

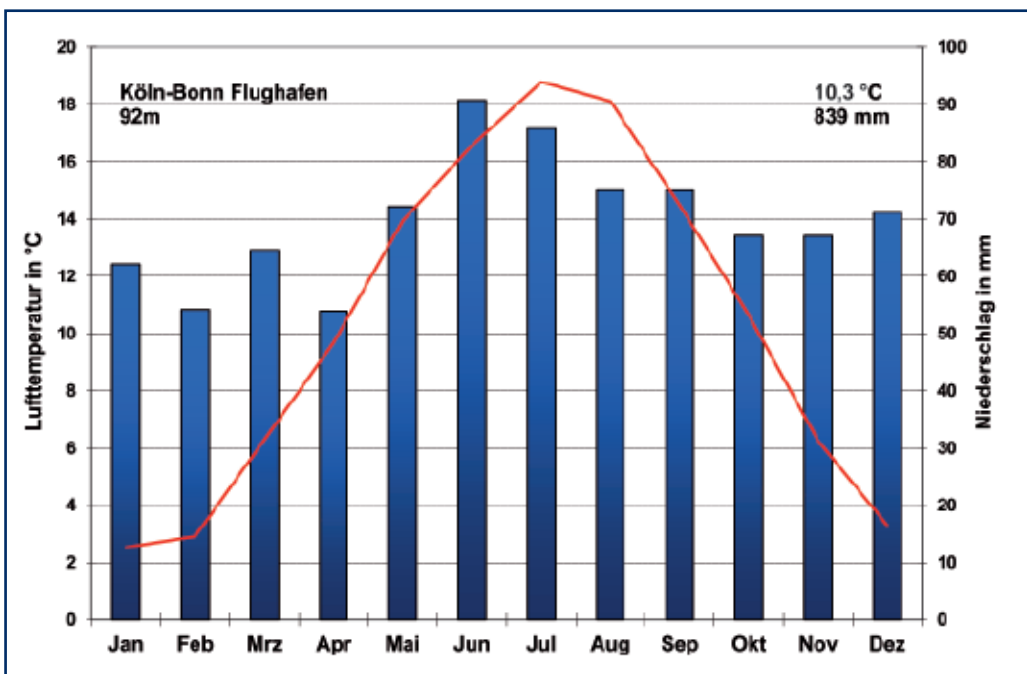


Abb. 2.6: Klimadiagramm der Station Flughafen Köln-Bonn (Bezugszeitraum: 1981 bis 2010).

In Abbildung 2.7 sind Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit (in 2,0 m/s-Klasseneinteilung) in Abhängigkeit von der Windrichtung (zwölf Sektoren zu je 30° Breite) basierend auf Stundenwerten (Stärkewindrose) der Station Köln-Bonn (1981 bis 2010) dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass der Wind mit gut 22 Prozent der Jahresstunden am häufigsten aus 120° (Ostsüdost) und dann mit gut elf Prozent aus 150° (Süd-südost) weht. Damit weht der Wind aus diesen beiden benachbarten südöstlichen Richtungssektoren mit zu-

sammen nur 60° Breite in etwas mehr als einem Drittel aller Jahresstunden. Damit wird die Prägung durch das Rheintal und seiner flankierenden Höhen an der Station Köln-Bonn offensichtlich. Aus den drei westlichen Richtungssektoren zusammen weht der Wind dagegen nur in 25 Prozent der Fälle. Am seltensten kommt der Wind aus Nordnordost (030°) beziehungsweise Ostnordost (060°) und zwar nur in 2,7 beziehungsweise 3 Prozent der Jahresstunden. Dies ist auf eine abschirmende Wirkung des Bergischen Landes zurückzuführen.

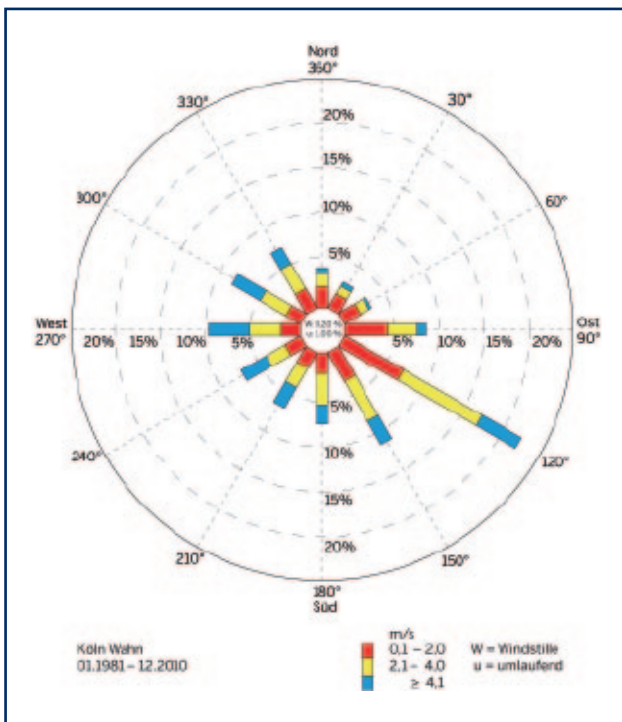


Abb. 2.7: Stärkewindrose der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn im Zeitraum 1981 bis 2010 (Datenquelle: DWD).

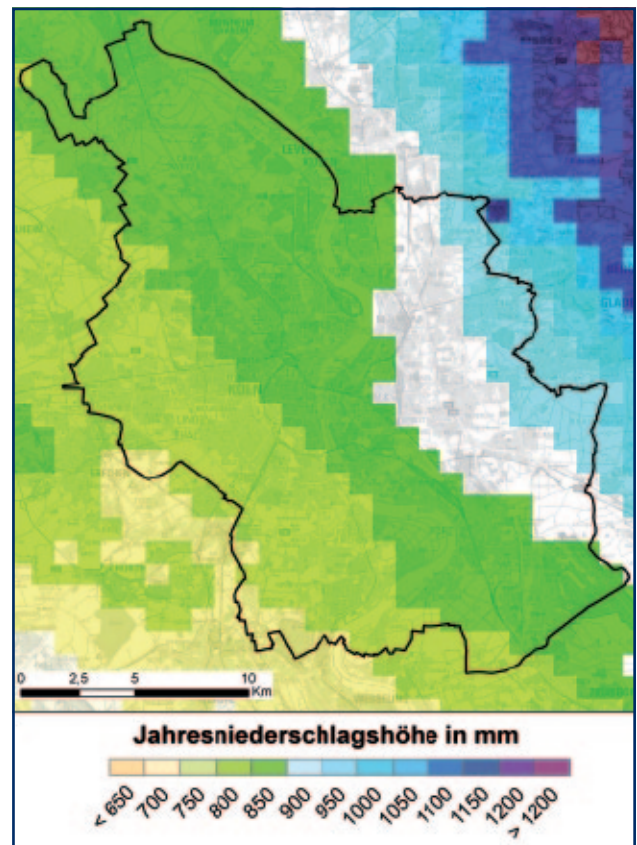


Abb. 2.8: Mittlerer Jahresniederschlag in der Region Köln im Zeitraum 1981 bis 2010 (Datenquelle: DWD).

Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit am Flughafen Köln-Bonn liegt bei 3,2 m/s, ein typischer Wert für freie Lagen der Niederrheinischen Bucht. Die Häufigkeit von Schwachwinden mit Windgeschwindigkeiten kleiner als 1 m/s (inkl. Windstillen) beträgt an der Station etwa sechs Prozent.

Dass sich die Lage der südlichen Kölner Bucht mit ihren angrenzenden Höhenzügen auch auf die Niederschlagsmengen auswirkt, ist zu erwarten. So ist auf dem Kölner Stadtgebiet ein klares Ansteigen der Regenhöhen von (Süd-)West nach (Nord-)Ost zu erkennen (Abb. 2.8).

Dies ist zum einen auf die Leewirkung am Ostrand der Ville zurückzuführen, zum anderen auf Staueffekte nach Osten in Richtung des Bergischen Landes. So liegt das langjährige Mittel der Niederschlagssumme am südwestlichen Rand der Stadt unter 750 mm, während es am Ostrand im Bereich der Bergischen Heideterrassen auf über 900 mm ansteigt. Aus der Gesamtabbildung wird deutlich, dass im Bereich des Bergischen Landes sogar rasch ein Anstieg der Jahressumme auf fast 1.200 mm im Jahr erfolgt, während südwestlich von Hürth in Richtung der Zülpicher Börde der Durchschnittswert bereits unter 700 mm liegt.

2.5 Die Klimaentwicklung in Köln von 1958 bis 2010

Die längste vollständige klimatologische Datenreihe der letzten Jahrzehnte auf Kölner Stadtgebiet liefert die DWD-Station Flughafen Köln-Bonn, wo mit den Wetteraufzeichnungen im September 1957 begonnen wurde. Die Abbildung 2.9 zeigt die Zeitreihe des Jahresmittelwertes der Lufttemperatur (gemessen in 2 m über

Grund) am Flughafen Köln-Bonn für den Zeitraum 1958 bis 2010. Zusätzlich dargestellt ist die lineare Trendlinie. Die mittlere Jahrestemperatur betrug in diesem Zeitraum 10,1 °C. Der für die Station berechnete lineare Trend zeigt für den gesamten Messzeitraum einen hoch signifikanten Temperaturanstieg von ca. 0,2 K pro Dekade.

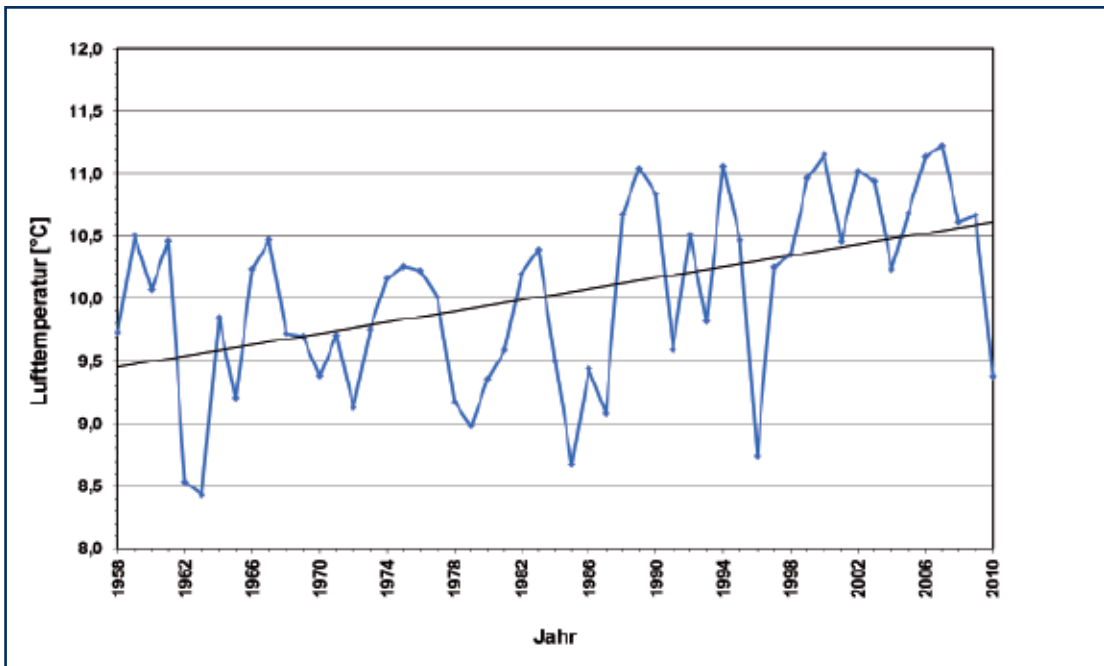


Abb. 2.9: Jahresmittel (sowie linearer Trend) der Lufttemperatur an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn im Zeitraum 1958 bis 2010.

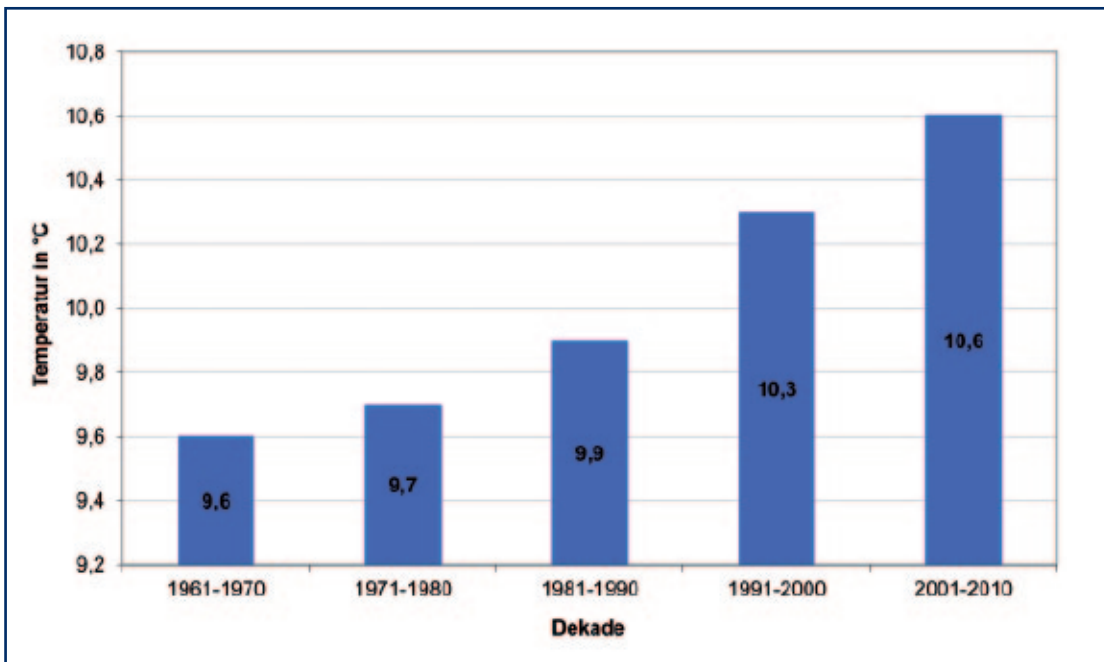


Abb. 2.10: Mittlere Lufttemperatur pro Dekade an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn.

Die Abbildung 2.10 verdeutlicht die Zunahme der Lufttemperatur an dieser Station. Hier ist die durchschnittliche Lufttemperatur pro Jahrzehnt für den Zeitraum 1961 bis 2010 dargestellt. Während für die Dekade 1961 bis 1970 die mittlere Lufttemperatur noch 9,6 °C betrug, ist der Durchschnittswert für die erste Dekade des 21. Jahr-

hunderts um ein Grad angestiegen. Eindeutig lässt sich die kontinuierliche Zunahme der mittleren Lufttemperatur erkennen, insbesondere in den letzten zwei Dekaden. In der Abbildung 2.11 sind die Temperaturabweichungen vom Durchschnittswert des Messzeitraums 1958 bis 2010 (10,06 °C) zu sehen.

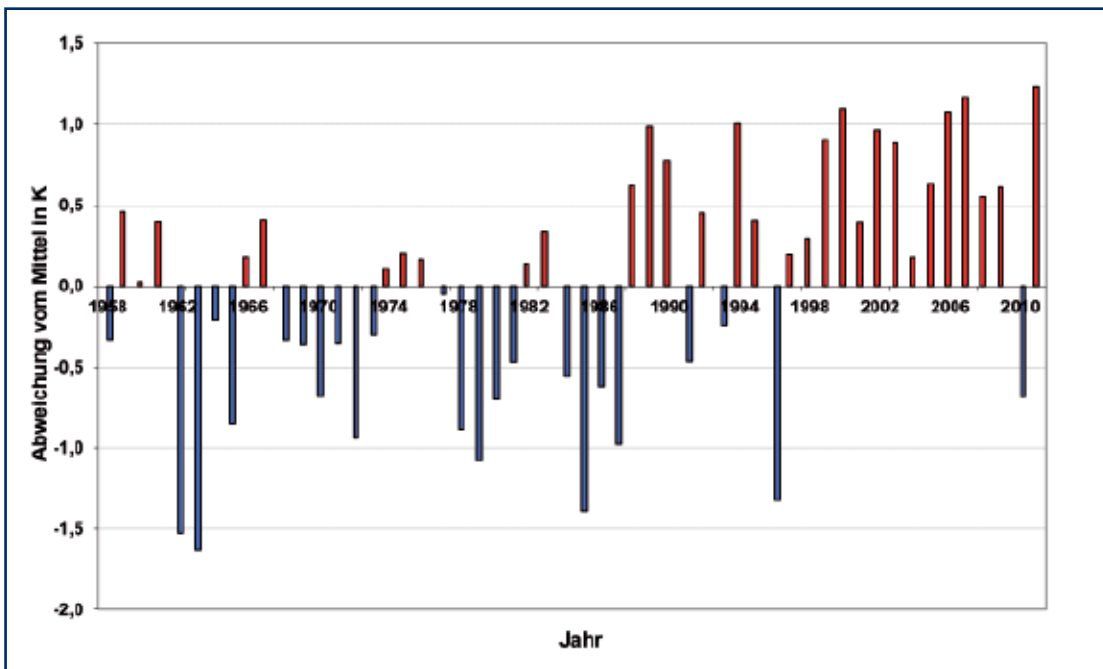


Abb. 2.11: Abweichung vom langjährigen Mittel der Lufttemperatur am Flughafen Köln-Bonn.

Die höchste negative Abweichung zum Durchschnittswert des gesamten Messzeitraums ist 1963 mit -1,6 K aufgetreten. In diesem Jahr betrug das Jahresmittel der Lufttemperatur lediglich 8,4 °C. Demgegenüber wurde im Jahr 2007 mit 11,2 °C die höchste Jahresmitteltemperatur verzeichnet, die positive Abweichung zum langjährigen Mittel betrug in diesem Jahr 1,2 K. Auffällig ist die Häufung der Jahre mit positiven Abweichungen vom Mittelwert seit 1988.

Neben den absoluten Werten und den Abweichungen sind auch die klimatologischen Temperaturkenntage von Bedeutung. Das sind Tage, an denen die Lufttemperatur definierte Schwellenwerte über- beziehungsweise unterschreitet. Dazu zählen Sommertage (Tagesmaximum ≥ 25 °C), heiße Tage (Tagesmaximum ≥ 30 °C), Tropennächte (Tagesminimum ≥ 20 °C), Frosttage (Tagesminimum < 0 °C) sowie Eistage (Tagesmaximum < 0 °C). Sie geben einen Eindruck über die Wärmebelastung beziehungsweise

den Kältestress in einem Gebiet. Die Anzahl der Sommertage, der heißen Tage sowie der Frost- und Eistage für die Station Flughafen Köln-Bonn für den Messzeitraum 1958 bis 2010 ist in den Abbildungen 2.12 bis 2.15 dargestellt. Dabei ist insgesamt – trotz der jährlichen Schwankungen – in dem gesamten Messzeitraum ein ansteigender Trend der Anzahl von Sommertagen und heißen Tagen (pro Jahr) zu verzeichnen (Abb. 2.12 und 2.13). Der hochsignifikante Trend (größer 99 Prozent nach Mann-Kendall-Test) beträgt 3,3 Tage pro Dekade für die Sommertage und der signifikante Trend (größer 95 Prozent nach Mann-Kendall-Test) 1,3 Tage pro Dekade für die heißen Tage.

Bezogen auf den gesamten Messzeitraum treten am Flughafen Köln-Bonn pro Jahr im Mittel 38 Sommertage und knapp acht heiße Tage auf. Durchschnittlich jedes zweite Jahr wird eine Tropennacht verzeichnet.

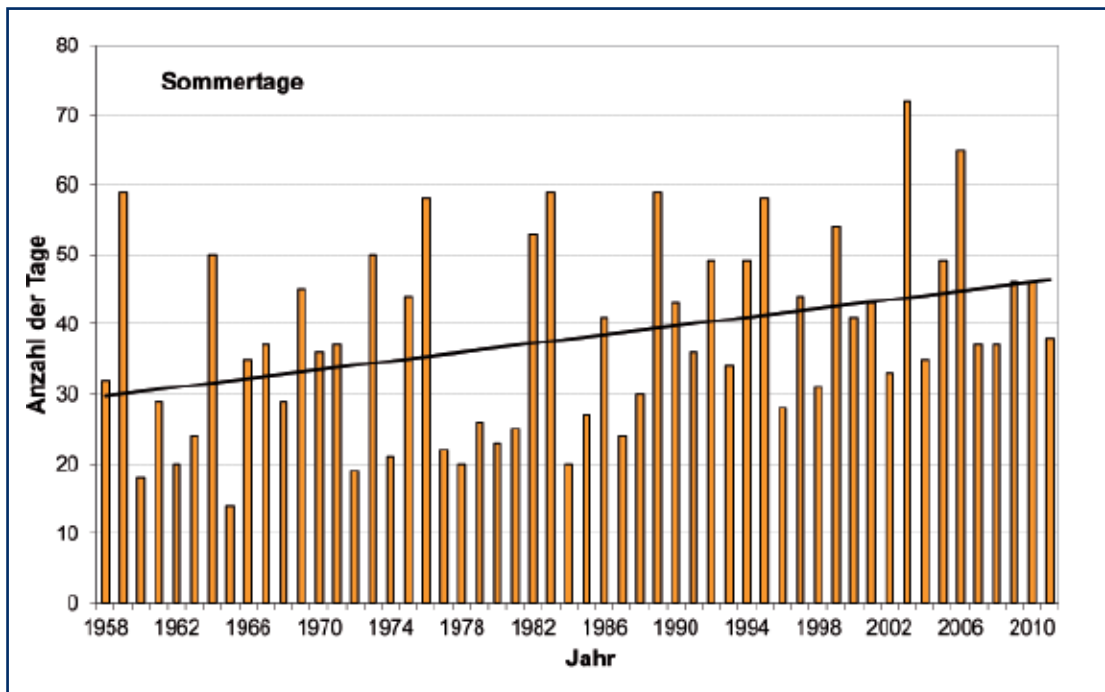


Abb. 2.12: Anzahl der Sommertage an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn (1958 bis 2010): Anzahl der Tage pro Jahr und linearer Trend.

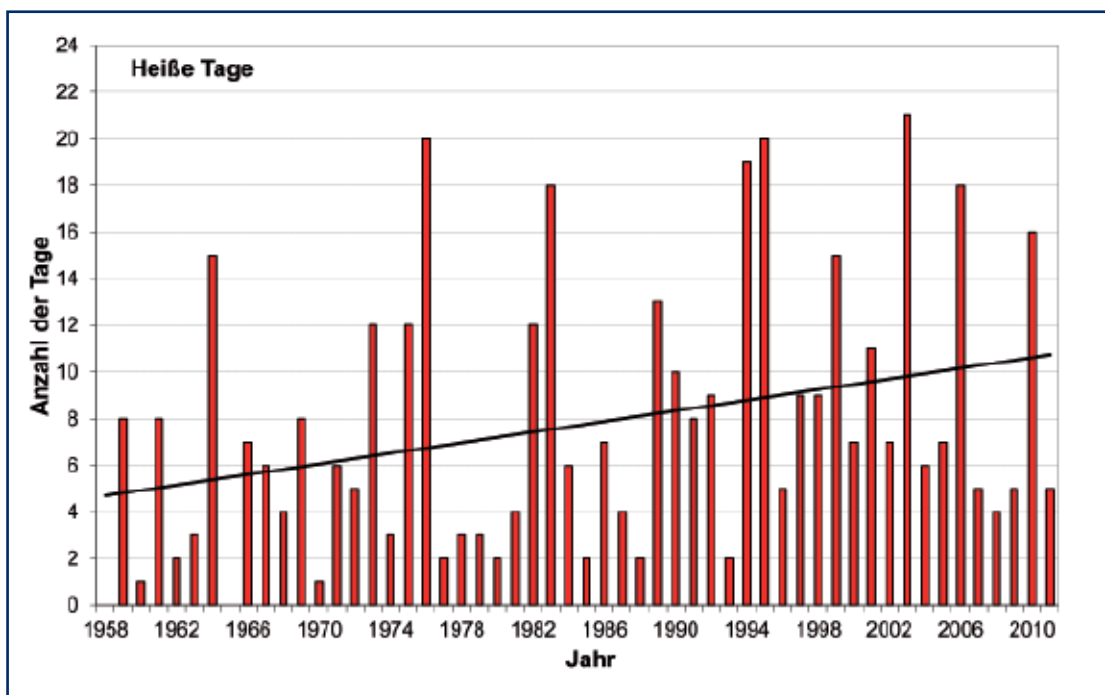


Abb. 2.13: Anzahl der heißen Tage an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn (1958 bis 2010): Anzahl der Tage pro Jahr und linearer Trend.

Bezüglich der Anzahl der Frost- und Eistage ist am Flughafen Köln-Bonn ein leicht abnehmender Trend festzustellen (Abb. 2.14 und 2.15). Der schwach signifikante Trend (größer 90 Prozent nach Mann-Kendall-Test) zeigt eine Abnahme von – im Mittel – einem Tag pro Dekade

für die Eistage. Für die Anzahl der Frosttage konnte kein signifikanter Trend nachgewiesen werden. Bezogen auf den gesamten Messzeitraum treten am Flughafen Köln-Bonn im Mittel 69 Frosttage und gut neun Eistage pro Jahr auf.

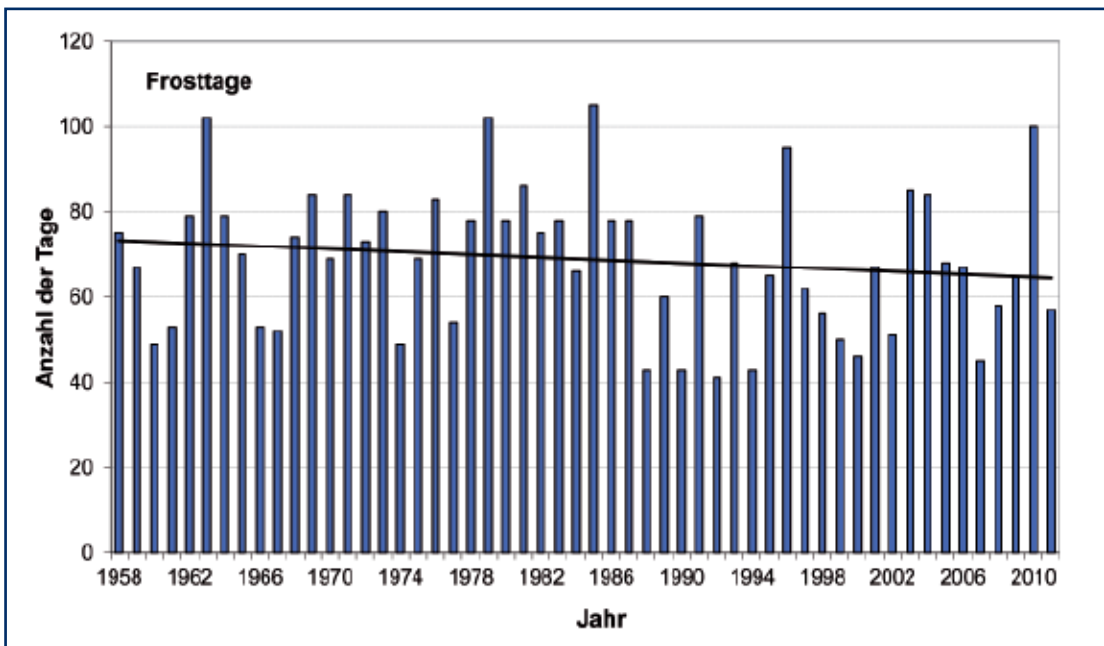


Abb. 2.14: Anzahl der Frosttage an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn (1958 bis 2010): Anzahl der Tage pro Jahr und linearer Trend.

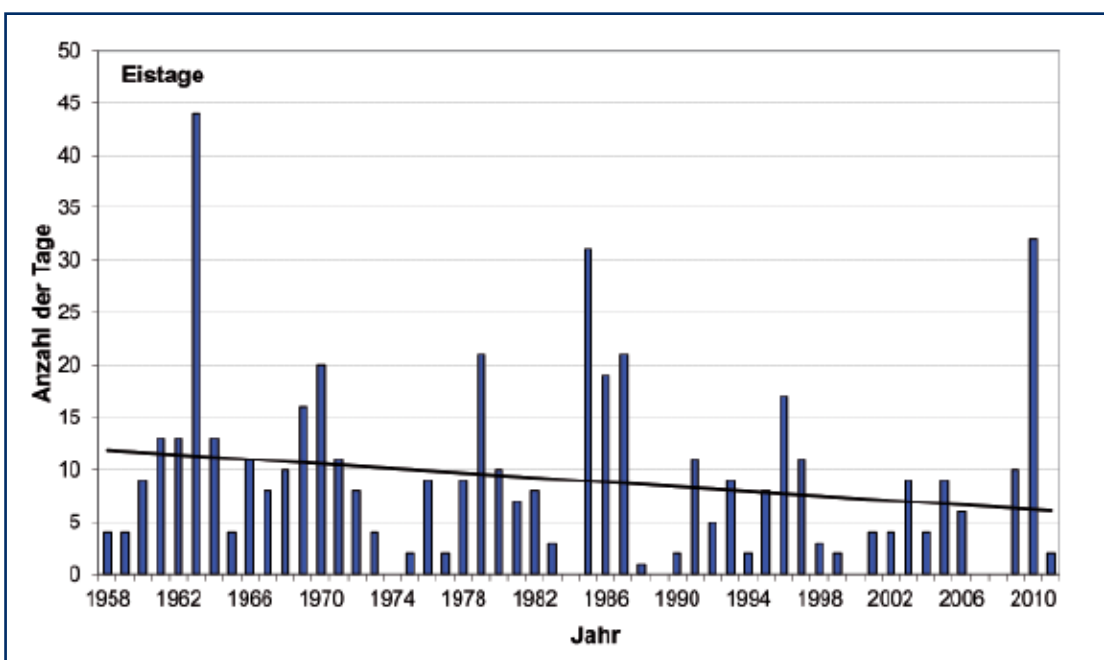


Abb. 2.15: Anzahl der Eistage an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn (1958 bis 2010): Anzahl der Tage pro Jahr und linearer Trend.

Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe am Flughafen Köln-Bonn für den Zeitraum 1958 bis 2010 liegt bei rund

810 mm. Jedoch zeigt deren zeitliche Entwicklung im Gegensatz zur Lufttemperatur keinen Trend (Abb. 2.16).

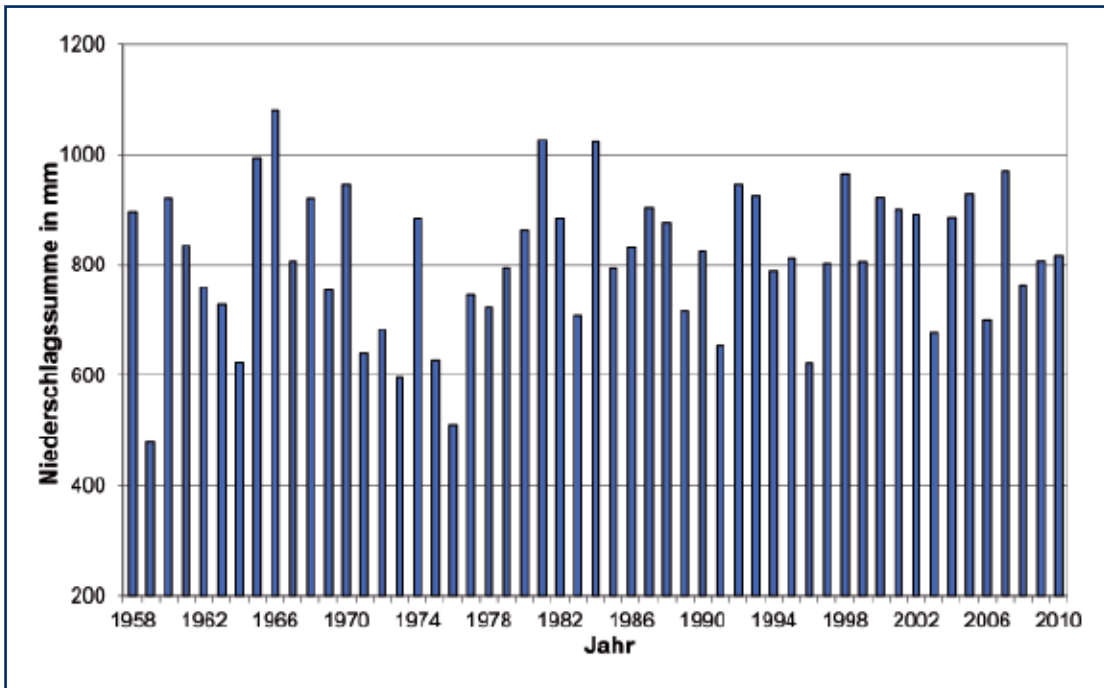


Abb. 2.16: Jährliche Niederschlagshöhe (mm) am Flughafen Köln-Bonn im Zeitraum 1958 bis 2010.

Eine Auswertung von Niederschlagsdaten in Bezug auf die Starkregenereignisse (Andauer bis 60 Minuten) ergab, dass die Anzahl der Starkniederschlagsereignisse in Köln in den letzten Jahrzehnten keinen eindeutigen, statistisch signifikanten Trend aufweist.

Des Weiteren wurden die Niederschlagsdaten dahingehend ausgewertet, ob Starkniederschläge in den hydrologischen Halbjahren unterschiedlich oft auftraten. Die Untersuchung ergab, dass fast alle Starkniederschlagsereignisse im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) zu verzeichnen waren.

Literatur

- DWD, 1960: Deutscher Wetterdienst: Klimaatlas von Nordrhein-Westfalen, Offenbach am Main
- DWD, 1989: Der Minister für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW (Hrsg., 1989). Klimaatlas von Nordrhein-Westfalen. Bearbeitet vom Deutschen Wetterdienst, Düsseldorf
- Kölner Statistische Nachrichten – 5/2010 Statistisches Jahrbuch 2010, 88. Jahrgang
- Naturräumliche Gliederung Deutschlands, 1963 und 1978: Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 108/109 Düsseldorf-Erkelenz und Blatt 122/123 Köln-Aachen, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Selbstverlag, Bonn-Bad Godesberg
- Statistisches Bundesamt: www.destatis.de (Stand: 02.08.2013)



3 Methoden

Das Kapitel beschreibt zusammenfassend die Methoden, die angewendet wurden, um das Stadtklima Kölns zu analysieren, dieses auf das Mitte des Jahrhunderts zu projizieren und Problembereiche zu identifizieren (Kap. 5 und 6). Zunächst wird die Methodik der Stationsmessungen (Kap. 3.1) und Profildfahrten (Kap. 3.2) dargestellt, um anschließend das Verfahren bei der Berechnung der Wärmebelastung (Kap. 3.3) sowie das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (Kap. 3.4) zu erläutern. Abschließend wird beschrieben, wie angeeichte Radardaten (Kap. 3.5) und Extremwertstatistiken zu zukünftigen Starkregenereignissen (Kap. 3.6) zur Gefährdungsanalyse von Niederschlagsereignissen verwendet werden können.

3.1 Stationäre Messungen

Die Messung meteorologischer Parameter wie Lufttemperatur, Feuchte, Wind und Niederschlag ermöglicht es – durch Mittelbildung – Aussagen über das vergangene Klima sowie den aktuellen Zustand des Klimas in der Stadt Köln zu ermitteln. Weiterhin werden diese Daten als Eingangsgrößen für die Modellrechnungen (Kap. 4.4) benötigt.

Die längste vollständige Datenreihe der letzten Jahrzehnte auf Kölner Stadtgebiet liefert die DWD-Messstation Köln-Bonn am Flughafen. Der Deutsche Wetterdienst hat den Betrieb dieser Station im Herbst 1957 aufgenommen. Die zweite DWD-Wetterstation ist in Köln-Stammheim im Bereich der Kläranlage zu

finden. Sie wurde an diesem Standort erst im Dezember 2008 eingerichtet, allerdings setzt diese Messstelle die langjährige Reihe der Klimastation Leverkusen (seit 1902) fort, die sich bis Ende Februar 2008 knapp drei Kilometer nördlich des jetzigen Standortes auf dem Gelände des Bayer-Werkes unweit der Kölner Stadtgrenze befand.

In den 1970er Jahren wurde vom damaligen Amt für Umweltschutz der Stadt Köln ein eigenes stadtklimatologisches Messnetz (sog. Kölner Luftmessnetz) aufgebaut, um genauere Aussagen über charakteristische Eigenschaften des Kölner Stadtklimas zu treffen und Unterschiede der klimatischen Verhältnisse in verschiedenen

Stadtteilen herauszuarbeiten. Insgesamt hatte das Luftmessnetz von 1976 bis 2003 Bestand und durch seine Einstellung im Jahr 2003 war es im Rahmen des Projektes erforderlich, ein eigenes, temporäres Stationsnetz aufzubauen, um die aktuellen stadtklimatischen Verhältnisse und die Unterschiede auf dem Stadtgebiet zu erfassen. So wurden zusätzlich zu den beiden DWD-Wetterstationen Flughafen Köln-Bonn und Köln-Stammheim elf temporäre Messstationen eingerichtet und betrieben. Darüber hinaus konnte auf die Daten von vier LANUV-Stationen zurückgegriffen werden. Einen Überblick über Stationen während des Projektes liefert die Abbildung 3.1.

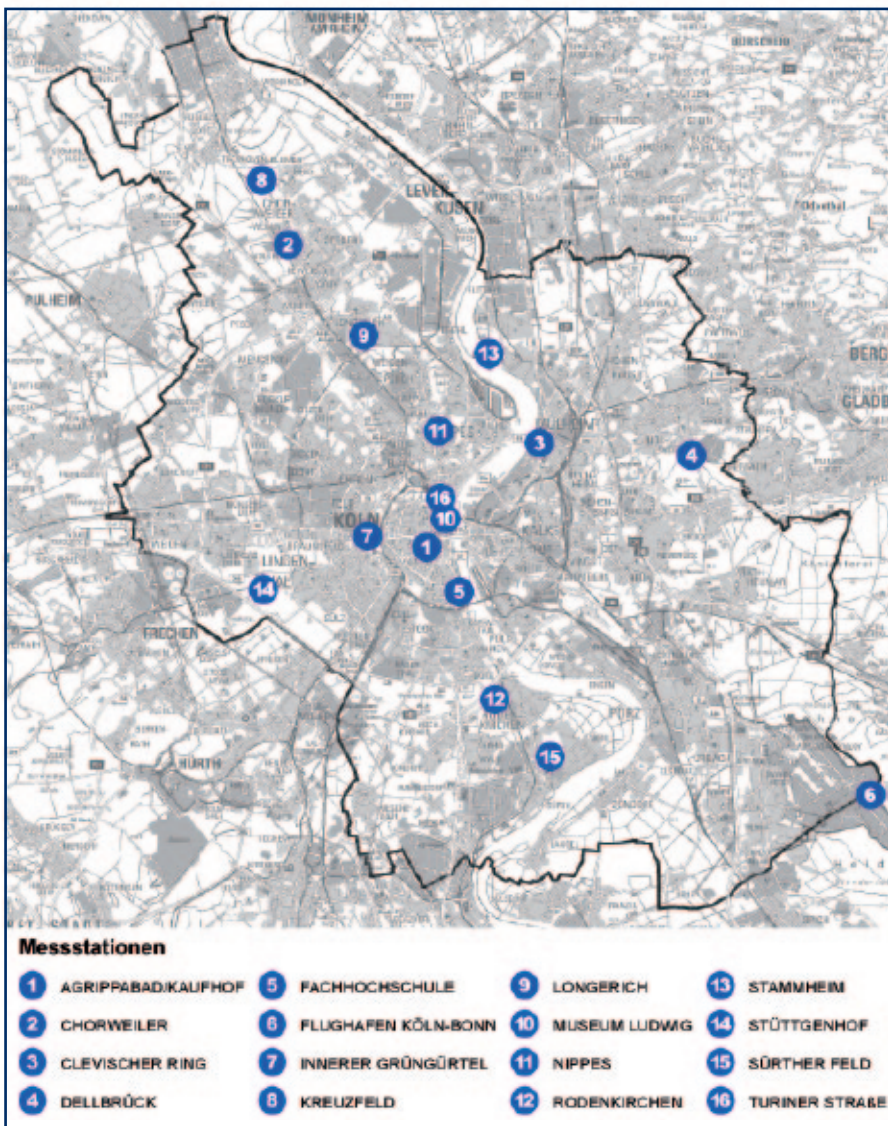


Abb. 3.1: Standorte der meteorologischen Messstationen im Stadtgebiet von Köln (ohne zusätzliche Niederschlagsstationen; unter Punkt 1 sind zwei nahe liegende Stationen Agrippabad und Kaufhof aufgeführt). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Mit den Messstationen sollten verschiedene Flächennutzungs- beziehungsweise Bebauungsstrukturen erfasst und eine möglichst große Verteilung auf dem Stadtgebiet erreicht werden. Aus dem Lageplan (Abb. 3.1) wird deutlich, dass zudem zwei Achsen mit den Stationen abgebildet werden, eine in Südost-Nordwest-Richtung und eine in Westsüdwest-Ostnordost-Richtung.

Als erste Station des temporären DWD-Messnetzes wurde Ende des Jahres 2009 die Station **Museum Ludwig** errichtet. Sie befindet sich auf einer Rasenfläche an der Rückseite des Museums zwischen dem Gebäude und den Gleisanlagen des Hauptbahnhofes (Abb. 3.2, links). In unmittelbarer Umgebung sind Sträucher und Bäume zu finden, wobei der Abstand zum angrenzenden Gebäude nur wenige Meter beträgt. Die Ostseite des Kölner Doms befindet sich nur knapp 100 Meter in westlicher Richtung. Die Station Museum Ludwig kann somit als repräsentativ für die Innenstadt in der Nähe von Dom



und Hauptbahnhof betrachtet werden (Stadtteil Altstadt-Nord).

Die zweite Station in unmittelbarer Citylage im Stadtteil Altstadt-Süd wurde auf dem Parkdeck des Agrippabad errichtet. Die Station **Agrippabad** steht somit auf einer asphaltierten Fläche, in versiegelter sowie dicht und hoch bebauter Umgebung. Der Neumarkt als Mittelpunkt der Kölner Innenstadt und Ausgangspunkt des Hauptgeschäftsviertels liegt gut 400 Meter in nordwestlicher Richtung entfernt.

Weitere Messstationen wurden im Bereich zweier Schulen betrieben. Sowohl in Nippes als auch auf einem Schulgelände in Köln-Longerich wurde je eine Station eingerichtet. Die Station **Longerich** repräsentiert lockere, durchgrünte Ein- und Mehrfamilien- beziehungsweise Reihenhausbauung, wie sie in Köln außerhalb der Innenstadt recht häufig vorzufinden ist (siehe Abb. 3.2, rechts).



Abb. 3.2: Meteorologische Messstation Museum Ludwig (links) und Longerich (rechts), Quelle: DWD.

Die einzige Station des temporären Messnetzes auf rechtsrheinischem Stadtgebiet ist in Köln-Dellbrück zu finden. Es wurde keine weitere Messstelle im Rechtsrheinischen eingerichtet, da mit dem Flughafen Köln-Bonn und Köln-Stammheim sowie der LANUV-Station Clevischer Ring in Köln-Mülheim bereits drei Stationen im Routinebetrieb laufen. Die Station **Dellbrück** befindet sich auf einer Freifläche am Stadtrand von Köln und ist mit einem zehn Meter hohen Windmast ausgestattet (Abb. 3.3, links). Die Station steht unweit des Ostfriedhofes und ist gut einen Kilometer von der Stadtgrenze

entfernt. Sie repräsentiert den stark durchgrünten Außenbereich des rechtsrheinischen Köln.

Windrichtung und Windgeschwindigkeit werden auch an der Station **Innerer Grüngürtel** an einem Zehn-Meter-Mast gemessen. Der Innere Grüngürtel ist die größte innerstädtische Grünanlage in Köln und erstreckt sich auf einer Länge von etwa sieben Kilometern vom Rheinufer etwas südlich von Köln-Riehl bis zur Luxemburger Straße unweit der Universität. Genauer gesagt befindet sich die Messstelle am Rande des Inneren Grüngürtels

auf einem begrünten Mittelstreifen, der dort mehrspurig und mit getrennten Richtungsfahrbahnen verlaufenden Universitätsstraße (Abb. 3.3, rechts). Die Station steht

auf der Grenze der Innenstadt zum Stadtteil Lindenthal und repräsentiert eher eine stark befahrene Verkehrsfläche als eine innerstädtische Grünfläche.



Abb. 3.3: Meteorologische Messstation Dellbrück (links) und Innerer Grüngürtel (rechts), Quelle: DWD.

Die LANUV-Stationen sind in Messcontainern untergebracht. Zwei der LANUV-Stationen sind (inner-)städtisch geprägt: Die Station **Clevischer Ring** befindet sich rechtsrheinisch im dicht besiedelten Stadtteil Mülheim in einer Straßenschlucht. Dieser Standort repräsentiert stark bebautes, verkehrsreiches städtisches Gebiet

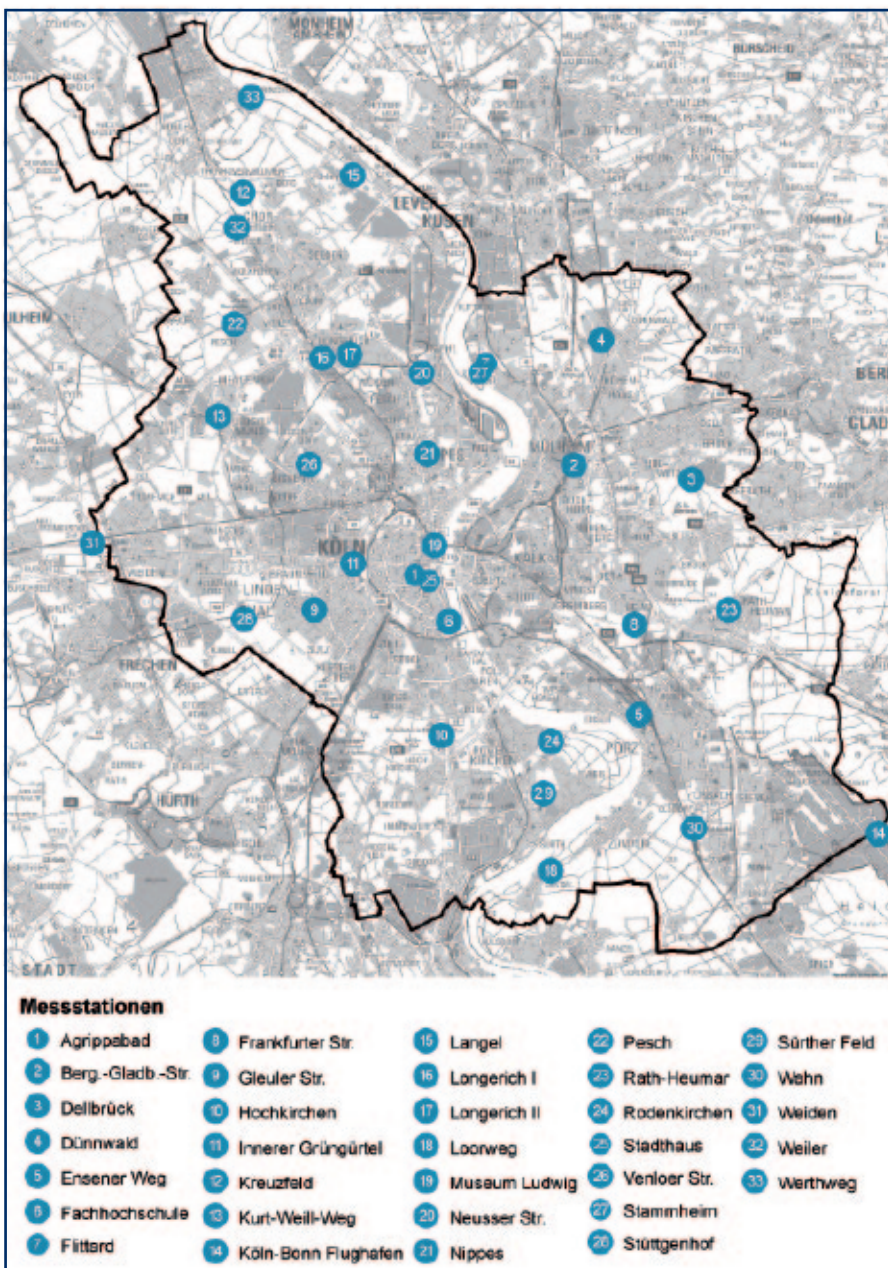
(Abb. 3.4, links). Die Station **Turiner Straße** steht im nördlichen Bereich der Innenstadt (Stadtteil Altstadt-Nord) – ebenfalls in einer Straßenschlucht – unweit des Hauptbahnhofes. Dieser Standort ist für eine innerstädtische, stark frequentierte Verkehrsfläche charakteristisch.



Abb. 3.4: LANUV-Messcontainer Clevischer Ring (links) und Chorweiler (rechts), Quelle: LANUV.

Die Station **Chorweiler** befindet sich am nordwestlichen Rand des Kölner Stadtteils Chorweiler (Abb. 3.4, rechts). Der Messcontainer steht auf einem Schulgelände, etwa zehn Meter von einer zweispurigen Straße entfernt. Dieser Standort repräsentiert vorstädtisches Gebiet. Die Station **Rodenkirchen** ist am westlichen Rand des Stadtteils Rodenkirchen zu finden. Dieser Standort ist wie Chorweiler für eine städtische Randlage charakteristisch, allerdings steht der Messcontainer innerhalb eines botanischen Gartens (Finkens Garten) und ist von Wald- und Wiesenflächen umgeben.

Zur Analyse der Niederschlagsdaten konnte neben dem temporären Messnetz vom DWD auch auf die Daten der Stadtentwässerungsbetriebe, Köln AöR (StEB) zurückgegriffen werden. Die Stadtentwässerungsbetriebe Köln betreiben ein räumlich gut im Stadtgebiet verteiltes Niederschlagsmessnetz. Aktuell sind insgesamt 21 Niederschlagsmessgeräte im Betrieb. Die Abbildung 3.5 zeigt alle Standorte der Niederschlagsmessgeräte (DWD und StEB), die während des Projektes in Betrieb waren.



Für zwei von diesen Stationen – Köln-Dönnwald und Köln-Weiler – liegen die längsten, 40-jährigen Datenreihen vor. Andere Messstationen des Niederschlagsmessnetzes der StEB wurden erst Ende der 80er und in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts eingerichtet. Am Anfang wurden die Messungen an allen Stationen mit einer Niederschlagswippe durchgeführt. Diese Messgeräte wurden zwischen 2004 und 2008 durch Pluviometer ersetzt.

Abb. 3.5: Lage der Niederschlagsmessstationen im Stadtgebiet von Köln. Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

3.2 Profilfahrten

In Stadtgebieten kann aufgrund kleinräumig stark wechselnder Flächennutzungstypen die Verteilung der Lufttemperatur durch konventionelle punktuelle Messungen nur unzureichend erfasst werden. Aus diesem Grund bietet sich die Möglichkeit an, mobile Messfahrten im städtischen Raum durchzuführen. Die räumliche Repräsentanz solcher Messungen ist durch eine hohe Anzahl von Messpunkten und somit einer hohen Messwertdichte gewährleistet.

Die Lufttemperaturmessfahrten erfolgten mit einem Messfahrzeug der Mobilien Messeinheit (MME) des Deutschen Wetterdienstes Essen, an dessen Ausleger in einer Höhe von ca. 1,9 Meter über Grund zwei Temperaturmessfühler zur Messung der trockenen und feuchten Lufttemperatur sowie ein Feuchtesensor zur Messung der relativen Feuchte installiert waren. Zusätzlich wurden zwei gleiche Temperaturmessfühler in einer Höhe von 0,7 Meter über Grund angebracht (Abb. 3.6). Die Messsignale wurden mit einer Abtastrate von einem Hertz aufgezeichnet und in einem Datalogger gespeichert. Für die genaue Zuordnung der gemessenen Werte zu einer räumlichen Position wurde die gesamte Messfahrt mittels GPS registriert. Die maximale Fahrgeschwindigkeit des Messfahrzeuges betrug 30 km/h, wodurch pro acht Metern Fahrtstrecke ein Datensatz zur Verfügung steht.

Eine Herausforderung für die Analyse der Datensätze stellten die Unterbrechungen der Messfahrten durch Verkehrsstau oder rote Ampeln dar, sowie die Streckenabschnitte innerhalb von Tunneldurchfahrten. Dadurch kann es zu einem direkten Einfluss der vorausfahrenden Fahrzeuge auf die Messung und somit zur Verfälschung der Ergebnisse kommen. Analog zu anderen Studien (z. B. Kuttler und Wacker 2001) wurden während der Messfahrt die Datensätze, die an Ampelstopps beziehungsweise Verkehrsstaus sowie in Tunneln ermittelt wurden, vor der Analyse der Daten herausgefiltert. Die Rohdaten jeder Messfahrt wurden auf Plausibilität überprüft und die einzelnen Messwerte eines Datensatzes, die als Artefakte identifiziert wurden, für die Analyse entfernt.

Alle Messungen wurden vorwiegend bei austausch- armen, wolkenlosen und windschwachen Wetterlagen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit kleiner als 1,5 m/s durchgeführt. Derartige Witterungsverhältnisse (i. d. R. unter Hochdruckeinfluss) sorgen für eine geringe Durchmischung in der bodennahen Luftschicht, hohe Sonneneinstrahlung bei Tag, starke Ausstrahlung bei Nacht und fehlende Ausgleichsströmungen. Infolgedes-



Abb. 3.6: Messfahrzeug des Deutschen Wetterdienstes Essen mit montierten Auslegern zur Messung von Temperatur und Feuchte in zwei verschiedenen Höhen.

sen können unter diesen Bedingungen die thermischen Gegensätze im Stadtgebiet besonders deutlich herausgearbeitet werden. Von Interesse sind dabei nicht nur die Unterschiede zwischen der Innenstadt und den Freiflächen des Umlandes, sondern auch die zwischen benachbarten Flächen unterschiedlicher Nutzungsart. Zudem wurden die Messfahrten im Sommer und im Winter durchgeführt, um saisonale Einflüsse zu untersuchen.

Die Messfahrten wurden auf drei festgelegten Routen durchgeführt, die stets an der Messstation „Agrippabad“ ihren Anfang und ihr Ende hatten. Zwei längere Messrouten verliefen im links- und rechtsrheinischen Teil des Stadtgebietes (Abb. 3.7). Bei der Festlegung der Messrouten wurde berücksichtigt, dass sowohl möglichst viele urbane als auch rurale Flächennutzungstypen abgedeckt wurden. Darüber hinaus konnten durch den Verlauf der Messrouten vom Stadtzentrum zum Stadtrand und zurück die horizontalen Temperaturunterschiede zwischen urbanen und ruralen Bereichen des Stadtgebietes genauer untersucht werden. Die linksrheinische Route umfasste eine Strecke von knapp 41 Kilometern, während die rechtsrheinische Route eine Länge von knapp 47 Kilometern aufwies.

Da schon frühere Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Lufttemperatur in urbanen Räumen gezeigt haben, dass die höchsten Temperaturunterschiede im Sommer in der zweiten Nachthälfte auftreten, begannen diese Messfahrten etwa eine Stunde vor Sonnenaufgang.



Abb. 3.7: Linksrheinische (grüne Linie) und rechtsrheinische (blaue Linie) Messroute im Stadtgebiet von Köln mit der Station „Agrippabad“ als Start- und Endpunkt (grauer Stern). Die Pfeile zeigen die Fahrtrichtung des Messwagens an. Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Demgegenüber deckt die dritte Messroute nur den Innenstadtbereich ab (Abb. 3.8). Die Messfahrten entlang dieser Strecke wurden ausschließlich in den Sommermonaten und anders als bei den oben beschriebenen Messrouten direkt nach Sonnenuntergang durchgeführt. Dadurch konnte die Verteilung der Lufttemperatur in dem dicht besiedelten Stadtzentrum zu Beginn der Nachtruhe und der Erholungsphase der Einwohner untersucht werden. Zusätzlich wurde die gleiche Messfahrt zwei Stunden später wiederholt.

Zur Berücksichtigung der fortschreitenden nächtlichen Abkühlung der bodennahen Luftschichten im Zeitraum der mobilen Messfahrt (ca. 1,5 Stunden) wurden die gemessenen Werte auf einen Zeitpunkt korrigiert (Kuttler 1993). Dazu wurde die mittlere Abkühlungsrate an der Klimastationen Agrippabad zugrunde gelegt und mit einer linearen Funktion approximiert.



Abb. 3.8: Innerstädtische Messroute (lila Linie) mit der Station Agrippabad als Start- und Endpunkt (grauer Stern). Die Pfeile zeigen die Fahrtrichtung des Messwagens an. Kartengrundlage: DTK50, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

3.3 Wärmebelastung und Hitzewarnung

Der Stadtbewohner, der sich im Freien aufhält, befindet sich in permanentem Austausch mit seiner Umgebung: Die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftströmung und die Sonnenstrahlung wirken auf ihn ein. Ein (thermisches) Wohlbefinden stellt sich dann ein, wenn die Energiebilanz des Menschen im Gleichgewicht ist, das heißt wenn Wärmeproduktion und Wärmeabgabe dazu führen, dass die Kerntemperatur des Menschen (mit ca. 37 °C) nicht wesentlich steigt oder sinkt. So können zum Beispiel hohe Temperaturen bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit zu einer Wärmebelastung und damit zu Hitzestress führen, da der Schweiß nicht ausreichend verdunsten und die fehlende Abkühlung zu einer Erhöhung der menschlichen Kerntemperatur führen kann.

Somit genügt die Lufttemperatur nur eingeschränkt zur Beschreibung und Bewertung der thermischen Umwelt mit ihren Auswirkungen auf das (thermische) Wohlbefinden des Menschen. Zur Bewertung, ob und bei welcher meteorologischen Situation die Stadtbewohner einer Wärmebelastung und Gefährdung der Gesundheit ausgesetzt sind, werden nach derzeitigem Stand der

Wissenschaft Energiebilanzmodelle des Menschen unter Einbeziehung relevanter Mechanismen des Wärmeaustausches verwendet (VDI 2008).

In der vorliegenden Studie werden das vom Deutschen Wetterdienst entwickelte Klima-Michel-Modell und die Gefühlte Temperatur (GT) zur Bewertung der Wärmebelastung verwendet (Jendritzky et al. 2007).

Die Gefühlte Temperatur unterscheidet sich meist von der im Schatten gemessenen Lufttemperatur. Unter warmen, sonnigen und windschwachen Bedingungen steigt sie schneller an als die Lufttemperatur. In Mitteleuropa kann die Gefühlte Temperatur bis zu 15 Kelvin über der Lufttemperatur liegen. Entsprechend kann sie bei fehlender direkter Sonneneinstrahlung und hohen Windgeschwindigkeiten bis zu 15 Kelvin unter die Lufttemperatur fallen (Jendritzky und Grätz 1999).

Als Bewertungsschema wird die vom Deutschen Wetterdienst im Hitzewarnsystem verwendete Skala zu Grunde gelegt:

Tabelle 3.1: Thermisches Empfinden und gesundheitliche Gefährdung in Abhängigkeit von der gefühlten Temperatur (Quelle: DWD).

Gefühlte Temperatur (°C)	Thermisches Empfinden	Gesundheitliche Gefährdung
über 38	sehr heiß	sehr hoch
32 bis 38	heiß	hoch
26 bis 32	warm	mittel
20 bis 26	leicht warm	gering



Als weitere Bewertungskenngröße wird die Zahl der Hitzewarntage für die Stationen des Köln-Messnetzes berechnet. Dies geschieht in Anlehnung an das offizielle Hitzewarntage-System des DWD, das für die Allgemeinheit und speziell für Pflegeeinrichtungen zur Verfügung

steht. Im Fokus stehen dabei Wetterlagen, die über einen längeren Zeitraum tagsüber zu einer hohen bis sehr hohen Wärmebelastung führen bei gleichzeitiger geringer nächtlicher Abkühlung. Die hier verwendeten Kriterien für einen Hitzewarntag sind:

Tabelle 3.2: Warnkriterien für Hitzewarnungen (Quelle: DWD)

Gefühlte Temperatur (°C)	Gefühlte Temperatur (Folgetag)	Lufttemperatur in der Nacht zum Folgetag	Hitzewarnung
mindestens 38			ja
32 bis 38	32 bis 38	mindestens 16 Grad	ja

Im Ergebnisteil des Berichts werden für die Stationen des Messnetzes in Köln neben den temperaturbasierten Kenntagen Sommertage und heiße Tage zusätzlich für

ausgewählte Monate die – auf der gefühlten Temperatur basierenden – Tage mit Wärmebelastung und Hitzewarntage aufgeführt.

3.4 Stadtklimamodell MUKLIMO_3

3.4.1 Allgemeine Erläuterungen

Um Aussagen zu den zukünftigen sommerlichen Temperaturverhältnissen in Köln treffen zu können, wurden Projektionsrechnungen durchgeführt.

Die Vielzahl der globalen Projektionsrechnungen (Ensembles) mit unterschiedlichen **globalen Ozean-Atmosphäre**-Klimamodellen (IPCC 2007) ermöglicht es – auf der Basis definierter Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe –, die Klimaänderungen mit einer horizontalen Auflösung von etwa 200 Kilometern abzuschätzen. In einem ersten Schritt werden diese globalen Klimaprojektionsrechnungen mittels dynamischer und statistischer Methoden auf eine regionale Skala mit einer typischen Auflösung von zehn bis 20 Kilometern herunter gerechnet. Diese **regionalen Klimaprojektionen** erlauben es, in Deutschland regional unterschiedlich ausfallende Klimaänderungen zu beschreiben (z. B. www.dwd.de/klimaatlas).

Für den zweiten Skalierungsschritt von der regionalen auf die (lokale) städtische Skala wird in dieser Untersuchung das **Stadtklimamodell MUKLIMO_3** (dreidimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) des Deutschen Wetterdiensts verwendet. Für die Kopplung zwischen regionaler und städtischer Skala wurde die so genannte „Quadermethode“ benutzt (Früh et al. 2011a).

3.4.2 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 des Deutschen Wetterdienstes wurde für die Untersuchung stadtklimatologischer Fragestellungen entwickelt (Sievers und Zdunkowski 1986; Sievers 1990 und 1995; Früh et al. 2011b). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO_3 auf einem dreidimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Temperatur und Feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung sowie vieler weiterer relevanter meteorologischer Parameter. Wolken- und Niederschlagsentstehung können nicht modelliert werden.

Aufgrund der Größe der Stadt Köln – und somit des Modellgebiets – wurde eine horizontale Auflösung von 100 m x 100 m im Berechnungsmodus „un aufgelöste“ Bebauung gewählt. Diese Methodik beruht auf einer Parametrisierung der Gebäudeeffekte unter der Annahme, dass sich Luftströmungen zwischen Gebäuden und Strömungen eines Gases oder einer Flüssigkeit in einem porösen Medium (Gross 1989) ähnlich verhalten. Außer der Strömungsverdrängung durch das Bauvolumen werden im Modell die bremsende Wirkung der Gebäudeoberflächen sowie die Turbulenzerzeugung durch Strömungsabriss an den Gebäudekanten berücksichtigt. Auch die mit Höhe und Dichte der Bebauung zunehmenden

de Verlagerung des Strahlungsumsatzes vom Boden zu den Wänden und Dächern der Gebäude beziehungsweise zu den Baumkronen wird modelliert. Straßen können über eine Erhöhung des Versiegelungsgrades der betroffenen Modellgitterzellen berücksichtigt werden. Das Modell MUKLIMO_3 ermöglicht somit die detaillierte Simulation von Wechselwirkungen zwischen städtischer Bebauung, Vegetation und Atmosphäre.

Eingangsgrößen für jede Gitterzelle des Modellgebiets sind die Höhe über NN und Informationen zur Art der Landnutzung. Zur Beschreibung der städtischen Bauungsstruktur werden in den verschiedenen Landnutzungsklassen statistische Parameter verwendet, wie der mittlere Gebäudegrundflächenanteil, die mittlere Gebäudehöhe, der mittlere Wandflächenindex sowie der mittlere Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden (Früh et al. 2011a). Die Definition der MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen für Bebauung orientiert sich an der technischen Beschreibung von neun verschiedenen Bauungsstrukturen des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BMBau 1980).

Das Modell berechnet den Wärme- und Feuchtehaushalt des Bodens und es beinhaltet ein Vegetationsmodell mit drei vertikalen Schichten. Die oberste der drei Schichten beschreibt den Kronenraum der Bäume mit Hilfe spezifischer Parameter wie mittlere Baumhöhe, Blattflächendichte¹ im Kronenbereich und Grundflächenanteil des Baumbewuchses. Bäume und Pflanzenblätter haben im Vegetationsmodell drei wichtige Funktionen: Sie wirken als Hindernisse für die Luftströmung und sind Quellen und Senken für die Strahlung und den Wasserdampf. Für die in MUKLIMO_3 verwendeten Landnutzungsklassen sind die Werte der Vegetationsparameter in Früh et al. (2011a) dokumentiert. Weitere Details des Modells, wie die Berücksichtigung der Strahlung und gebäudespezifischer Parameter können ebenfalls der Arbeit von Früh et al. (2011a) entnommen werden.

Mit dynamischen Klimamodellen werden die zukünftigen Werte von Klimaparametern wie Lufttemperatur oder Windgeschwindigkeit als Zeitreihe aufeinander folgenden Zeitpunkte mit konstanten Zeitschritten berechnet.

Zu jedem dieser Zeitpunkte müssen alle dem Modell zugrunde liegenden mathematischen Gleichungen an allen Gitterpunkten des Modellgebiets berechnet werden. Da methodisch bedingt der maximal erlaubte Zeitschritt hoch auflösender dynamischer Stadtklimamodelle wie MUKLIMO_3 nur wenige Sekunden beträgt, ist es auch heute noch nicht möglich, eine 30- oder 50-jährige Zeitreihe für Klimasimulationen zu berechnen.

Die im MUKLIMO_3-Modell verwendete Quadermethode stellt ein Verfahren dar, das es erlaubt für die Berechnung der Anzahl der Sommertage und heißen Tage den Rechenaufwand für die Simulationen für den Projektionszeitraum 2021 bis 2050 stark zu verringern (Früh et al. 2011a).

Die Quadermethode basiert auf der Annahme, dass das Auftreten von Wetterlagen, die in Köln zu hohen Temperaturen, das heißt zu Sommertagen oder heißen Tagen führt, im Wesentlichen von den regional repräsentativen, nicht städtisch beeinflussten Werten der drei Klimaparameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit (in Bodennähe) abhängt. Wenn die Minima und Maxima dieser drei Klimaparameter bestimmt werden, die jeweils zu Wärmebelastungssituationen in der Stadt führen, müssen nur für die acht Eckwerte dieses Quaders Berechnungen mit MUKLIMO_3 durchgeführt werden: Alle anderen meteorologischen Situationen, die innerhalb dieses Wertebereichs liegen, lassen sich durch Kombination dieser Berechnungen bestimmen. Für die anderen Situationen ergeben sich nie Sommertage oder heiße Tage, wenn die Werte unterhalb der Minima des Quaders liegen, beziehungsweise immer solche Kenntage, wenn die Werte oberhalb der Maxima liegen. Für Köln wurden zwei Hauptwindrichtungen ermittelt, so dass zwei Quader und somit 16 MUKLIMO_3-Berechnungen erforderlich waren.

Das gesamte Quadermethode-Verfahren, beginnend mit den MUKLIMO_3 Simulationen des idealisierten Tagesganges und den Zeitreihen des regionalen Hintergrundklimas über die Quadermethode bis zur statistischen Auswertung der Ergebnisse ist in Früh et al. (2011a) beschrieben.

1 Blattflächendichte: Blattfläche pro Gittervolumen in m^2m^{-3}



3.4.3 Klimazeitreihen

Um die Quadermethode bezüglich ihrer Eignung für die Untersuchung des zukünftigen städtischen Klimawandels beurteilen zu können, werden langjährige Messreihen der wichtigsten Klimaparameter für einen zurück liegenden Zeitraum (z. B. 1971 bis 2000) als Tageswerte benötigt. Zum einen werden Zeitreihen verwendet, die repräsentativ für die Region um die Stadt sind (ähnliche topographische Lage), aber möglichst frei von städtischen Einflüssen sind. Zum anderen ist es notwendig, langjährig gemessene Klimazeitreihen innerhalb des MUKLIMO_3 Modellgebiets verfügbar zu haben, um die räumlich detaillierten Ergebnisse der Quadermethode (z. B. mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen) punktuell evaluieren zu können.

Zur Ermittlung des zukünftigen regionalen Klimas wird im vorliegenden Fall ein Ensemble von vier regionalen Klimaprojektionen verwendet, um die Unsicherheiten, welche in diesen Modellsimulationen stecken, zu berücksichtigen. Zwei dieser vier Projektionen wurden mit numerischen Klimamodellen erzeugt, die beiden anderen mit statistischen Verfahren:

1. Ein Lauf des hydrostatischen Modells **REMO** (Jacob 2001), der im Auftrag des Umweltbundesamtes (Jacob et al. 2008) erzeugt wurde (Gitterweite: $0,088^\circ \approx 10 \text{ km}$)
2. Ein Lauf des nicht-hydrostatischen Klimamodells **CLM** (Böhm et al. 2006), durchgeführt von Hollweg et al. (2008) mit Gitterweite: $0,165^\circ \approx 18 \text{ km}$.

3. Projektionen der auf Klimastationsdaten basierenden statistischen Verfahren **WETTREG** (Enke et al. 2005) und
4. **STAR** (Orlowsky et al. 2008).

Alle in dieser Studie verwendeten regionalen Klimaprojektionen werden mit Daten des globalen Klimamodells ECHAM5 (Roeckner et al. 2006a und 2006b; Hagemann et al. 2006) angetrieben. Es werden die Zeiträume 1971 bis 2000 (als historischer Vergleichszeitraum „C20“) und 2021 bis 2050 (mit dem SRES-Szenario A1B², Nakicenovic und Swart 2000) betrachtet. Ein detaillierter Überblick über die Modelle und Simulationen ist Früh et al. (2011a) zu entnehmen.

Die Spannweite der Ergebnisse sowohl der globalen als auch der regionalen Modelle ist ein Maß für die Unsicherheit der Projektionsrechnungen. Im Sinne der Chaostheorie sind alle Ergebnisse als gleich wahr (oder falsch) zu interpretieren, eben als eine mögliche Realisierung des zukünftigen Klimas. Für eine bestimmte Periode (z. B. 30-jähriges Mittel der Lufttemperatur 2021 bis 2050) liefert das Ensemble der Modelle die Aussage, dass die Zunahme der mittleren Lufttemperatur geringer/gleich dem ermittelten Maximalwert und größer/gleich dem Minimalwert ist. In Analogie sind die Ergebnisse der MUKLIMO_3 Berechnungen zu interpretieren, die auf den vier verwendeten Realisierungen der Regionalmodelle beruhen: Um das Ergebnis korrekt einzuordnen, sind somit der konkrete Wert des betrachteten Modells (Einzelergebnis) sowie die Spannweite der Ergebnisse des Ensembles zu nennen.

2 SRES: Special Report on Emission Scenarios (IPCC): dort sind Emissionsszenarien für klimarelevante Spurenstoffe bis zum Jahre 2100 festgelegt.

3.5 Extremwertstatistische Auswertungen von stündlichen Radarniederschlagsdaten

Motivation

Bei der Thematik Starkniederschlagsereignisse mit lokalen Überflutungen sowie Dimensionierung von Kanalnetzen bieten räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsmesswerte wichtige Basisinformationen. Trotz der deutschlandweit verfügbaren quantitativen Aussagen über die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2000 (2005) gibt es nach wie vor Bedarf an räumlich hoch aufgelösten Starkniederschlagsanalysen. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf räumlich begrenzten Ereignissen und geringen Dauerstufen, die typischerweise durch konvektive Niederschlagsereignisse (z.B. sommerliches Schauerwetter) charakterisiert sind.

Neben den an Stationen dokumentierten Niederschlagszeitreihen werden zunehmend auch **Radarniederschlagsdaten** hinsichtlich ihrer Extremwerte statistisch erfasst, um sowohl lokale Besonderheiten als auch aktuelle Entwicklungen im Starkniederschlagsgeschehen bewerten zu können. Dabei ergänzen sich die Analysen auf Basis der hoch aufgelösten, flächendeckenden Radardaten und die quantitativen, langjährigen Punktmessungen der Stationsdaten.

Die vorliegende Studie ermöglicht Aussagen zum Starkniederschlagsgeschehen für Niederschlagsperioden (Dauerstufe (D)) von weniger als einem Tag in der Region Köln (Stadtgebiet Köln und Umgebung) auf der Basis flächendeckender, stündlich angeeichter Radardaten. Dabei werden unterschiedliche Überschreitungshäufigkeiten beziehungsweise Wiederkehrintervalle T bis zu einer minimalen Dauerstufe von einer Stunde betrachtet. Da eine Zeitreihenlänge von zehn Jahren noch nicht erreicht ist, müssen sich die Ergebnisse auf die Wiederkehrintervalle zwischen einem und 20 Jahre beschränken.

Methodische Grundlagen

Methodisch basieren die Auswertungen auf dem im Projekt KOSTRA-DWD-2000 verwendeten extremwertstatistischen Analyseverfahren. Dieses wurde bereits zur Ermittlung von Starkniederschlagshöhen angewandt und in modernisierter Form jüngst im Arbeitsblatt DWA-A 531 (2012) publiziert. Prinzipiell wird dabei die Bewertung der zufällig aufgetretenen Ereignisse vorgenommen und eine Extrapolation auf Starkniederschlagsereignisse ermöglicht, die nur selten auftreten. Dies geschieht innerhalb eines ausreichend langen Messzeitraumes. Der Extrapolationsbereich beträgt rund das Dreifache der Zeitreihenlänge: Dies bedeutet, dass zur

Quantifizierung 100-jährlicher extremwertstatistisch ermittelter Starkniederschlagshöhen 30-jährige Zeitreihen benötigt werden.

Der extremwertstatistische Ansatz geht für jede **Dauerstufe (D)** von einer jährlichen oder partiellen Serie aus, die sich aus einer Niederschlagszeitreihe ergibt. Jede Serie der **Niederschlagshöhe h_N** wird durch eine Regressionsrechnung der theoretischen Verteilungsfunktion $h_N(D;T) = u(D) + w(D) \cdot \ln T$ in Abhängigkeit vom **Wiederkehrintervall T** angepasst. Die Verteilungsfunktion wird durch die **Parameter $u(D)$** und **$w(D)$** charakterisiert.

Für die vorliegende extremwertstatistische Analyse wurde die Niederschlagsreihe auf partielle Serien reduziert. Diese entstehen, wenn alle über einem festzulegenden Schwellenwert liegenden Werte ihrer Größe nach geordnet werden. Dabei muss die Anzahl der Serienwerte relativ klein sein, denn eine zu umfangreiche partielle Serie beinhaltet auch häufiger vorkommende Werte.

In der vorliegenden Studie wurde der Schwellenwert so festgelegt, dass der Umfang der Serie beziehungsweise der Stichprobenumfang das 2,72-fache der Länge der zugrunde liegenden Zeitreihe beträgt. Je Dauerstufe ($1 \text{ h} \leq D \leq 12 \text{ h}$) werden die 18 größten Werte der Niederschlagshöhe pro Quadratkilometer in der Region Köln extremwertstatistisch analysiert.

Die Stichproben der Niederschlagswerte enthalten mitunter außergewöhnlich erscheinende Größenwerte. Alle Niederschläge mit einem Wert größer 15 mm/h wurden darauf geprüft, ob es sich um fehlerhafte Werte oder „Ausreißer“ im statistischen Sinne handelt. Darüber hinaus wurde die Sensitivität der extremwertstatistischen Auswertung bezüglich statistischer Ausreißer anhand ausgewählter Daten untersucht und diskutiert. Eine umfassende Analyse und Behandlung der statistischen Ausreißer wurde im Rahmen dieser ersten Auswertung der radarbasierten Niederschlagsanalyse jedoch nicht durchgeführt.

Datengrundlage

Angeeichte Radarniederschlagsdaten heißt, dass die mit dem Wetterradarsystem des DWD gemessenen Reflektivitäten zunächst in Regenmengen umgerechnet und anschließend an gemessene Niederschlagswerte von Bodenmessstationen angepasst werden. Die von Juni 2005 bis Dezember 2011 archivierten angeeichten

Radarniederschlagsdaten (sog. RW-Produkt von RADOLAN, www.dwd.de/RADOLAN) aus dem operationell in Echtzeit betriebenen Routinebetrieb wurden für die Region Köln einer Nachbearbeitung unterzogen, um eine Datenqualität zu erreichen, die eine klimatische Analyse des Datensatzes erlaubt. Die Region Köln wird dabei durch 1681 Punkte im 1-km²-RADOLAN-Raster (41 km x 41 km großes Gebiet mit dem geografischen Mittelpunkt bei 50° 58' N, 06° 58' E, entspricht dem Botanischen Garten im Zentrum der Stadt Köln) beschrieben. Die vorbereitende Analyse umfasste in erster Linie

- von Fehlsignalen unter Erhaltung der realen Niederschlagssignale (Clutter-Filterung),

- die visuelle Prüfung und Korrektur auffällig großer Niederschlagshöhen,
- die Produktion von 1681 Zeitreihen von Stundenwerten der Niederschlagshöhe,
- eine Normierung der Radardaten sowie
- die Anwendung von Höhe-Dauer-Häufigkeit-Niederschlagsrelationen.

Aufbereitung der Niederschlagsdaten

Im Rahmen des RADOLAN-Projekts entwickelte der Deutsche Wetterdienst von 1997 bis 2004 in Zusammenarbeit mit der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser ein räumlich und zeitlich hochauflösendes Radarniederschlagsprodukt für die Echtzeitanwendung im operativen Hochwasserschutz. Im Rahmen dieser Studie wurden die für den Zeitraum ab Juni 2005 verfügbaren operationellen Niederschlagsanalysen zum ersten Mal für eine klimatologische Anwendung extremwertstatistisch betrachtet. Das im Rahmen der vorgestellten Arbeit analysierte RW-Produkt ist das Ergebnis der Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Stationsdaten der stündlichen Niederschlagssumme und umfasst somit eine flächendeckende, quantitative Niederschlagsanalyse für nahezu das gesamte Bundesgebiet (Bartels et al. 2004). Für die Auswertungen in dieser Studie wurde das Gebiet auf eine Fläche von 41 km mal 41 km um Köln beschränkt.

Bei der Nachbearbeitung der Daten wurde eine spezielle Clutterkorrektur verwendet, um die Fehlsignale unter Erhaltung der realen Niederschlagssignale zu beseitigen (Winterrath und Rosenow 2007; Krug 2012). Im zweiten Schritt wurden insbesondere hohe Werte geprüft und – wenn als fehlerhaft identifiziert – entfernt.

Beispielhaft für die damit erzielte Qualitätsverbesserung soll dies mit Hilfe des extrem trockenen Monats April 2007 veranschaulicht werden. Der nur durch wenige, schwach konvektive Ereignisse geprägte Monat wird im Echtzeitbetrieb von RADOLAN mit vielen Falschechos in einzelnen, vollkommen niederschlagsfreien Zeiten mit einer unrealistisch strukturierten monatlichen Niederschlagsverteilung wiedergegeben (Abb. 3.9b, Falschechos z. B. im Nordosten des Gebiets). Die nachträglich angewandte Clutterfilterung beseitigt diese Falschechos, erhält alle realistischen Niederschlagsechos (Abb. 3.9c) und gibt die an den Stationen gemessenen Werte (Abb. 3.9a) deutlich realistischer wieder.



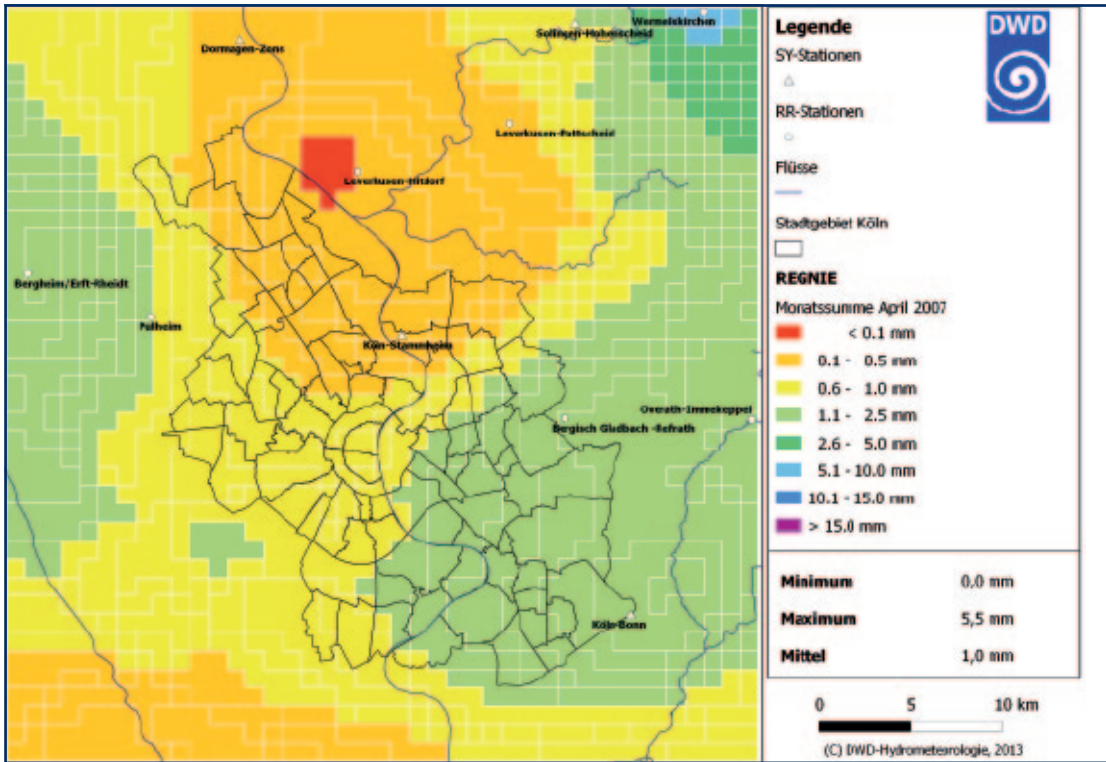


Abb. 3.9a: Monatssumme des Niederschlags im April 2007 aus stationsbasierten Niederschlagsmessungen.

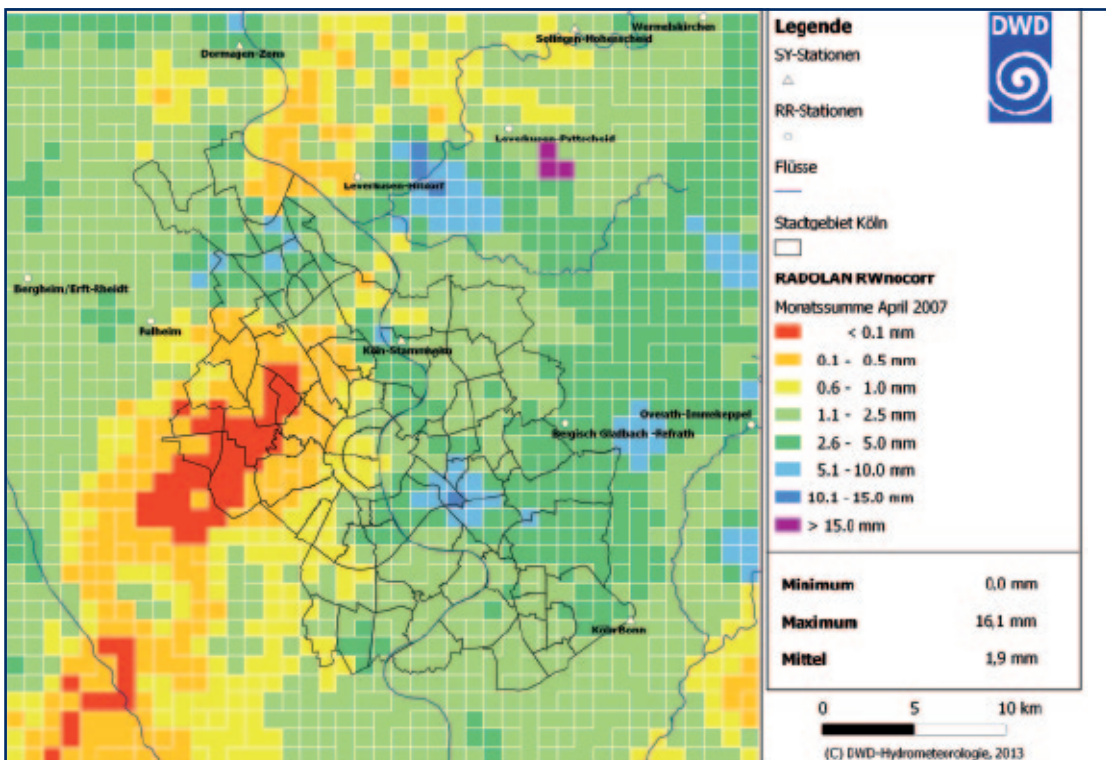


Abb. 3.9b: Monatssumme des Niederschlags im April 2007 aus radarbasierten Niederschlagsmessungen (RADOLAN-RW aus dem Echtzeitbetrieb).

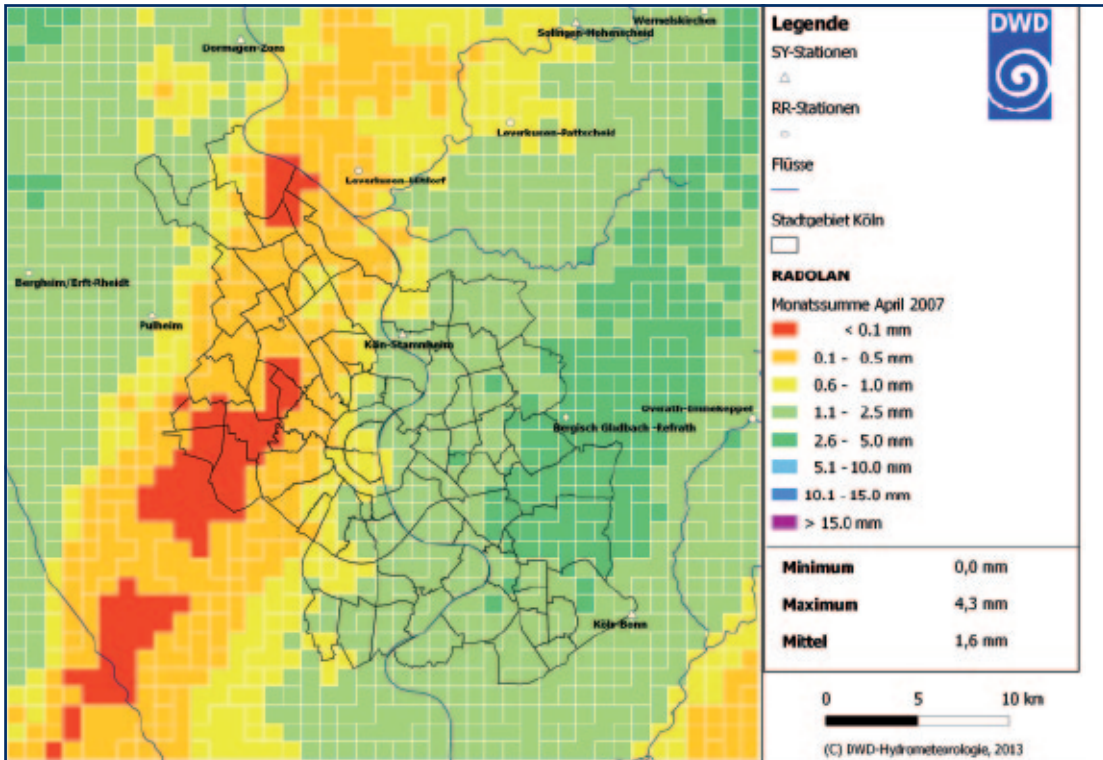


Abb. 3.9c: Monatssumme des Niederschlags im April 2007 aus radarbasierten, nachträglich clutterkorrigierten Niederschlagsmessungen.

Um die Güte der angeeichten Niederschlagsanalysen zu bestimmen, wurde ein Vergleich mit gemessenen stationsgebundenen Niederschlagssummen durchgeführt. Die gute Übereinstimmung der ermittelten Radarniederschlagsdaten konnte anhand von Tageswerten der Stationen, die nicht in die Aneichung eingehen (RR-Stationen), bestätigt werden (Instinsky 2012).

In der Abbildung 3.10 ist die Regressionsgerade für die Station Bergisch-Gladbach-Refrath dargestellt, an der der maximale Tageswert von 71,8 mm am 29.06.2005 an einer Station in diesem Gebiet und in der untersuchten Zeitspanne aufgetreten ist. Man erhält eine sehr hohe Korrelation von 0,90 zwischen den Stations- und den zugehörigen Radarwerten.

Für den betrachteten Zeitraum zeigt sich, dass die angeeichten Radarniederschlagsdaten im Sommer im Mittel um knapp 22 Prozent über den Stationswerten liegen und damit innerhalb eines tolerablen Fehlerbereichs (Schmitt 2013). Mögliche Ursachen für diese Diskrepanz ist die flächenmäßige Überschätzung des Niederschlags im Radarkomposit durch das bis 2010 verwendete Verfahren („Push“-Methode), und die Verwendung

gemessener Niederschlagsdaten, die keine Niederschlagskorrektur aufweisen (potenzielle Unterschätzung der tatsächlichen Regenmengen). Um eine Vergleichbarkeit der radarbasierten Niederschlagsanalyse mit den interpolierten Stationsdaten zu ermöglichen, wurde daher eine Normierung auf den Mittelwert der Stationsdaten, das heißt einer Reduktion der Radaranalysen um etwa 22 Prozent durchgeführt. Aufgrund der durchgeführten Qualitätsprüfungen können die im Weiteren diskutierten Ergebnisse als realistisch betrachtet werden.

Erstellung der Niederschlagsserien

Für die extremwertstatistische Auswertung der 6,5-jährigen Zeitreihen von Stundenwerten der Niederschlagshöhe für unterschiedliche Dauerstufen wurden zunächst die dauerstufenbezogenen Zeitreihen gebildet. Beispielsweise wurde für die Zeitreihe von sechs-Stunden-Werten der Niederschlagshöhe das Zeitfenster der Dauerstufe D = 6 h sukzessiv im Stundenschritt über den gesamten Zeitraum hinweg verschoben. In die aus den Niederschlagsreihen entstandenen Niederschlagsserien gehen nur große Werte der Niederschlagshöhe ein, die voneinander durch einen hier 6-stündigen niederschlagsfreien Zeitabschnitt getrennt sein müssen. Die Forderung nach

statistischer Unabhängigkeit der Eingangswerte kann als erfüllt angesehen werden, wenn zwischen den Stichprobenwerten ein niederschlagsfreier Zeitraum von der Dauer der betrachteten Dauerstufe, aber mindestens von vier Stunden vorliegt.

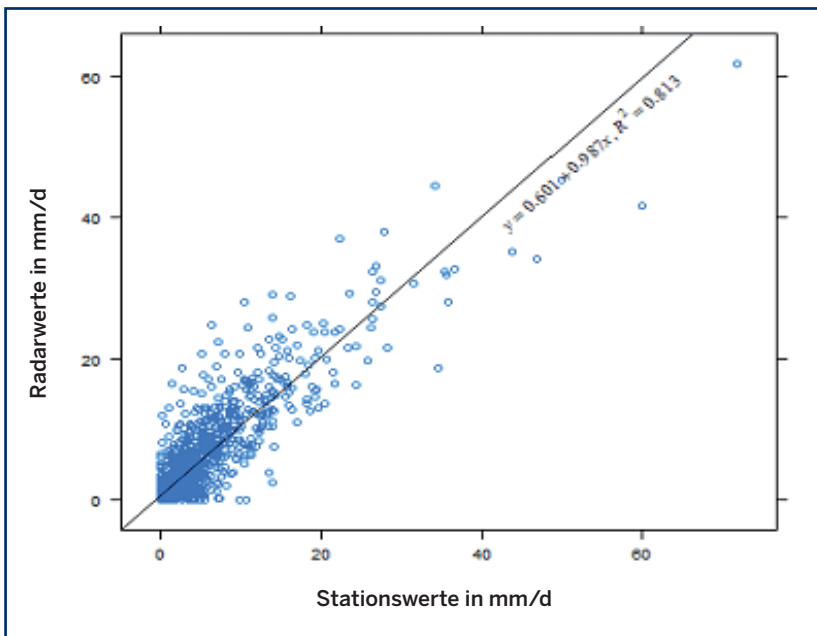


Abb. 3.10: Korrelation der täglichen Niederschlagswerte für die Zeitspanne 06/2005 bis 12/2011 an der Station Bergisch-Gladbach-Refrath.



3.6 Niederschlagstrends in Köln auf der Basis regionaler Klimamodellierung und Extremwertstatistik

Die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS 2008) spricht von Hinweisen darauf, dass extreme Wetterereignisse in diesem Jahrhundert sowohl häufiger als auch stärker auftreten werden. Dies gilt insbesondere für Starkniederschlagsereignisse, die zumeist – örtlich begrenzt – in Städten zu Überflutungen von Straßen und Kellern mit hohen Sachschäden führen können.

Um die These einer Veränderung der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignisse für die Stadt Köln bis Ende des Jahrhunderts zu untersuchen, wurden Zeitreihen stündlicher Niederschlagssummen des regionalen Klimamodells HIRHAM5 des Dänischen Wetterdienstes (DMI) verwendet (Bøssing Christensen et al. 2007). Der

Projektionslauf basiert auf einem Lauf des globalen Modells ECHAM5 bezüglich des IPCC-Emissionsszenarios A1B (IPCC 2000) und liefert Daten von 1950 bis zum Jahre 2100. Die räumliche Auflösung beträgt etwa 25 km mal 25 km. Um das Stadtgebiet Köln abzudecken, werden neun Gitterpunkte verwendet (Abb. 3.11).

In der Klimatologie ist es üblich, Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen mittels Anpassung der Verteilungsparameter vordefinierter theoretischer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen an die vorhandenen Daten abzuschätzen (Deutschländer und Dalelane 2012). Hier wird als eine sogenannte nicht-parametrische Statistik die Methode der Kerndichteschätzung

verwendet, bei der keine vorgegebene Häufigkeitsverteilung zugrunde gelegt werden muss. Durch dieses Verfahren wird die Datenreihe durch gleitende gewichtete Mittelung geglättet, wobei die bekannte Methode der Gaußschen Tiefpassfilterung ein Spezialfall der Kerndichteschätzung ist.

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_i K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_i K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Als Stellgrößen zur Schätzung der Kerndichte dient zum einen die Wahl der Kernfunktion K und zum anderen die Bandbreite h , welche die Stärke der Glättung über die Anzahl der zu berücksichtigenden Nachbardatenpunkte festlegt.

Die Basis, um Änderungen der Niederschlagsextreme bestimmen zu können, bilden in der Klimaprojektionsrechnung die Zeitreihen (für die neun betrachteten Gitterpunkte) der Stundensummen. Im Sinne einer extremwertstatistischen Untersuchung werden zunächst neue Zeitreihen ermittelt, indem man die berechneten Werte an einem Schwellenwert abschneidet und anschließend nur noch die Stunden berücksichtigt, deren Werte oberhalb des Schwellenwertes liegen (Abb. 3.12). Die somit erzeugte zweidimensionale Punktwolke aus Wertepaaren (Stunde, Höhe der

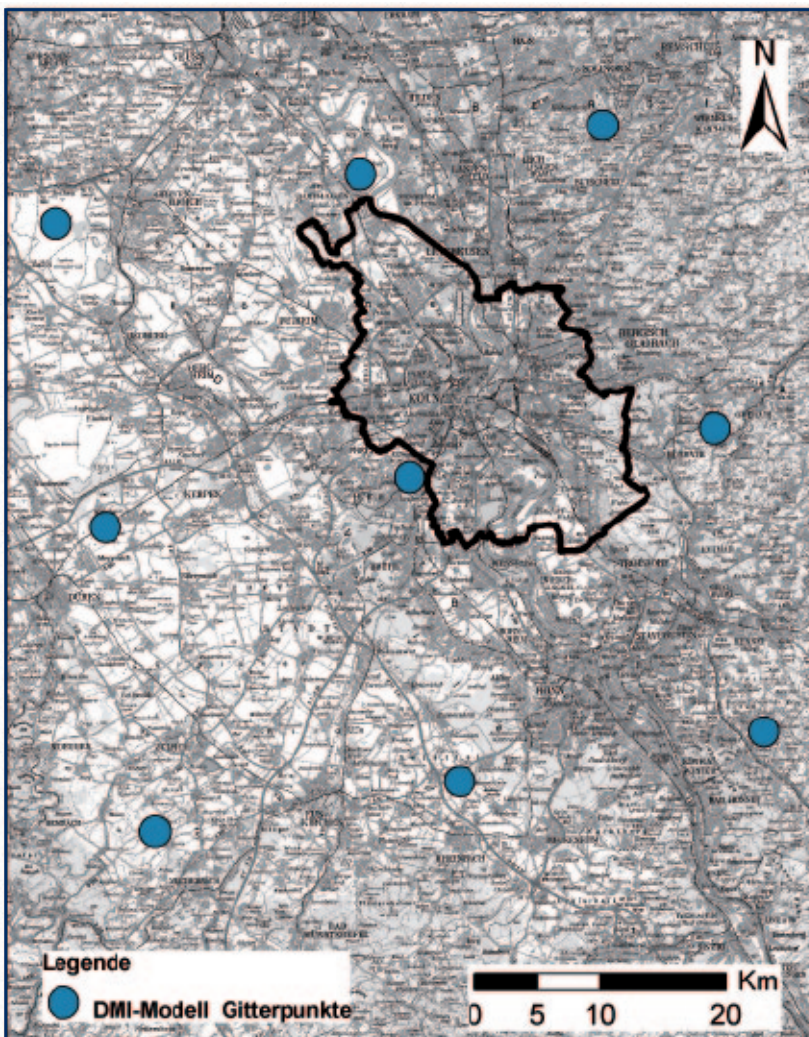


Abb. 3.11: blaue Punkte: Lage der verwendeten Gitterpunkte des HIRHAM5-Modells; schwarz umrandet: Stadtgebiet von Köln (Kartengrundlage: DTK200, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw).

Überschreitung des Schwellenwerts) ist eine bekannte Methode (Peaks-over-Threshold-Ansatz, zweidimensionaler Poisson-Punkt-Prozess) zur Datenauswahl für extremwertstatistische Auswertungen. Der Poisson-Prozess ist wesentlich durch die sogenannte Intensität charakterisiert.

Die Schätzung der Intensitäten und damit die Berechnung der zeitlich veränderlichen Auftrittswahrscheinlichkeit einer Schwellwertüberschreitung, erfolgt nun mit der oben beschriebenen Methode der Kerndichteschätzung: Für jeden Zeitpunkt der Periode 2000 bis 2100 ergeben sich kontinuierlich die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens einer Schwellwertüberschreitung.

Für die Wahl der Schwelle muss zunächst gelten, dass sie so gewählt wird, dass die Einzelereignisse hinreichend weit auseinander liegen, um als unabhängig betrachtet werden zu können. Als Schwellenwerte wurden das 99 Prozent-Perzentil sowie der Perzentilwert, der einer Jährlichkeit von 1 entspricht, gewählt. Dadurch ist zum Beispiel ein Vergleich mit den Aussagen der Sensitivitätsbetrachtungen der Kanalnetzmodellierung (Kap. 5.2) möglich.

Die Berechnung der Schwellenwerte erfolgt auf der Basis der Kontrollrechnungen für die Jahre 1961 bis 2000. Diese Schwellenwerte werden dann über den gesamten Zeitraum bis zum Jahre 2100 festgehalten. Anschließend werden die durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeiten des Kontrollzeitraums 1961 bis 2000 auf Eins normiert, so dass dann für den Zeitraum 2000 bis 2100 Werte über Eins eine Zunahme, Werte kleiner als Eins eine Abnahme des Auftretens von Niederschlagsereignissen des betrachteten Perzentils (= der jeweiligen Jährlichkeit) bedeuten.

In Kapitel 4.5 wird für die verschiedenen Jährlichkeiten gezeigt, ob es zu einer Zunahme der Häufigkeit entsprechender Niederschlagsereignisse in diesem Jahrhundert kommen wird.



Literatur

- Arbeitsblatt DWA-A 531, 2012: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, 29 S.
- Bartels, H., Weigl, E., Reich, T., Lang, P., Wagner, A., Kohler, O. Gerlach, N., 2004: Zusammenfassender Abschlussbericht zum Projekt RADOLAN, 111 S.
- BMBau (Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau) 1980: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe Raumordnung 06.044, Forschungsprojekt BMBau RS II 4-70 41 02-77. 10.
- Bøssing Christensen, O., Drews, M., Hesselbjerg Christensen, J., Dethloff, K., Ketelsen, K., Hebestadt, I., Rinke, A., 2007: The HIRHAM Regional Climate Model. Version 5 (β). Denmark. Danish Meteorological Institute. Technical Report 06-17.
- DAS, 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Deutschländer, T., Dalelane C., 2012: Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht, Oktober 2012.
- DWD: Grundlagen RADOLAN, www.dwd.de/RADOLAN.
- Enke, W., Deutschländer, T., Schneider, F., Kuchler, W., 2005: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorol. Zeitschrift, 14, S. 247-257.
- Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Koßmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011a: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. J. Appl. Meteor. Clim., Vol. 50, No. 1, S. 167-184.
- Früh, B., Koßmann, M., Roos, M., 2011b: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, 68 S.
- Gross, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. 62, S. 57-72.
- Hagemann, S., Arpe, K., Roeckner, E., 2006: Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model. J. Climate, 19, S. 3810-3827.
- Hollweg, H.-D., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., Lautenschlager, M., Legutke, S., Radtke, K., Rockel, B., Schubert, M., Will, A., Woldt, M., Wunram, C., 2008: Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. Tech. Rep. no. 3, Model and Data group at the Max-Planck Institut for Meteorology, Hamburg. ISSN printed: 1619-2249, ISSN electronic: 1619-2257.
- Instinsky, S., 2012: Ergebnisbericht zum Hochschulpraktikum beim Deutschen Wetterdienst.
- IPCC SRES, 2000 – Nakicenovic, N., Swart, R., (Eds.): Special Report on Emissions Scenarios. (www.ipcc.ch).
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the baltic sea drainage basin. Meteorol. Atmos. Phys., 77, S. 61-73.
- Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Tech. Rep. Abschlussbericht zum UFOPLAN Vorhaben 204 41 138, 11, 154pp, UBA-Reihe Climate Change, Dessau.
- Jendritzky, G., Grätz, A., 1999: Das Bioklima des Menschen in der Stadt. In: Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. J., (Hrsg.) Stadtklima und Luftreinhaltung. Springer, Heidelberg, S. 126-158.

- Jendritzky, G., Fiala, D., Havenith, G., Koppe, C., Laschewski, G., Staiger, H., Tinz, B., 2007: Thermische Umweltbedingungen. *Promet*, 33, S. 83-94.
- KOSTRA-DWD-2000, 2005: Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000), Grundlagenbericht, www.dwd.de/kostra.
- Krug, P., 2012: Falschechos im Wetterradar – Auswirkung der Erkennung, Beseitigung und Korrektur vor oder nach der Aneichung auf die Güte der Radarniederschlagsanalyse, Diplomarbeit, Universität Augsburg.
- Kuttler, W., Wacker, T., 2001: Analyse der urbanen Luftqualität mittels mobiler Messungen: DACH-Meteorologentagung, 18.-21. Sept. 2001. In: *Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik*, H. 27, Nr. 399, Session 8b, S. 1-16.
- Kuttler, W., 1993: Planungsorientierte Stadtklimatologie. Aufgaben, Methoden und Fallbeispiele. In: *Geographische Rundschau* 45, H. 2, S. 95-106.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), 2000: *Emissions scenarios – Summary for policymakers*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 20 pp.
- Orłowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C., 2008: A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.*, 92 (3-4), 209–223, doi:10.1007/s00704-007-0352-y.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornbluh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U., 2006a: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, 19, 3771-3791.
- Roeckner, E., Lautenschlager, M., Schneider, H., 2006b: IPCC-AR4 MPIECHAM5 T63L31 MPI-OM GR1.5L40 20C3M run no.1: Atmosphere monthly mean values MPImet/MaD Germany. doi:10.1594/WDC/EH5-T63L31 OMGR1.5L40 20C 1 MM.
- Schmitt, A., 2013: Bericht über ein 8-wöchiges Praktikum in der Zentrale des Deutschen Wetterdiensts.
- Sievers, U., Zdankowski, W., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* 59, S. 13-40.
- Sievers, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. *Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf.* S. 92-105.
- Sievers, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorol. Zeitschrift*, N. F. 4, S. 3-15.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure, 2008: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 – Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. Düsseldorf.
- Winterrath, T., Rosenow, W., 2007: A new module for the tracking of radar-derived precipitation with model-derived winds, *Adv. Geosci.*, 10, S. 77-83.



4 Ergebnisse

Im ersten Kapitel 4.1 werden die Auswertungen zu den Messungen der Lufttemperatur und des Niederschlags dargestellt. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 enthalten die Auswertungen zu den mittleren Jahres- und Monatswerten sowie klimatologische Kenntage und in Kapitel 4.1.3 wird der maximale Wärmeineffekt bestimmt. Kapitel 4.2 zeigt die Profifahrten zur Erfassung der räumlichen Temperaturverteilung in Köln.

In den weiteren Kapiteln werden die Ergebnisse der Berechnungen zusammengefasst:

- Bestimmung der stationsbezogenen Wärmebelastung mit dem Klima-Michel-Modell (Kap. 4.3)
- Ergebnisse des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 zu den Sommertagen und heißen Tagen für den Zeitraum 2021 bis 2050 (Kap. 4.4)
- Extremwertstatistische Auswertung flächendeckender Radarniederschlagsdaten für Köln (Kap. 4.5)
- Aussagen zu den Veränderungen von Extremniederschlagsereignissen anhand von Projektionsdaten bis Mitte des Jahrhunderts (Kap. 4.6).

4.1 Stationäre Messungen

4.1.1 Lufttemperatur

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Lufttemperaturmessungen während der Projektlaufzeit dargestellt. Die Messungen begannen an den Stationen schon im Laufe des Jahres 2010. Aus Gründen der Vollständigkeit und der Vergleichbarkeit werden hier jedoch nur die kompletten Jahre 2011 und 2012 gezeigt.

Die Abbildung 4.1 stellt die Jahresmittel der Lufttemperatur für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts) dar. Die

mittleren Jahrestemperaturen in beiden Jahren liegen an allen Stationen höher als das langjährige Mittel der Station Flughafen Köln-Bonn für den Zeitraum 1958 bis 2010 (10,1 °C) und übertreffen – bis auf eine Station im Jahre 2012 – auch die Durchschnittstemperatur an der Flughafenstation von 10,3 °C der aktuellen Klimaperiode 1981 bis 2010. Das Jahr 2011 weist den höchsten Jahresmittelwert der Lufttemperatur seit Beginn der DWD-Aufzeichnungen am Flughafen Köln-Bonn im September 1957 auf.

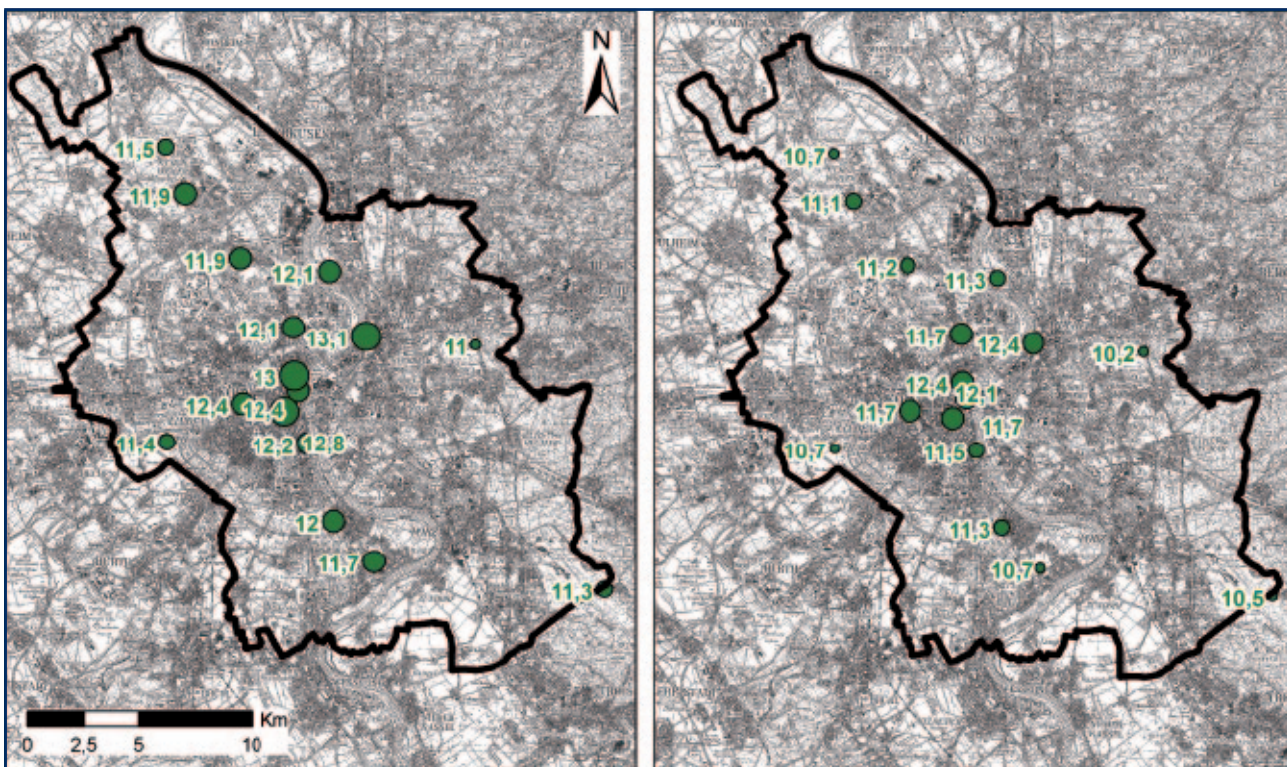


Abb. 4.1: Mittlere Jahrestemperatur in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Temperatur (hohe: große Flächen, niedrige: kleine Flächen); Angaben in °C. Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Auf den ersten Blick wird deutlich, dass innerhalb des Stadtgebietes große Temperaturunterschiede auftreten. Die höchsten Jahresdurchschnittstemperaturen sind 2011 mit 13,1 und 13,0 °C an den LANUV-Stationen Clevischer Ring und Turiner Straße aufgetreten. Zu diesen beiden Stationen ist jedoch zu bemerken, dass die Messcontainer in Straßenschluchten unmittelbar an stark frequentierten Verkehrsflächen liegen (Kap. 3.1). An der DWD-Innenstadtstation Agrippabad wurde 2011 ein Temperaturmittel von 12,8 °C registriert. Gleichzeitig wurde an der Station in Dellbrück mit 11,0 °C das niedrigste Jahresmittel der Lufttemperatur verzeichnet.

Somit liegt der mittlere Temperaturunterschied (mittlerer Wärmeineffekt) zwischen der Innenstadt und der Peripherie bei rund 2 K im Jahr 2011.

Die Station in Dellbrück zeigt auch den niedrigsten Durchschnittswert für das Jahr 2012 (10,2 °C). Um 2,2 K höher lagen die durchschnittlichen Jahrestemperaturen an den zwei Stationen Clevischer Ring und Turiner Straße (je 12,4 °C). 2012 betrug der Jahresmittelwert der Lufttemperatur am Agrippabad, der wärmsten DWD-Station, 12,1 °C und lag somit knapp 2 K höher als in Köln-Dellbrück.

Der direkte Vergleich beider Jahre an jeder einzelnen Station zeigt, dass das Jahr 2011 um 0,7 bis 1,0 K wärmer war als das Jahr 2012.

Mit Ausnahme der Stationen Dellbrück und Fachhochschule wurde im Jahr 2011 an allen Stationen eine höhere Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) gegenüber dem Jahr 2012 verzeichnet (Abb. 4.2). 2011 wurden

die meisten Sommertage (67) in der Innenstadt an der Station Innerer Grüngürtel registriert. 19 Sommertage weniger wurden in diesem Jahr am Flughafen Köln-Bonn und im Sürther Feld erfasst. 2012 wurde die maximale Anzahl der Sommertage (58) an den Stationen Innerer Grüngürtel und Nippes erreicht. Gleichzeitig traten 2012 nur 39 Sommertage am Flughafen Köln-Bonn auf.

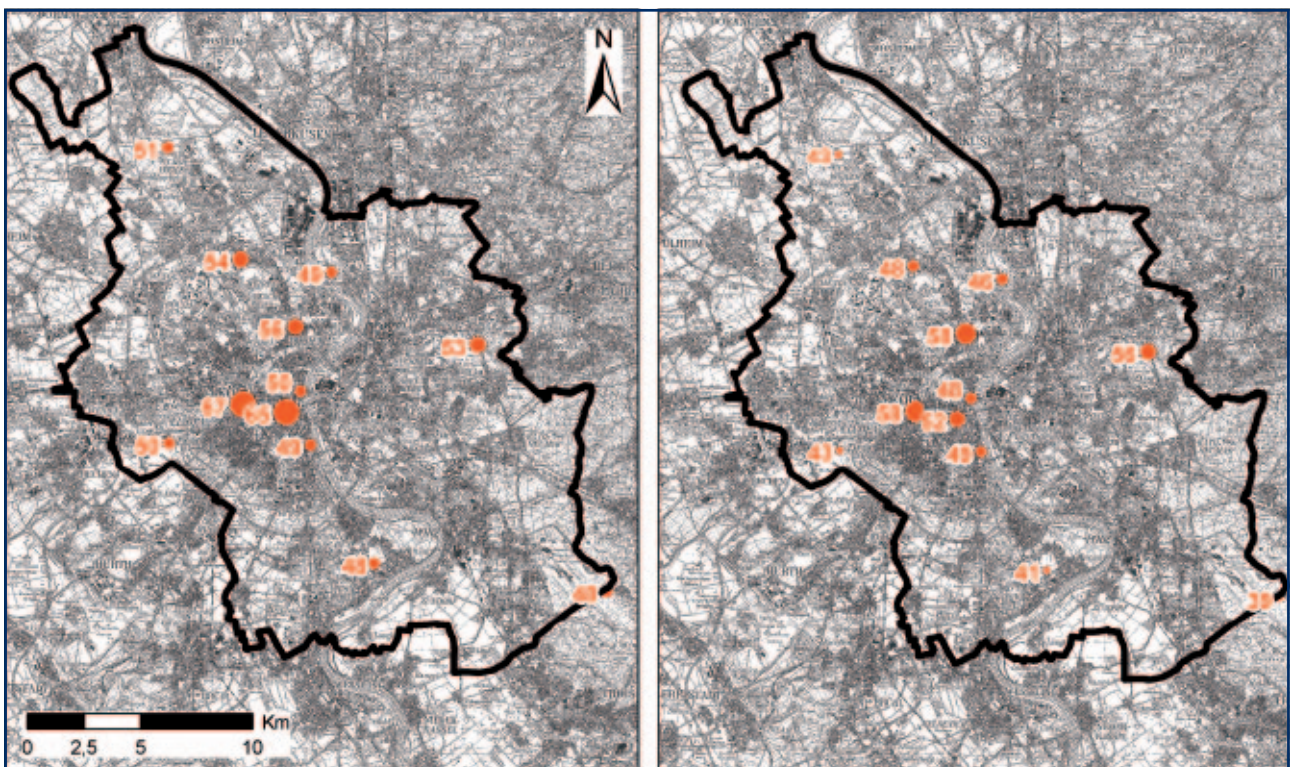


Abb. 4.2: Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Sommertage (viele: große Flächen, wenige: kleine Flächen). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

In beiden Jahren ist deutlich zu erkennen, dass die Anzahl der Sommertage von der Innenstadt zum Umland hin abnimmt. Die gleiche Tendenz zeigen ebenfalls die Karten mit der Anzahl der heißen Tage (Abb. 4.3) und der Tropennächte (Abb. 4.4).

Im Gegensatz zu den Sommertagen traten 2011 an den Stationen weniger heiße Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$); (Abb. 4.3, links) sowie Tropennächte ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$); (Abb. 4.4, links) als im Jahr 2012 (Abb. 4.3, rechts und Abb. 4.4, rechts) auf. Dies ist vor allem auf die Monate Juli und August zurückzuführen, die 2012 deutlich wärmer als 2011

ausgefallen sind. Der August 2012 gehört am Flughafen Köln-Bonn zu den zehn wärmsten Augustmonaten seit Aufzeichnungsbeginn.

2012 wurde die maximale Anzahl von 16 heißen Tagen an drei Stationen – Innerer Grüngürtel, Agrippabad und Nippes – erreicht. Lediglich fünf heiße Tage traten im Jahr 2012 an der Station Sürther Feld auf.

Während 2012 im Umland keine Tropennacht zu verzeichnen war, wurden bis zu neun Tropennächte in der Innenstadt registriert.

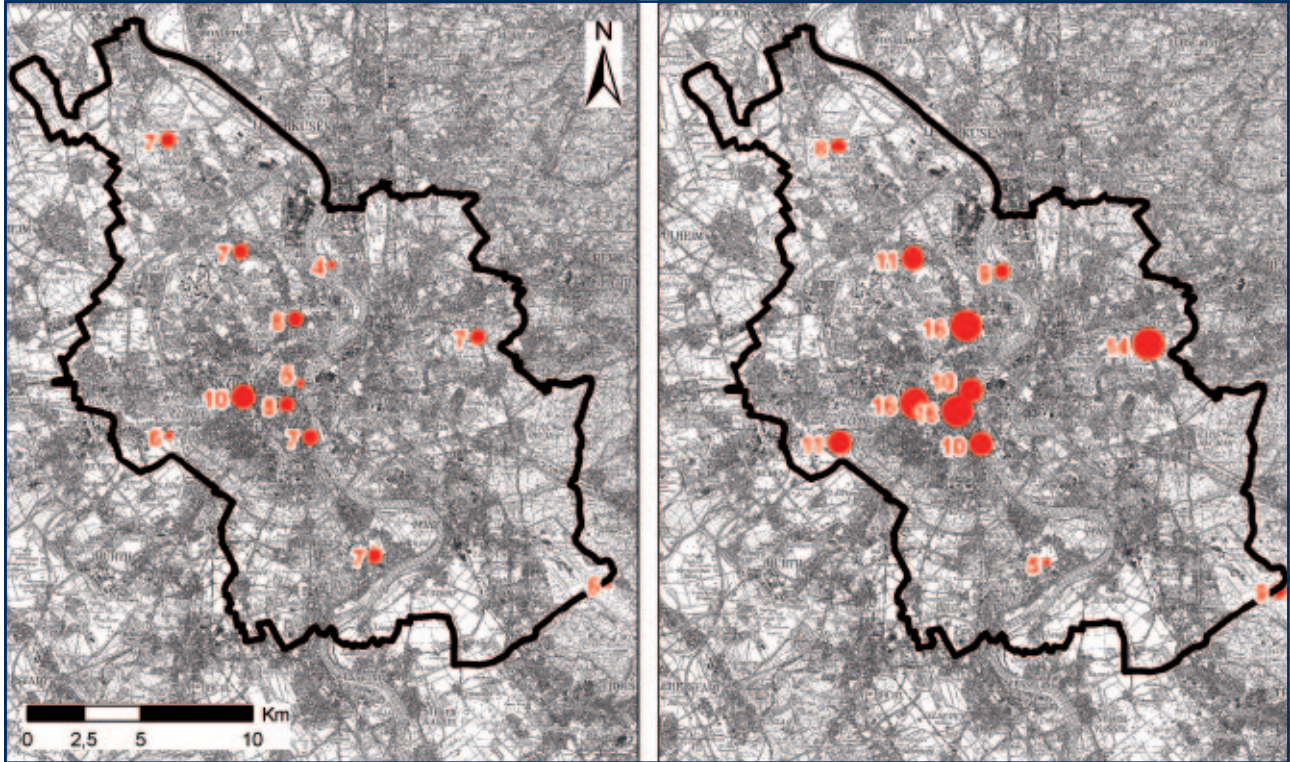


Abb. 4.3: Anzahl der heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Sommertage (viele: große Flächen, wenige: kleine Flächen). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

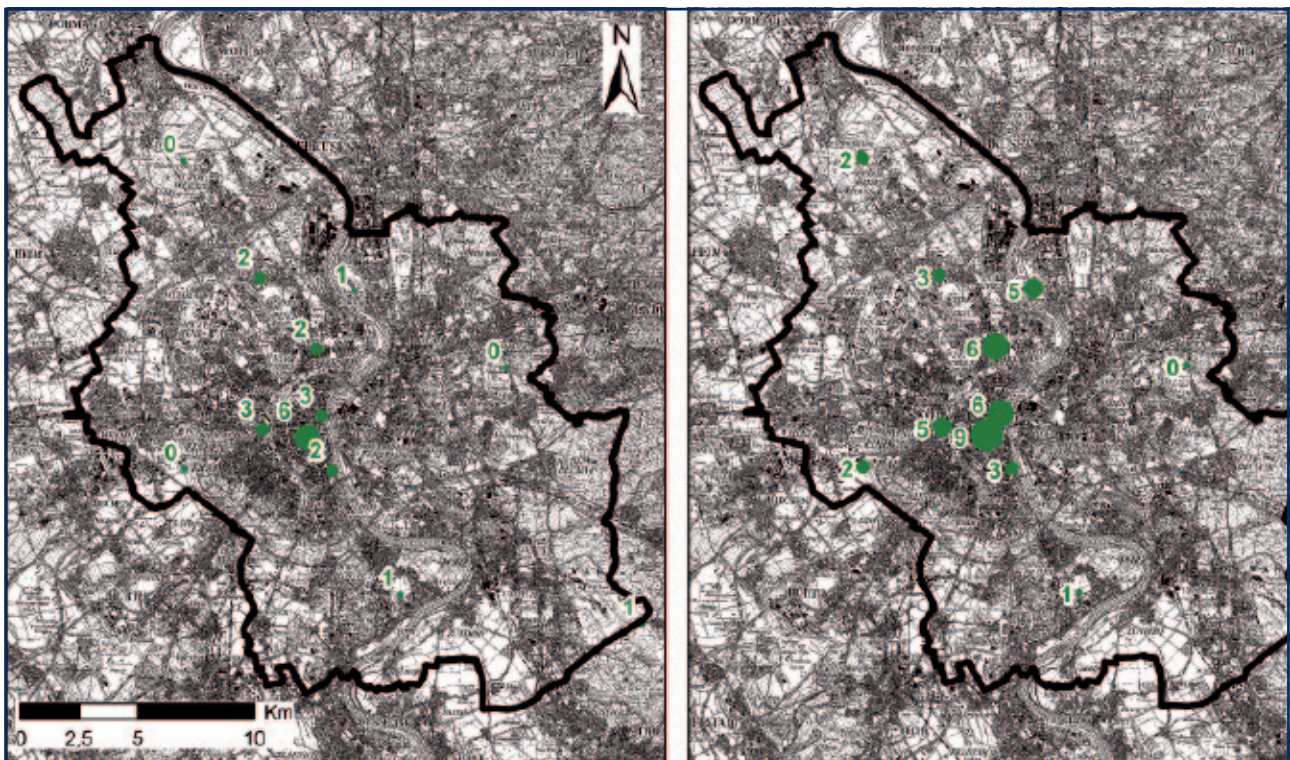


Abb. 4.4: Anzahl der Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$) in Köln für das Jahr 2011 (links) und 2012 (rechts); die Größe der Stationspunkte ist ein Maß für die Anzahl der Sommertage (viele: große Flächen, wenige: kleine Flächen). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Die Abbildungen 4.5 und 4.6 der Monatsmittelwerte an den Stationen Agrippabad (Innenstadt) und Dellbrück (Umland) zeigen, dass im Jahr 2012 der Jahresgang deutlich ausgeprägter ist als in 2011. Der Unterschied zwischen dem wärmsten und dem kältesten Monat beträgt 2012 in Dellbrück 19 K, am Agrippabad sind es sogar fast 20 K. 2011 lag diese Differenz am Agrippabad

nur bei 15,5 K, in Dellbrück sogar bei etwa 15 K. Besonders auffällig im Jahr 2012 ist der große Sprung vom relativ kalten Februar zum März, der der wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen am Flughafen war. Der April 2012 ist dann nur wenig wärmer als der März ausgefallen.

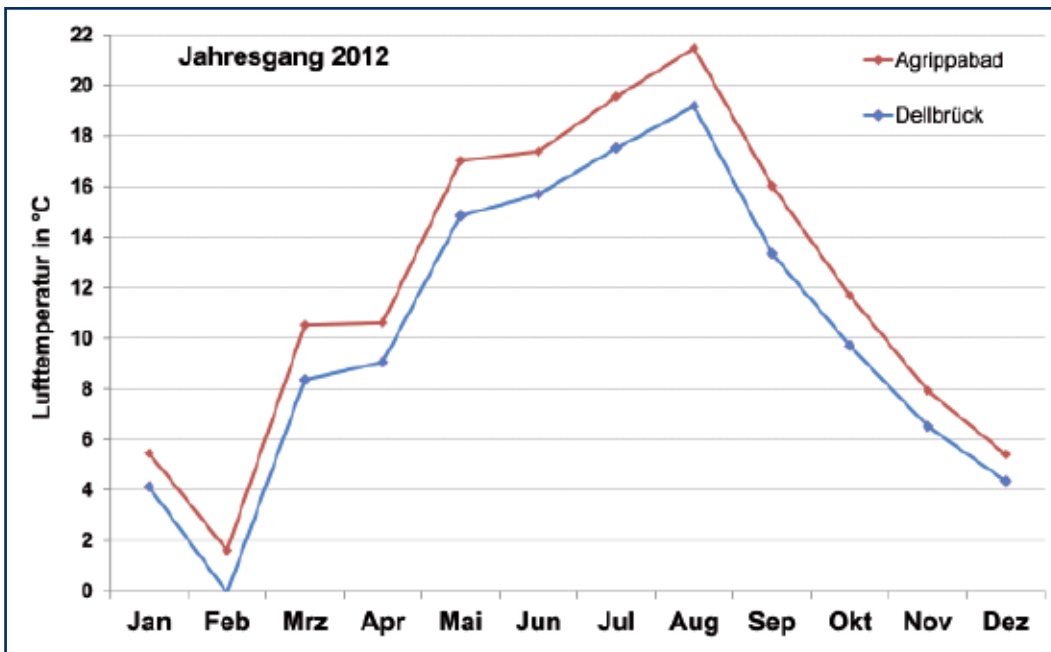


Abb. 4.5: Jahresgang der Lufttemperaturen an den Stationen Agrippabad (rote Linie) und Dellbrück (blaue Linie) für 2012.

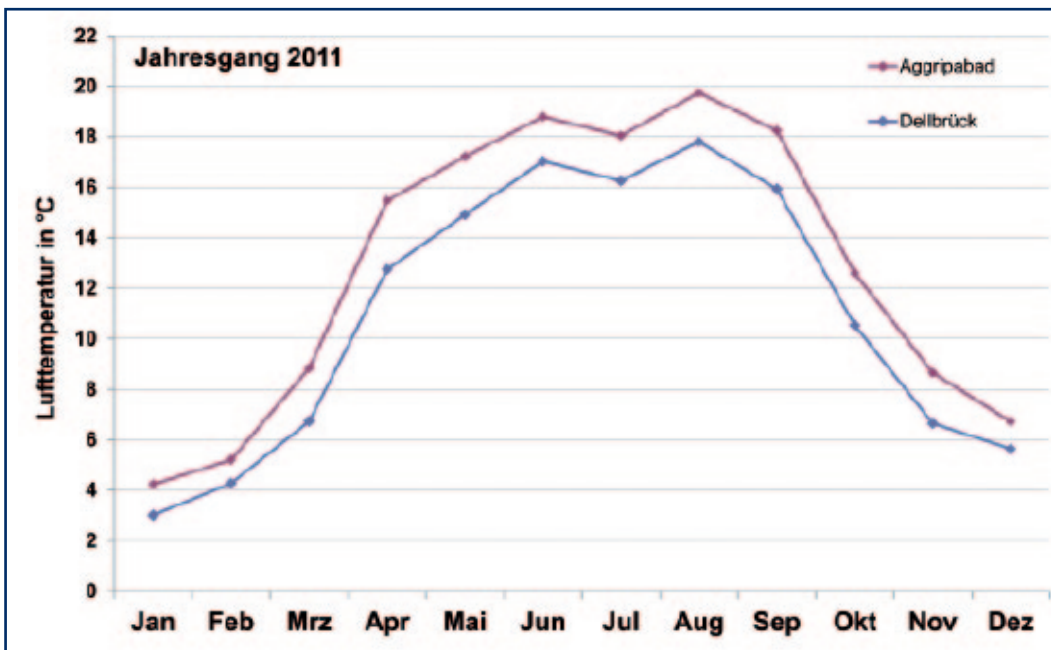


Abb. 4.6: Jahresgang der Lufttemperaturen an den Stationen Agrippabad (rote Linie) und Dellbrück (blaue Linie) für 2011.

Ganz anders gestaltete sich der April 2011. Dieser Monat war der zweitwärmste April (nach 2007) seit Aufzeichnungsbeginn. Hier sind die größten Differenzen bei den Monatsmittelwerten im Stadtgebiet innerhalb der betrachteten zwei Jahre aufgetreten.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das Jahr 2011 im Mittel wärmer war als 2012. Das Jahr 2011 weist den höchsten Jahresmittelwert der Lufttemperatur seit Beginn der DWD-Aufzeichnungen am Flughafen Köln-Bonn im September 1957 auf. Ebenfalls liegt die Anzahl der Sommertage 2011 höher als im Jahr 2012. Im Gegensatz dazu wurden 2012 mehr heiße Tage sowie Tropennächte registriert als im Vorjahr. Das Jahr 2011 war durch ausgeglichene, mildere Temperaturverhältnisse und 2012 durch größere Temperaturschwankungen gekennzeichnet.

Der Mittelwert des Sommers 2013 lag mit knapp 18,4 °C an der Flughafenstation (hier nicht gezeigt) an vierter Stelle der wärmsten Sommer seit dem Jahr 2000. Somit passen die im Projekt gemessenen Temperaturen gut in das Bild eines sich fortsetzenden Temperaturanstiegs infolge des Klimawandels.

Die Messungen zeigen zudem, dass der Temperaturunterschied zwischen Innenstadt und Umland in Köln – bezogen auf den Jahresmittelwert der Lufttemperatur – etwa 2 K beträgt (mittlerer Wärmeinseleffekt). Der maximale Wärmeinseleffekt – Temperaturunterschied am Ende eines heißen Sommertages – liegt in Köln mit mehr als 10 K deutlich höher (Kap. 4.1.3).

Des Weiteren lässt sich eindeutig erkennen, dass sowohl die höheren mittleren Temperaturen als auch die Anzahl der Temperaturkentage von den dicht bebauten, versiegelten Innenstadtbereichen hin zu den Freiflächen sowie land- beziehungsweise forstwirtschaftlich genutzten Flächen im Umland abnehmen.

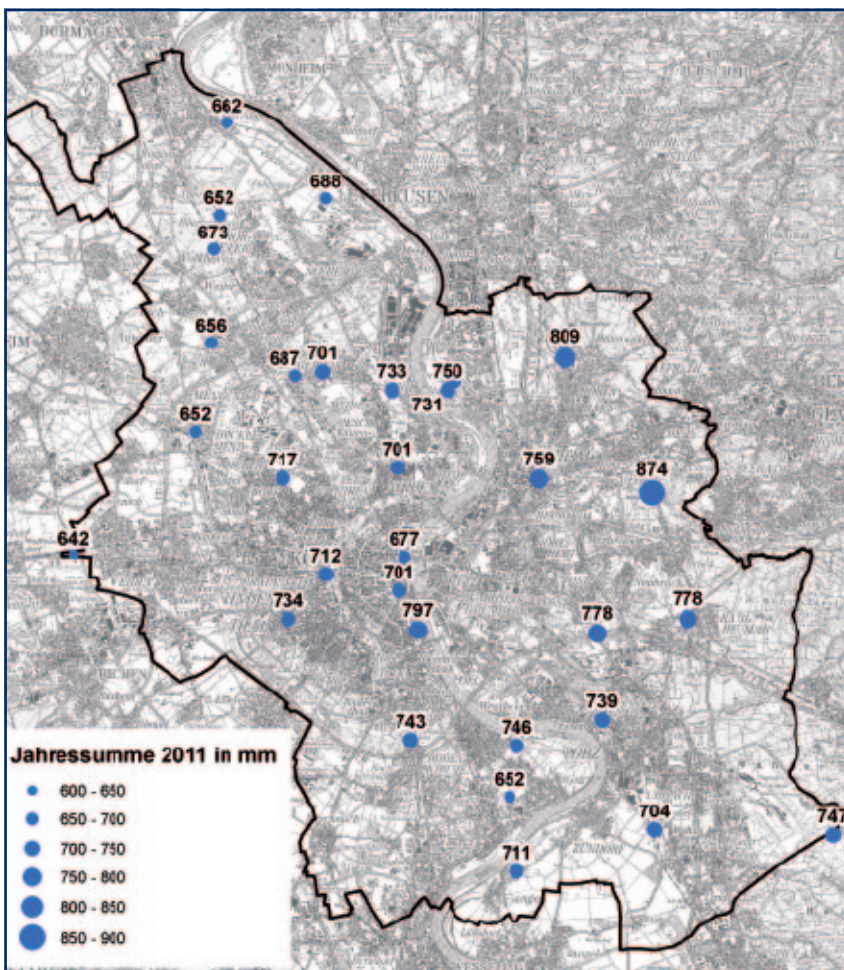


Abb. 4.7: Jahressumme des Niederschlags an den verschiedenen Stationen für 2011, Angaben in mm (entspricht Liter pro Quadratmeter). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

4.1.2 Niederschlag

Die Abbildungen 4.7 und 4.8 zeigen die Jahressumme des Niederschlags an den jeweiligen Messstationen in den Jahren 2011 und 2012. In beiden Jahren wird das schon im Makroklima beschriebene orographisch bedingte Ansteigen der Regenhöhen von West nach Ost deutlich. Neben dieser großräumigen Verteilung gibt es im Detail im Untersuchungszeitraum einige bemerkenswerte Unterschiede auf dem Stadtgebiet.

So fällt auf, dass in beiden Jahren an der Station Sürther Feld im Vergleich zu den umliegenden Stationen relativ wenig Niederschlag gefallen ist; 2012 ist an dieser Messstelle sogar die niedrigste Summe aller Stationen aufgetreten (649 mm). Ob und inwiefern hier eine verstärkte Leewirkung eintritt, kann allerdings auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht beurteilt werden. Eine weitere Station, die große Unterschiede im Vergleich zu den Nachbarstandorten aufweist, ist die Fachhochschule am südlichen Rand der Innenstadt. Hier liegen die Jahressummen mit jeweils rund 800 mm deutlich höher als an den anderen Innenstadtstationen.

Die höchste Niederschlagsmenge ist in beiden Jahren mit jeweils knapp 880 mm in Dellbrück aufgetreten. Diese Station liegt am nächsten zu den Südbergischen Hochflächen, die schon an ihrem westlichen Rand mittlere Jahressummen des Niederschlags von zum Teil über 1100 mm aufweisen.

Insgesamt ist das Jahr 2012 das niederschlagsreichere gewesen, wobei die Differenzen der Jahresmengen zwischen 2011 und 2012 an den einzelnen Stationen sehr verschieden ausgefallen sind. Den größten Unterschied weist dabei die Messstelle Werthweg in Köln-Worringen auf. 2012 liegt hier die Niederschlagssumme um 125 mm höher als 2011. Dies ist besonders auf ein Starkregenereignis im Juli 2012 zurückzuführen, das vor allem auf das nordwestliche Stadtgebiet beschränkt blieb. Hierbei sind an der Station Werthweg in 90 Minuten gut 80 mm Regen gemessen worden.

Die Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen die Monatssummen für die Jahre 2011 und 2012 an den Stationen Museum Ludwig (Innenstadt) und Dellbrück (Umland). Hier fällt auf, dass 2011 in den ersten fünf relativ trockenen Monaten an beiden Standorten fast exakt die gleiche Niederschlagsmenge gemessen wurde, während in den Sommermonaten Juni, Juli und August in Dellbrück rund 150 mm Regen mehr als am Museum Ludwig gefallen ist.

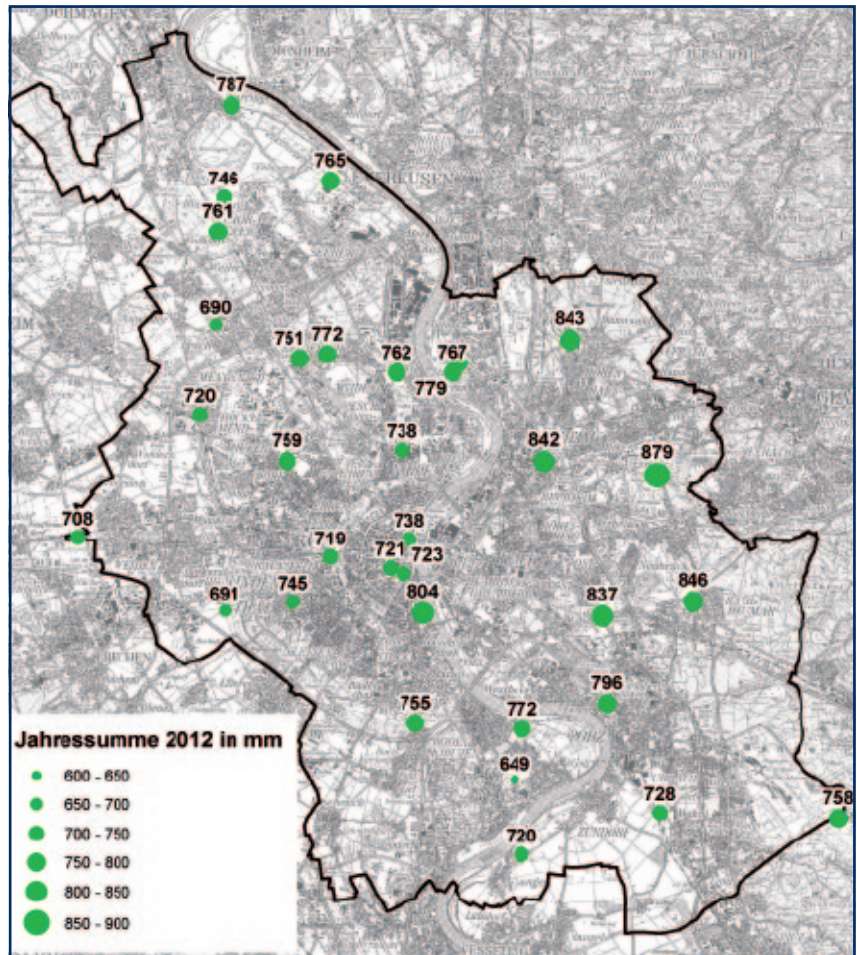


Abb. 4.8: Jahressumme des Niederschlags an den verschiedenen Stationen für 2012, Angaben in mm (entspricht Liter pro Quadratmeter). Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

So wurden in Dellbrück fast 50 Prozent der Jahresniederschlagsmenge 2011 im Sommer registriert, während es am Museum Ludwig nur gut 40 Prozent waren.

Ein ganz anderes Bild zeigt sich im Sommer 2012 mit dem relativ trockenen und warmen August. Hier ist in den drei Sommermonaten am Museum Ludwig rund ein Drittel der Jahressumme gefallen, in Dellbrück waren es sogar nur 30 Prozent. Abgesehen vom Sommer waren die Monate Januar, Oktober und Dezember 2012 am niederschlagsreichsten. In diesen drei Monaten sind an beiden betrachteten Stationen knapp 40 Prozent des Jahresniederschlags aufgetreten, wobei absolut gesehen in Dellbrück in diesem Zeitraum über 70 mm mehr als am Museum Ludwig registriert wurden. Während 2011 der regenreichste Monat an beiden Stationen in den Sommer fällt, ist 2012 der Dezember der Monat mit den höchsten Niederschlagsmengen, allerdings liegen diese nur geringfügig höher als im Juni 2012.

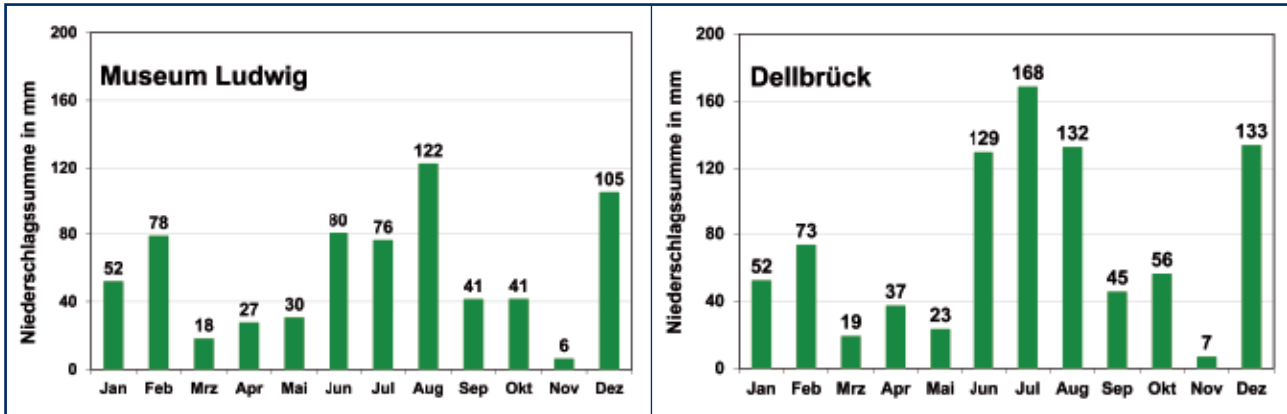


Abb. 4.9: Monatssumme des Niederschlags für das Jahr 2011 an einem innerstädtischen Standort (Museum Ludwig, links) und einem Standort im Umland (Dellbrück, rechts).

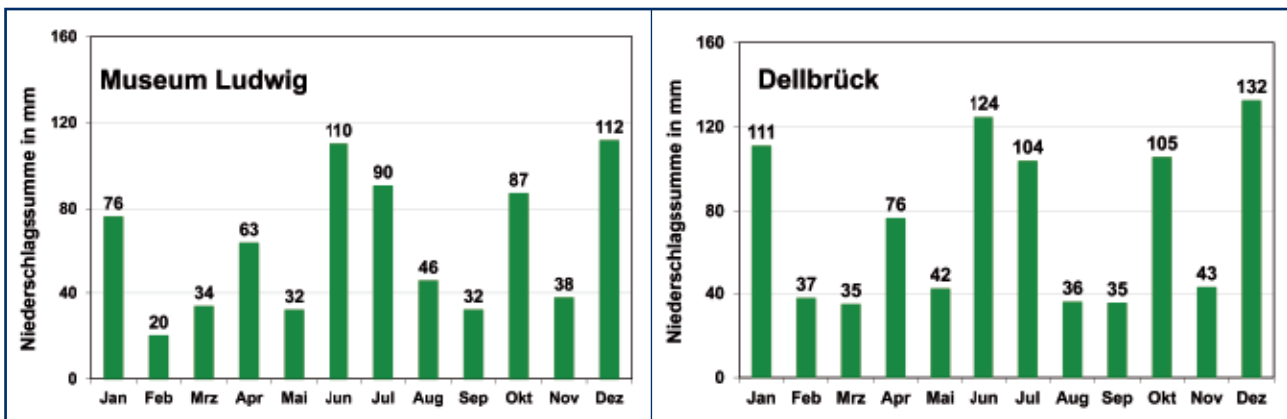


Abb.4.10: Monatssumme des Niederschlags für das Jahr 2012 an einem innerstädtischen Standort (Museum Ludwig, links) und einem Standort im Umland (Dellbrück, rechts).

Im Jahr 2011 waren das Frühjahr (März, April, Mai) und der Herbst (September, Oktober, November) relativ niederschlagsarm. In diesen sechs Monaten sind an beiden Stationen weniger als ein Viertel des Jahresniederschlags gefallen. Vor allem diese trockenen Jahreszeiten haben am Museum Ludwig für die deutlich niedrigere Jahressumme im Vergleich zu 2012 gesorgt. In Dellbrück konnte der sehr feuchte Sommer 2011 dieses Defizit ausgleichen.

An der Messstelle Dellbrück ist im Projektzeitraum auch die höchste Anzahl an Tagen mit Niederschlag größer als 10 mm und größer als 20 mm von fast allen untersuchten Stationen registriert worden (folgende Abb. 4.11 und 4.12). 2012 wurde Dellbrück bei der Anzahl der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag lediglich vom Flughafen Köln-Bonn um einen Tag übertroffen.

Obwohl das Jahr 2012 in der Gesamtschau das niederschlagsreichere war, sind an fast allen der betrachteten

Stationen 2011 mehr Tage mit Niederschlag größer als 10 und größer als 20 mm aufgetreten. Dies steht vor allem mit dem eher feuchten und kühlen Sommer und dem sehr milden, aber niederschlagsreichen Dezember des Jahres 2011 im Zusammenhang. 2011 wurden 20 oder mehr Tage mit Niederschlag größer als 10 mm an den Stationen Dellbrück, Stammheim, Fachhochschule und Sürther Feld registriert. 2012 war dies lediglich an den Stationen Dellbrück und Longerich der Fall. Letztgenannte Station und Stüttgenhof sind die einzigen beiden Stationen, an denen 2012 mehr Tage mit Niederschlag größer als 10 mm erzielt worden sind als 2011. Im Schnitt wurden 2011 an zwei bis drei Tagen mehr entsprechende Mengen erzielt. Auch die Tage mit Niederschlag größer als 20 mm waren 2012 an den allermeisten Messstellen (bis auf Kreuzfeld) seltener. Besonders groß war der Unterschied an den Stationen Innerer Grüngürtel und Stammheim: Während hier 2011 vier Tage mit Niederschlag größer als 20 mm aufgetreten sind, war es an diesen beiden Stationen 2012 kein einziger.

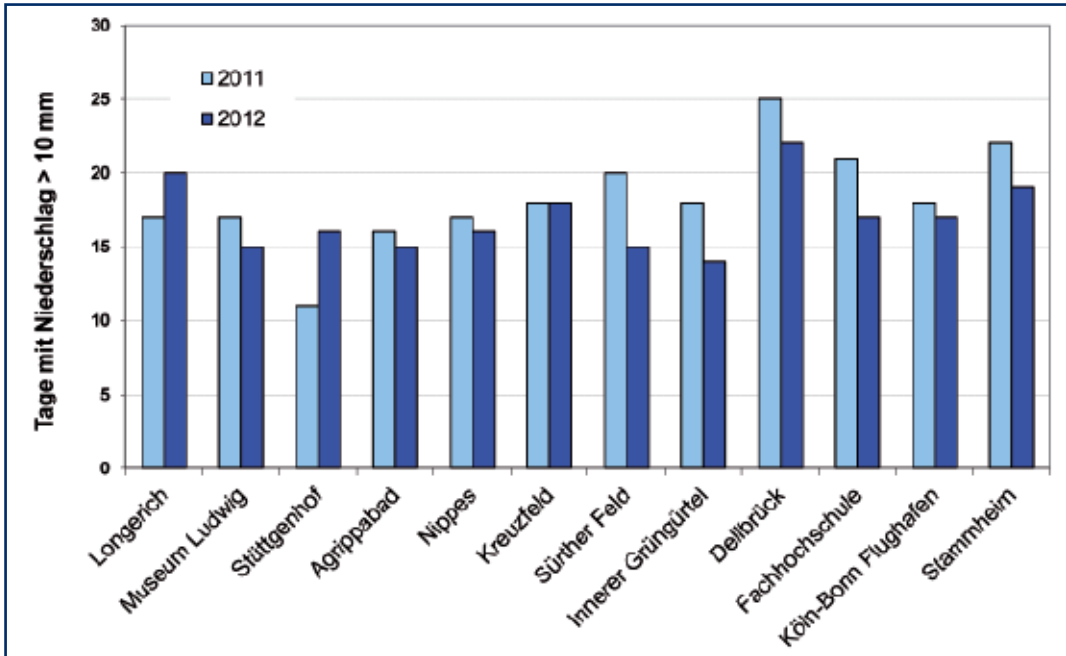


Abb. 4.11: Anzahl der Tage mit Niederschlag > 10 mm für das Jahr 2011 und 2012.

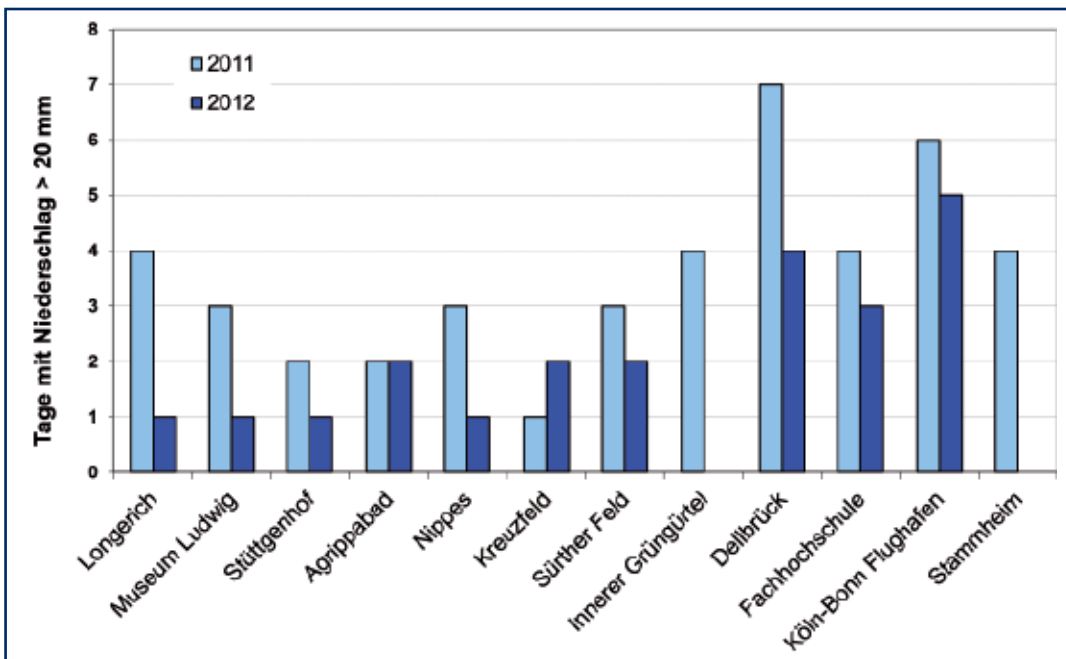


Abb. 4.12: Anzahl der Tage mit Niederschlag > 20 mm für das Jahr 2011 und 2012.

Betrachtet man die Station Flughafen Köln-Bonn mit dem jahrzehntelangen Vergleichszeitraum liegen beide Jahre 2011 und 2012 unter dem vieljährigen Jahresmittel 1981 bis 2010 (839 mm). Da die Gesamtniederschlagsmenge von Jahr zu Jahr und auch die der Einzelmonate großen Schwankungen unterworfen ist, lässt sich aus den zwei betrachteten Jahren kein Trend zu nieder-

schlagsärmeren Verhältnissen ausmachen. Auffällig sind jedoch die beiden trockenen Frühjahre (besonders 2011). Die Tendenz zu trockenen und wärmeren Frühjahren zeigt sich damit auch im Rahmen dieses Projektes. Sehr feucht war hingegen der Sommer 2011. Am Flughafen Köln-Bonn sind in diesen drei Monaten rund 43 Prozent der Gesamtniederschlagsmenge gefallen, im Vergleichs-

zeitraum 1981 bis 2010 entfallen nur etwa 30 Prozent des mittleren Jahresmittels auf die Sommermonate. An allen Projektstationen wurde im Sommer 2011 zwischen 40 und 50 Prozent der Jahressumme registriert, während die Niederschlagsmenge im Sommer 2012 in etwa dem Klimamittel entspricht.

4.1.3 Die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel in Köln

Der städtische Wärmeiseleffekt, das heißt der Temperaturunterschied zwischen der (überwärmten) Innenstadt und dem (kühleren) Umland ist eine lange bekannte Auswirkung und ein Maß für den Stadtklima-Einfluss. Die größten Temperaturgegensätze zwischen Stadt und Umland sind bei austauscharmen Wetterlagen zu erwarten, die durch wolkenarme und windschwache Bedingungen geprägt sind. Hohe Einstrahlung am Tag und stark negative nächtliche Strahlungsbilanzen bei geringen Luftbewegungen garantieren am ehesten die Ausbildung der städtischen Wärmeinseln (engl. Urban Heat Islands, kurz UHI). Bei entsprechenden Wetterlagen ist die maximale Wärmeinselintensität (UHI max) in den Monaten März bis Oktober nach Sonnenuntergang beziehungsweise im Laufe der Nacht zu erwarten (Kuttler 2010).

Als einfach zu ermittelnde Einflussgröße zur Abschätzung von UHI max wird vielfach die städtische Einwohnerzahl herangezogen. Der Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und maximaler Wärmeinselintensität war und ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Empirische Studien finden je nach Region verschiedene logarithmische Beziehungen zwischen UHI max und der städtischen Bevölkerungsanzahl. Für Mitteleuropa gilt nach Oke (1973):

$$UHI_{\max} = 2,01 \log(E) - 4,06$$

UHI_{\max} : maximale Wärmeinselintensität einer Stadt in K
E: Einwohnerzahl der Stadt

Demnach liegt für eine Millionenstadt wie Köln unter den oben genannten (Wetter-)Bedingungen der Wert von UHI max bei 8 K. Nach Kuttler (2011) weisen in Nordrhein-Westfalen gerade die Ballungsgebiete an Rhein und Ruhr das Potenzial für besonders hohe Werte der maximalen Wärmeinselintensitäten auf. Nach seiner Abschätzung kann in diesen Bereichen bei geeigneten Wetterlagen die Intensität der UHI maximalen Temperaturdifferenzen von bis zu 9 K entsprechen (Kuttler 2011).

Bei den in Kapitel 4.2 beschriebenen Ergebnissen der Profildfahrten im Stadtgebiet von Köln lagen die größten Temperaturunterschiede zwischen Innenstadt und Peripherie bei gut 7 K, ein Wert, der nach Oke etwas unter dem zu erwartenden Maximalwert liegt. Zu einer deutlich markanteren Ausprägung der städtischen Wärmeinsel in Köln, ist es während einer Strahlungswetterlage Ende Mai 2012 gekommen, die anhand der Stationsmessungen identifiziert werden konnte. Abbildung 4.13 zeigt die analysierte Bodenwetterkarte vom 25.05.2012 (00 UTC). Weite Teile Deutschlands lagen zu diesem Zeitpunkt im Einflussbereich eines Hochdruckgebietes mit Zentrum über Südschweden. Damit gelangte mit einer östlichen Strömung trockene Festlandsluft nach Nordrhein-Westfalen. Wolkenarme Verhältnisse waren die Folge mit entsprechend guten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen.

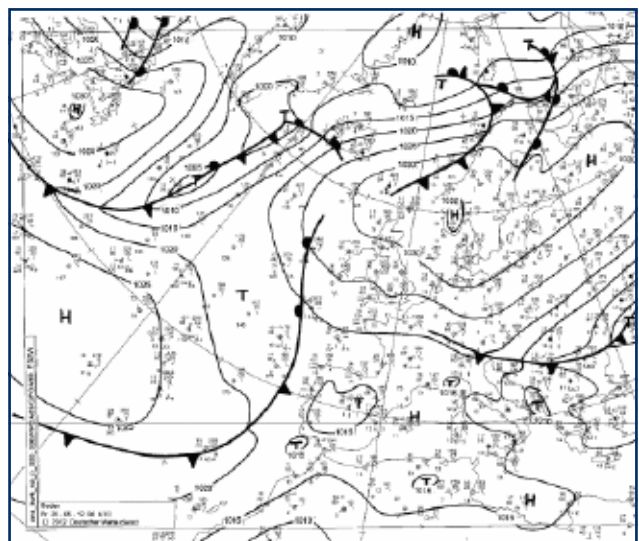


Abb. 4.13: DWD-Wetterkarte (Bodenanalyse) vom 25.05.2012, 00 UTC.

Abbildung 4.14 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur an den Stationen Agrippabad in der Innenstadt und Dellbrück am östlichen Stadtrand von Köln zwischen dem 24.05. und 30.05.2012. Bis zum 29. Mai sind an beiden Stationen Sommertage erzielt worden, am Agrippabad am 24. Mai ein heißer Tag. Auffällig ist der starke Temperaturrückgang an der Station Dellbrück in den Abendstunden. Dabei ist zum Teil eine Abnahme von rund 10 K in gut drei Stunden zu verzeichnen, während im gleichen Zeitraum die Temperatur am Agrippabad nur um etwas mehr als 4 K zurückgegangen ist.

Die grüne Linie in Abbildung 4.14 stellt den Verlauf der Lufttemperaturunterschiede zwischen Agrippabad und Dellbrück in dem entsprechenden Zeitraum dar. Der maximale Unterschied zwischen den beiden Stationen liegt

hier in der Nacht zum 25.05.2012 bei einem Wert von 10,5 K. Ähnliche Größenordnungen von rund 10 K werden in den beiden Folgenächten erreicht und auch am späten Abend des 27.05.2012 ist noch eine Differenz zwischen den beiden Stationen von 9,5 K zu verzeichnen.

Mit der Auswertung der Daten des temporären Messnetzes, das im Rahmen dieses Projektes installiert wurde, wird belegt, dass die **maximale Wärmeinselintensität** in einer Millionenstadt wie Köln über 10 K betragen kann. Die Ergebnisse von vorherigen empirischen Untersuchungen, die für eine Millionenstadt in Mitteleuropa von 8 bis 9 K ausgegangen sind, konnten damit modifiziert werden.

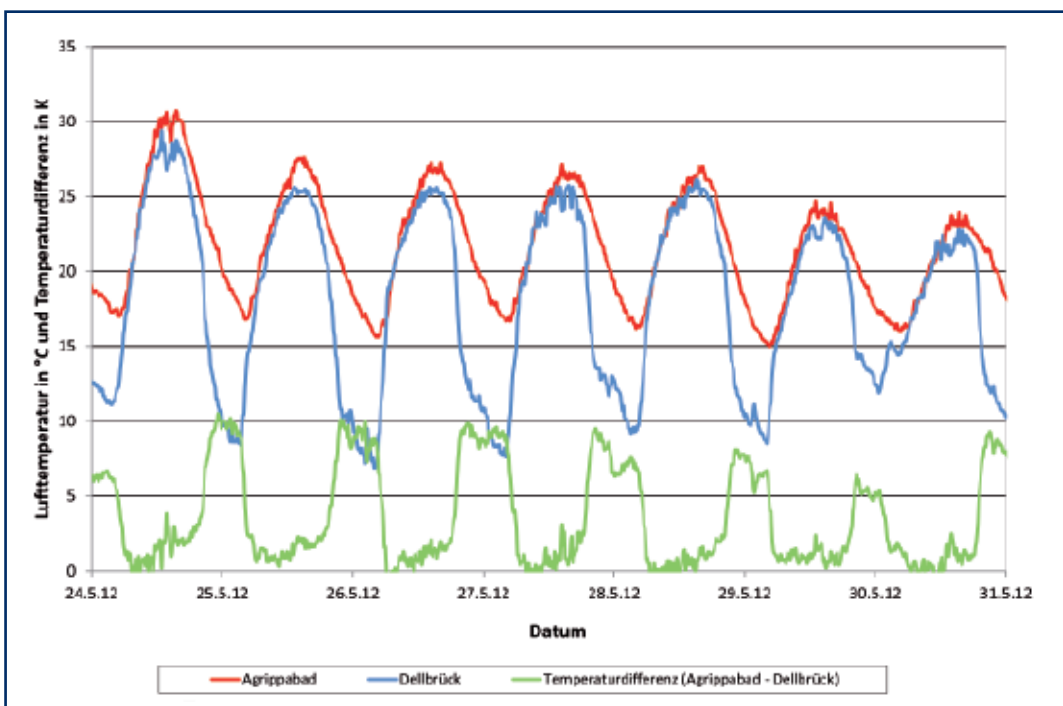


Abb. 4.14: Temperaturverlauf an den Stationen Agrippabad (rote Linie) und Dellbrück (blaue Linie) mit den entsprechenden Differenzen der Lufttemperatur zwischen den beiden Stationen (grüne Linie) Ende Mai 2012.

4.2 Profilmfahrten

Mit (stationären) Messstationen in einer Stadt werden meteorologische Messungen durchgeführt, die für den Standort selbst und für ein Umfeld von wenigen Metern bis Dekametern repräsentativ sind. Temperaturmessfahrten auf verschiedenen Routen ergeben ein detailliertes, räumlich hoch aufgelöstes Bild der Temperaturverhältnisse in Köln (Kap. 3.2). Die Messungen erfolgten während ausgewählter austauscharmer Strahlungswetterlagen.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Messfahrten zu verbessern, werden neben einigen Darstellungen mit absoluten Temperaturen auch die Abweichungen von der mittleren Temperatur der jeweiligen Messfahrt gezeigt.

In Abbildung 4.15 sind die Temperaturprofile zweier sommerlicher Messfahrten (links- und rechtsrheinische Route) am Ende einer Strahlungsnacht dargestellt. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass die größten Temperaturunterschiede zwischen Innenstadt und Peripherie etwa 6 bis 7 K betragen. Die (relativ) kühleren Flächen auf der linksrheinischen Seite sind dabei im Nordwesten der Stadt im Bereich der Freiflächen zwischen den Stadtteilen Auweiler und Mengenich zu finden (Abb. 4.15 links). Auch im Bereich des Äußeren Grüngürtels – südlich der Stadtteile Sülz und Klettenberg (fast am südlichsten Punkt der linksrheinischen Strecke) – sind kühlere

Flächen anzutreffen, die Temperaturunterschiede zur Innenstadt betragen rund 5 K. Noch eindrucksvollere Temperaturunterschiede sind auf der rechtsrheinischen Profilmfahrt vorzufinden (Abb. 4.15 rechts). Die Differenz zwischen der Innenstadt und dem Bereich der größten negativen Abweichungen im Süden des Stadtgebietes (hauptsächlich landwirtschaftlich genutzte Flächen zwischen Köln-Porz-Wahn und Köln-Porz-Zündorf) beträgt zum Teil sogar etwas mehr als 7 K.

Besonders interessant sind auch die Unterschiede zwischen benachbarten Flächen beziehungsweise innerhalb eines Stadtteiles. So sind außerhalb der dichter bebauten Flächen von Köln-Dellbrück relativ hohe negative Temperaturdifferenzen zu finden, während inmitten des Stadtteils in etwa der Mittelwert dieser Profilmahrt getroffen wird. Ein ähnliches Bild zeigt sich weiter südlich bei den Stadtteilen Brück und Rath/Heumar. Besonders markant fällt auch der Unterschied zwischen der Mitte Porz-Wahns und den schon erwähnten Freiflächen etwas weiter westlich aus. Hier beträgt die Differenz der Temperatur auf einer Distanz von nur rund 2 km etwa 5 K.

In Abbildung 4.16 und 4.17 sind die Abendfahrten auf der innerstädtischen Messroute im Sommer nach Sonnenuntergang gezeigt.

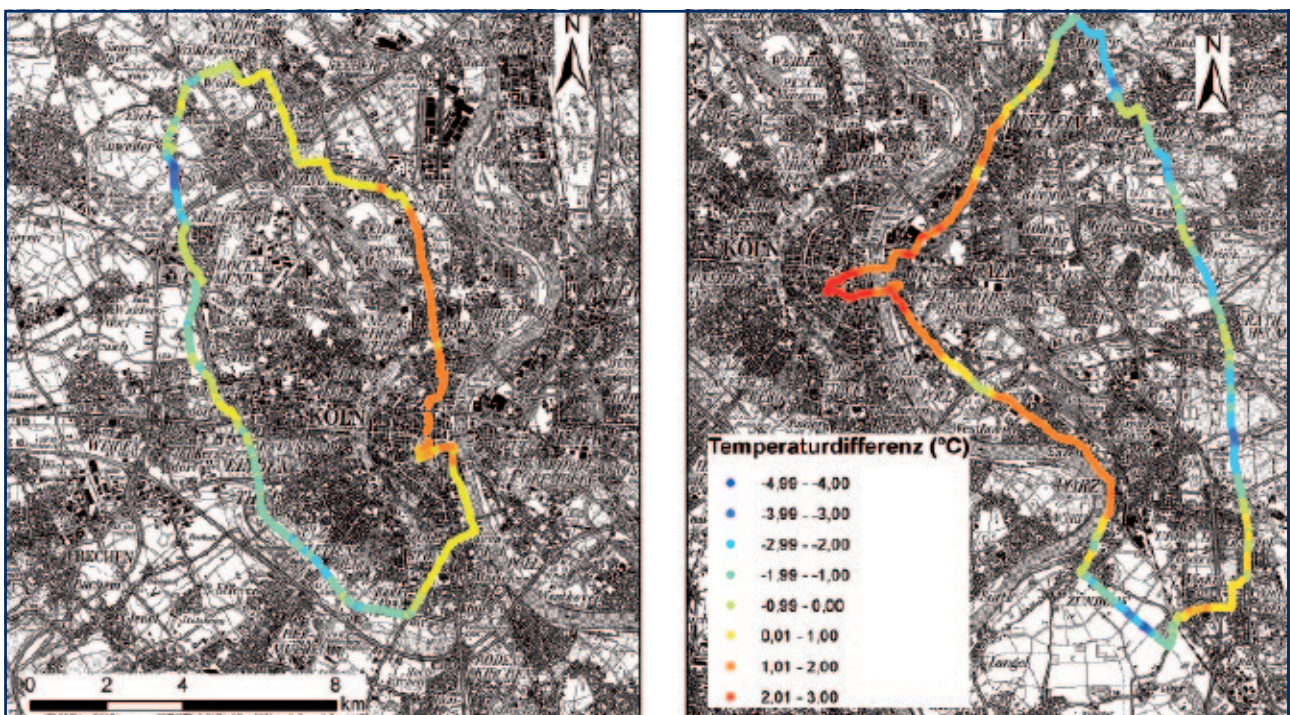


Abb. 4.15: Linksrheinische Messroute am 02.07.2010 (links) und rechtsrheinische Messroute am 21.07.2010 (rechts), jeweils mit Abweichungen vom Mittelwert der Lufttemperatur. Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung: Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.



Abb. 4.16: Innerstädtische Messroute am 24.07.2012, 19.30-20.10 UTC (links) und 22.00-22.40 UTC (rechts), jeweils mit Abweichungen vom Mittelwert der Lufttemperatur. Kartengrundlage: DTK50, Geobasisdaten der Landesvermessung: Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Auf der linken Seite in Abbildung 4.16 ist das Temperaturprofil der Messfahrt unmittelbar nach Sonnenuntergang (an diesem Tag um 19.30 UTC, das entspricht 21.30 MESZ) zu sehen. Die Areale mit den größten negativen Abweichungen der Lufttemperatur vom Mittelwert sind zum einen am Volksgarten und zum anderen im Inneren Grüngürtel südlich des Aachener Weihers zu finden, also im Bereich von größeren Grünanlagen. Die Temperaturunterschiede zu den wärmsten Bereichen der Innenstadt liegen kurz nach Sonnenuntergang bei 3 bis 4 K. Noch deutlicher treten diese Unterschiede bei der späteren Messfahrt hervor (ab 22.00 UTC, das entspricht 00.00 MESZ). Zu diesem Zeitpunkt liegen die Temperaturdifferenzen zwischen den kältesten und wärmsten Zonen der Profifahrt sogar bei 4 bis 4,5 K (Abb. 4.16 rechts). Während im Bereich der Grünanlagen nach Sonnenuntergang eine recht starke Abkühlung erfolgt, tritt in anderen, dicht bebauten Teilen der Innenstadt die Abkühlung wesentlich langsamer ein.

Diesen Effekt belegt auch recht eindrucksvoll die Abbildung 4.17 mit den absoluten Werten der Lufttemperatur bei den innerstädtischen Profifahrten. Kurz nach Sonnenuntergang zeigt das gesamte Profil noch Temperaturen von über 25 °C; recht verbreitet sind sogar Werte von über 28 °C vorzufinden (Abb. 4.17 links). Während nun Teile der dicht bebauten Innenstadt auch noch nach Mitternacht (MESZ) Temperaturen von über 25 °C aufweisen, sind einige Bereiche rund um den Volksgarten und den Inneren Grüngürtel mit 21 bis 22 °C bereits vergleichsweise kühl (Abb. 4.17 rechts). Schaut man sich die Abkühlungsrate zwischen den beiden Uhrzeiten an, wird deutlich, dass auf einigen Flächen der dicht bebauten Innenstadt die Lufttemperatur nur um zwei bis drei Grad zurückgegangen ist, während im gleichen Zeitraum in einigen Bereichen rund um die Grünanlagen die Werte um bis zu fünf Grad abgesunken sind.

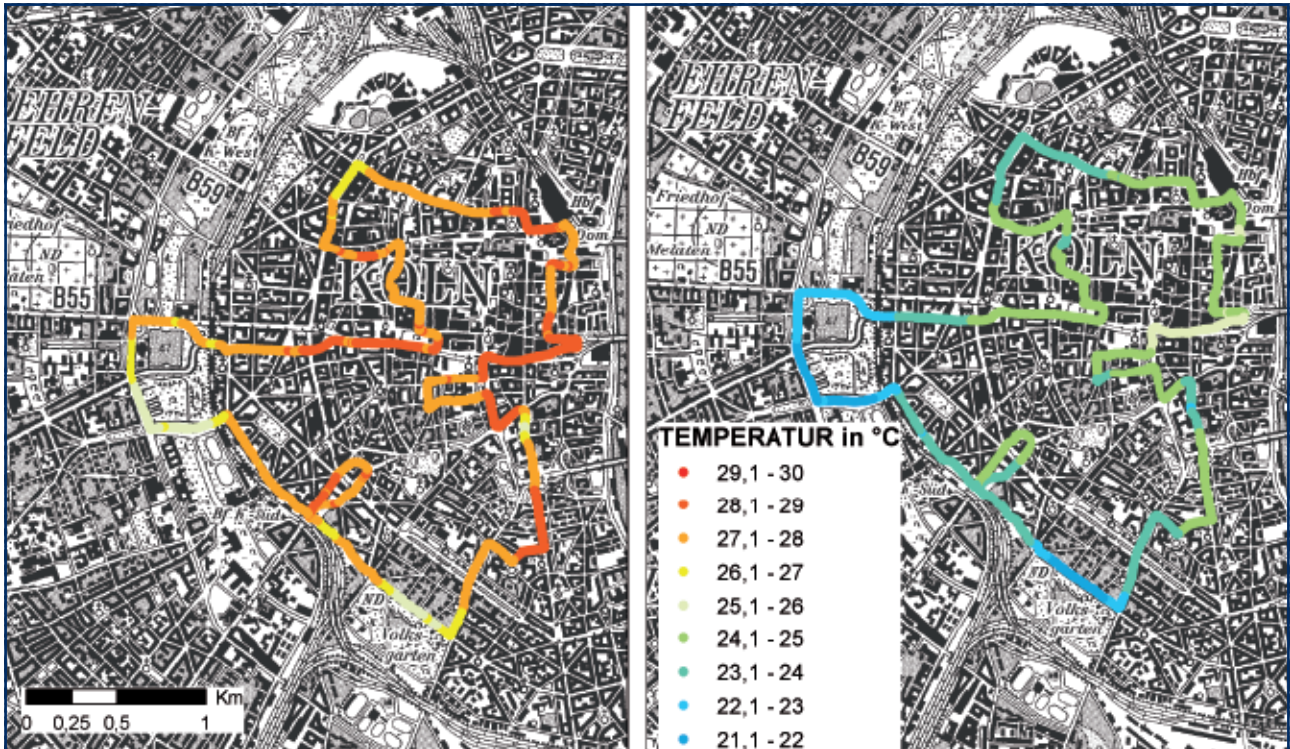


Abb. 4.17: Innerstädtische Messroute am 24.07.2012, 19.30-20.10 UTC (links) und 22.00-22.40 UTC (rechts), jeweils mit absoluten Werten der Lufttemperatur. Kartengrundlage: DTK50, Geobasisdaten der Landesvermessung: Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Auffällig sind auch zum Teil deutliche Unterschiede des Temperaturprofils in benachbarten Gebieten innerhalb der Innenstadt. So sind am nördlichen Ende der innerstädtischen Messroute im Bereich des Kaiser-Wilhelm-Rings negative Abweichungen vom Mittelwert vorzufinden (Abb. 4.16), was sicherlich auf das relativ begrünte Umfeld mit Baumbestand in diesem Teil des Ringes zurückzuführen ist. Weiter nach Osten entlang der Route rund um die Kirche St. Gereon, wo zum Teil noch aufgelockerte Bebauung und Grünflächen anzutreffen sind, liegen die Temperaturen im Bereich des Mittelwertes. Noch weiter östlich in Richtung Dom/Hauptbahnhof, wo die Bebauung immer dichter und zum Teil auch höher wird, nehmen die Temperaturen und ihre positiven Abweichungen weiter zu. Die absolut höchsten Lufttemperaturen auf der Messroute sind flächenmäßig betrachtet etwa zwischen Heumarkt und Neumarkt vorzufinden, was besonders nach Mitternacht (MESZ) deutlich wird (Abb. 4.17 rechts). Dort geht die Abkühlung im Rahmen der gezeigten Innenstadt-Profilfahrten am langsamsten vorstatten.

Zum Abschluss der Ergebnisdarstellung der Profilmessungen wird die schon in Abbildung 4.15 gezeigte rechtsrheinische Messroute am Ende einer sommerlichen Strahlungsnacht mit einer spätwinterlichen Strahlungswetterlage kurz vor Sonnenaufgang verglichen (Abb. 4.18). Dabei wird erkennbar, dass die Temperaturunterschiede entlang der Messroute bei beiden Profilmessungen ein ähnliches Muster aufweisen. In beiden Jahreszeiten weisen der Innenstadtbereich positive und die Peripherie negative Abweichungen vom Mittelwert der Lufttemperatur auf. Die Temperaturunterschiede liegen in vergleichbaren Größenordnungen, wobei die Unterschiede in den Wintermonaten aufgrund der geringeren Strahlungsintensität und des niedrigeren Erwärmungspotenzials nicht ganz so groß ausfallen.

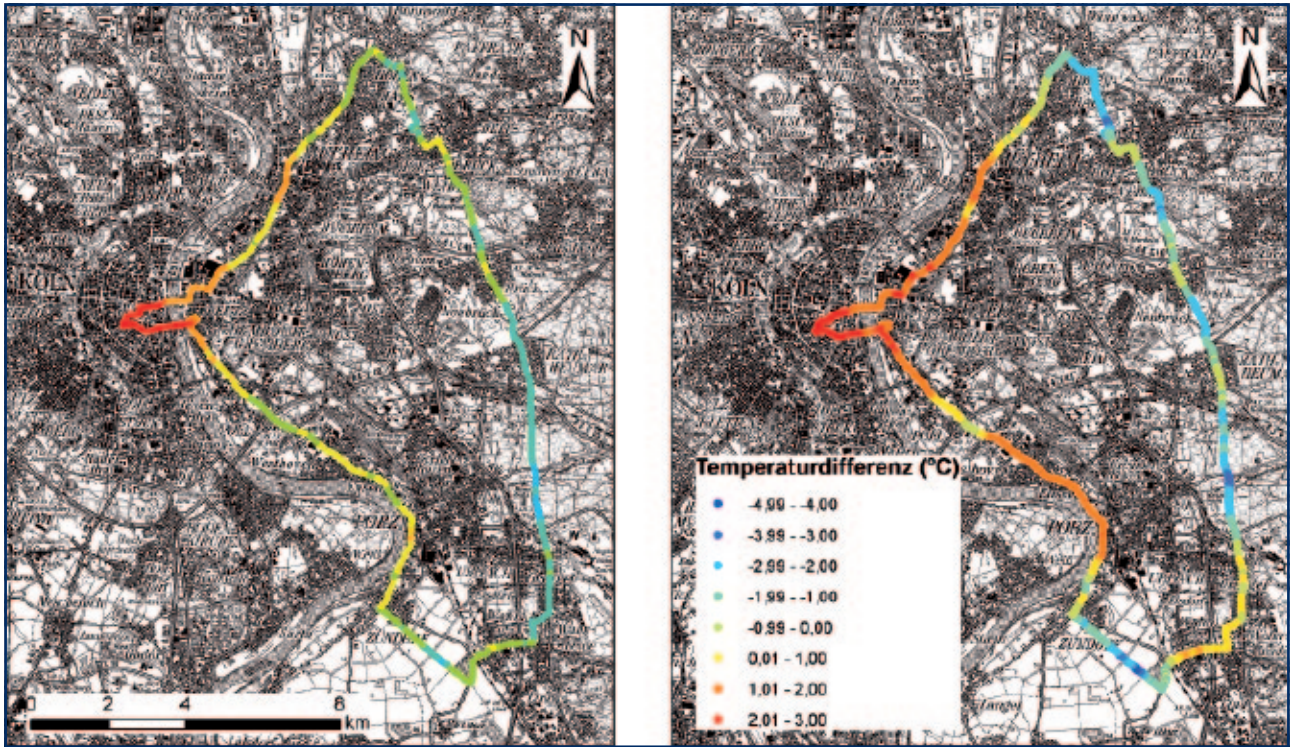


Abb. 4.18: Rechtsrheinische Messroute am 04.03.2011 (links) und am 21.07.2010 (rechts), jeweils mit Abweichungen vom Mittelwert der Lufttemperatur. Kartengrundlage: DTK100, Geobasisdaten der Landesvermessung; Bezirksregierung Köln Abteilung 7, GEObasis.nrw.

Zusammenfassend machen die Ergebnisse der mobilen Messungen deutlich, wie groß die klimatischen Unterschiede zwischen begrünten (Frei-)Flächen und dicht bebauten, versiegelten Bereichen innerhalb des Stadtgebietes von Köln sind und welche klimatische Bedeutung den Grünflächen zukommt. Die Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und Umland treten sowohl im Sommer als auch im Winter auf, jedoch sind sie in der warmen Jahreszeit aufgrund der hohen Strahlungsinten-

sität stärker ausgeprägt. Auch innerhalb des Innenstadtbereichs konnte im Rahmen der Profilmfahrten eine kühlende Wirkung und damit die zum Teil deutlich geringere Wärmebelastung, die in der Nähe von Grünflächen und Parkanlagen herrscht, herausgearbeitet werden. Zudem wurde aus den Profilen der innerstädtischen Messfahrten klar, wie gering die abendliche beziehungsweise nächtliche Abkühlungsrate in den am dichtesten bebauten Bereichen (im Vergleich zu begrünten Arealen) ausfällt.



4.3 Wärmebelastung und Hitzewarnung

Für ausgewählte Sommermonate im Messzeitraum wird neben den klimatologischen Kennzahlen Sommertage und heiße Tage auch die Wärmebelastung ausgerechnet, beschrieben durch die Gefühlte Temperatur (GT) und die Zahl der Hitzewarntage (Kap. 3.3). Die beiden letztgenannten Größen beruhen auf einem Wärmehaushaltsmodell des Menschen und ermöglichen somit eine gesundheitsrelevante Bewertung der thermischen Umwelt in der Stadt. Hitzewarntage sind Tage, an denen die Warnschwelle von etwa 32 °C GT für den aktuellen und nachfolgenden Tag überschritten wird und zugleich in der dazwischen liegenden Nacht keine ausreichende nächtliche Abkühlung stattgefunden hat. Diese Tage wurden basierend auf den Messungen retrospektiv bestimmt und müssen nicht mit den tatsächlich für den Landkreis Köln herausgegebenen Hitzewarnungen des DWD übereinstimmen.

Für die Auswertung wurden Monate ausgewählt, in denen häufig Sommertage beziehungsweise heiße Tage auftraten: Juli 2010, Juni 2011, August 2012 und Juli 2013¹. Diese Monate waren durch windschwache, austauscharme Wetterlagen dominiert.

Die in der Tabelle 4.1 angeführten Messstationen wurden in die Betrachtungen mit einbezogen. In eckigen Klammern ist jeweils die Entfernung zur City (stellvertretende Station Museum Ludwig) angegeben.

Für die Berechnung der Gefühlten Temperatur (GT) wurden außer der Lufttemperatur auch die Windstärke, die relative Feuchtigkeit und die Strahlungsflüsse berücksichtigt. Außerdem spielen der Bebauungsgrad und die Bodeneigenschaften in der Umgebung der Messstation eine Rolle. Die benötigten Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung wurden entweder direkt an der Station gemessen (Lufttemperatur, Luftfeuchte) oder es wurden Werte der umliegenden Stationen (Wind, Strahlung) verwendet.

Tabelle 4.1: Juli 2010: Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung (GT \geq 32 °C); Anzahl der Sommertage und heißen Tage sowie Zahl der Hitzewarntage; Namen der Messstationen sowie Entfernung von der Messstation Museum Ludwig (in km).

Messstationen	Tage mit starker Wärmebelastung	Sommertage	Heiße Tage	Hitzewarntage
Museum Ludwig [0 km]	28	19	12	19
Agrippabad [1,15 km]	28	21	13	20
Fachhochschule [2,25 km]	26	19	12	16
Innerer Grüngürtel [2,55 km]	25	20	13	16
Nippes [2,87 km]	27	17	12	17
Stüttgenhof [6,48 km]	14	17	12	9
Longerich [6,5 km]	21	20	13	13
Dellbrück [7,88 km]	19	18	12	8
Sürther Feld [8,0 km]	12	18	12	9
Kreuzfeld [12,25 km]	13	17	12	10

¹ Auswertungszeitraum 01.07.2013 bis 04.08.2013

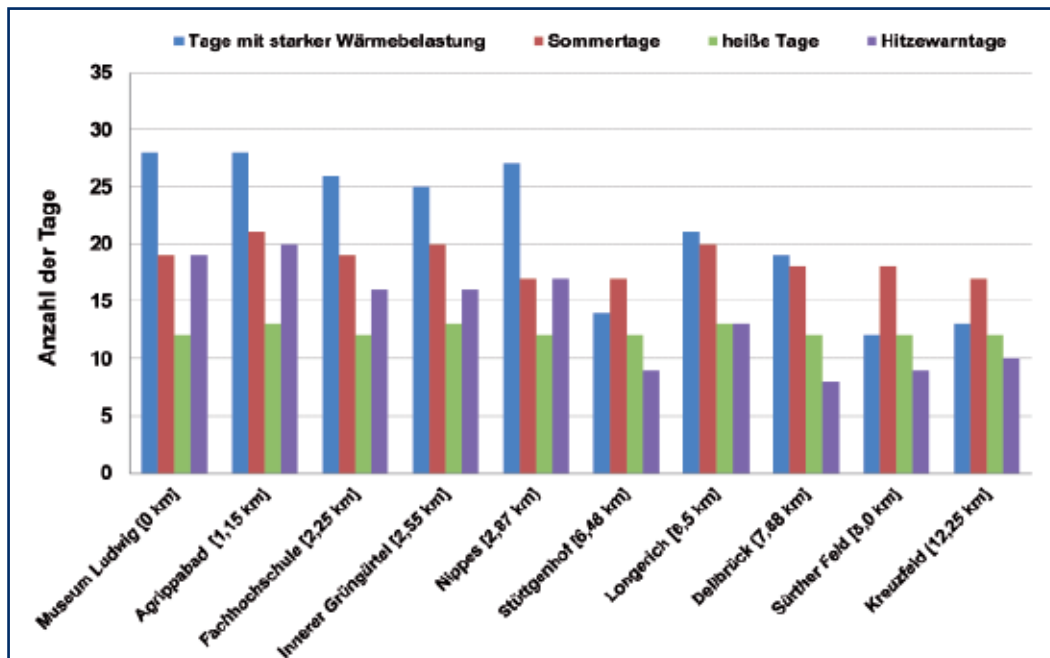


Abb. 4.19: Juli 2010: Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung, der Sommertage, der heißen Tage sowie der Hitzewarntage; Namen der Messstationen sowie Entfernung von der Messstation Museum Ludwig (in km).

Bei Betrachtung des Monats Juli 2010 (Abb. 4.19) fällt auf, dass sich die Anzahl der heißen Tage zwischen den innerstädtischen und den etwas ländlicheren Stationen im Stadtrandbereich kaum unterscheidet. Im Juli 2010 wurden an allen Stationen zwölf beziehungsweise 13 heiße Tage registriert. Die Anzahl der Sommertage variiert auch nur wenig (17 bis 21 Tage), wobei die höhere Anzahl von Sommertagen in der City anzutreffen war.

Ein deutlich größerer Unterschied zwischen innerstädtischen und Stadtrandlagen erwies sich bei der Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung. In größerer Entfernung von der Innenstadt und auch in einiger Entfernung von besiedeltem Gebiet, zum Beispiel bei den Stationen Sürther Feld und Kreuzfeld unterschieden sich die gefühlten Temperaturen kaum von den gemessenen Temperaturwerten. Bei den Citystationen hingegen schnellte die Anzahl der Tage mit Wärmebelastung auf mehr als das Doppelte empor. Für die Repräsentanten Museum Ludwig und Agrippabad wurden jeweils 28 Tage ermittelt.

Abbildung 4.20 verdeutlicht, dass die Zahl der Tage mit starker Wärmebelastung sowohl mit zunehmender Entfernung zum Stadtzentrum als auch mit abnehmender Bebauungsdichte (repräsentiert durch die Bodenrauigkeit z_0) abnimmt: Im Juni 2010 gab es in der Innenstadt bei 12 bis 13 heißen Tagen an fast jedem Tag des Monats eine hohe gesundheitliche Gefährdung

(28 Tage mit starker Wärmebelastung), während in den stadtrandnahen Bereichen (z. B. auf dem Sürther Feld) bei nahezu der gleichen Anzahl an heißen Tagen (zwölf Tage) – deutlich weniger Tage mit starker Wärmebelastung festzustellen waren (zwölf Tage).

Bei windschwachen, sommerlichen Wetterlagen ist auf Grund der hohen Rauigkeit in der Innenstadt (mehrstöckige Gebäude) der Luftaustausch stark reduziert und die Bodenbeschaffenheit (große Asphaltflächen) trägt dazu bei, dass die Hitze gespeichert wird. Dies führt dazu, dass die Gefühlte Temperatur – bei gleicher Lufttemperatur – in der Innenstadt deutlich höher ist, als in den Außenbereichen, und somit eine höhere Wärmebelastung verursacht.

Betrachtet man alle untersuchten Sommermonate Juli 2010, Juni 2011, August 2012 und Juli 2013, so ergibt sich in der Innenstadt eine um 40 bis 80 Prozent höhere Anzahl von Tagen mit starker Wärmebelastung im Vergleich zu der Stadtrandstation Dellbrück.

Noch stärker ist die Zunahme der Hitzewarntage für die oben genannten Monate, die durch eine hohe Anzahl von Tagen mit starker oder extremer Wärmebelastung gekennzeichnet sind. In der Innenstadt (hier Station Agrippabad) traten zwischen zwei- bis fünfmal so häufig Hitzewarntage auf wie an der Umgebungsstation Dellbrück (Abb. 4.21).

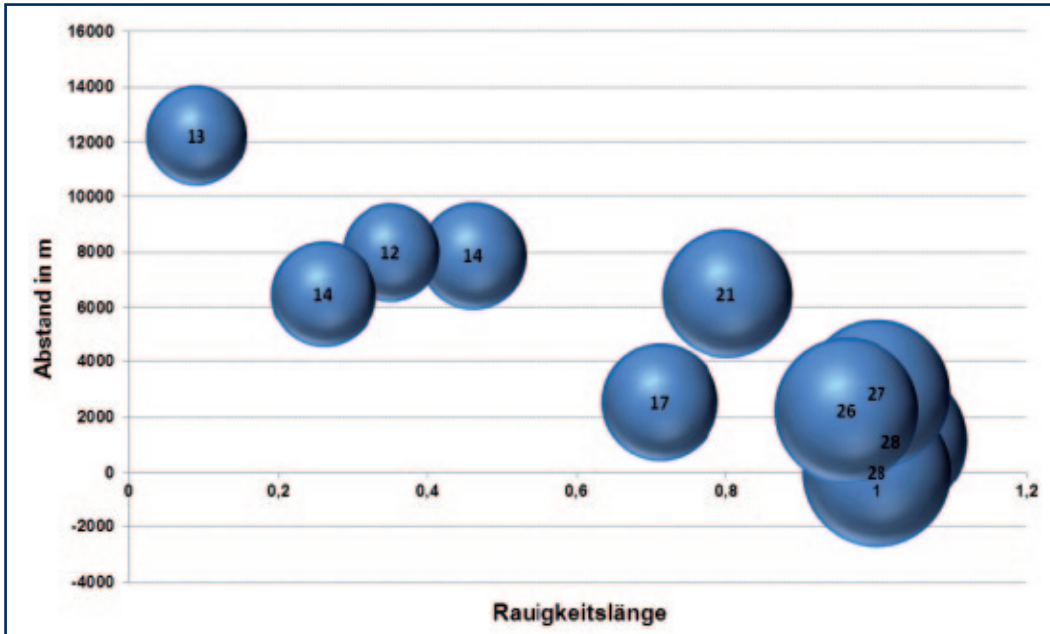


Abb. 4.20: Die Kugelgröße ist ein Maß für die Anzahl der Tage mit starker Wärmebelastung im Monat Juli 2010; auf der x-Achse ist die Rauigkeitslänge z_0 (Maß für die Bebauungsdichte), auf der y-Achse der Abstand (in m) zur Station „Museum Ludwig“ aufgetragen.

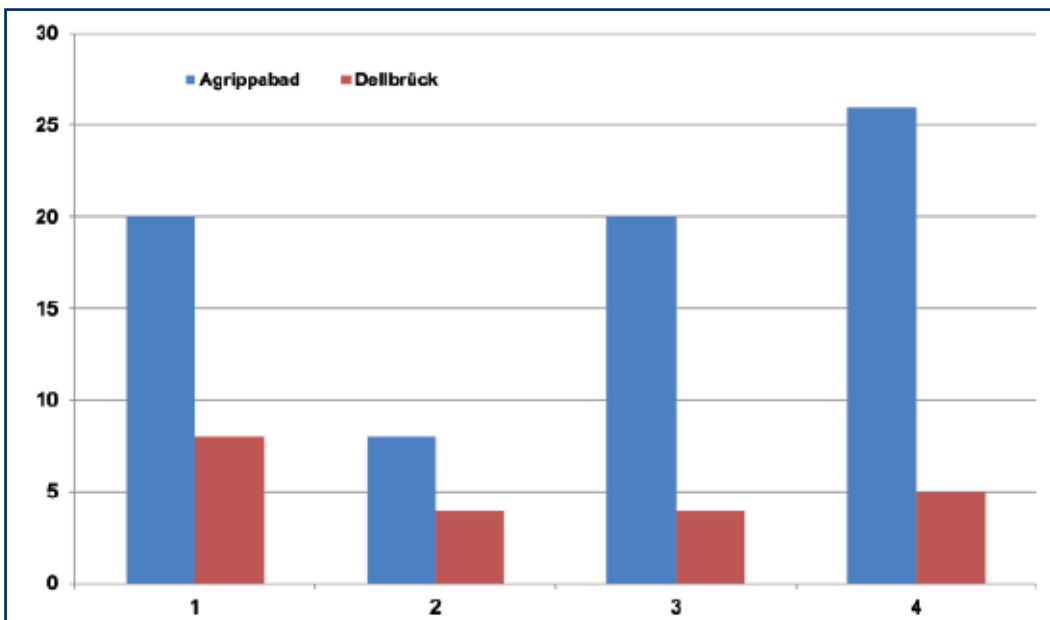


Abb. 4.21: Anzahl der Hitzewarntage (pro Monat) für die Monate Juli 2010 (1), Juni 2011 (2), August 2012 (3), Juli 2013 (4, 01.07.–04.08.) für die Stationen Agrippabad (Innenstadt) und Dellbrück (Umland).

Hitzewarntage sind für die Risikogruppen der älteren und chronisch kranken Menschen, der kleinen Kinder und isoliert lebender Personen mit Gesundheitsrisiken verbunden. Speziell für diese Personengruppen gelten als Vorsichtsmaßnahmen:

- Hitze meiden (nicht in die direkte Sonne gehen, Aufenthalt im Freien auf die kühlen Morgenstunden verlagern),

- Wohnung kühl halten (lüften nur wenn es außen kühler ist als in der Wohnung, Außenwärmeschutz nutzen, direkte Sonneneinstrahlung in die Wohnung vermeiden) und
- ausreichende Flüssigkeitsaufnahme.

4.4 Ergebnisse der Modellierungen mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Eingabedaten für das Stadtklimamodell vorgestellt. Anhand der Ergebnisse und Modellierungen für den Zeitraum von 1971 bis 2000 wird die Güte des verwendeten Ver-

fahrens abgeschätzt. Anschließend werden die Ergebnisse der Klimaprojektionen zum regionalen Klima Kölns bis Mitte des Jahrhunderts präsentiert.

4.4.1 Eingabedaten

4.4.1.1 Das MUKLIMO_3 Modellgebiet

Die Stadtklimasimulationen wurden mit der MUKLIMO_3 Version 10 für das 32 km mal 34 km große Modellgebiet (Abb. 4.22) mit einer konstanten horizontalen Auflösung von 100 Metern durchgeführt. Das Stadtgebiet Kölns liegt vollständig im Modellgebiet und ist in den Kartendarstellungen kenntlich gemacht. Die vertikale Auflösung reicht von zehn in den untersten 100 Metern bis zu 50 Metern zwischen 200 und 750 Metern Höhe bei insgesamt 25 Schichten.

Die für die Modellsimulationen benötigten Geländehöhendaten basieren auf dem DGM5 Datensatz. Das Modellgebiet umfasst wesentliche Teile der nach Nordwesten offenen Kölner Bucht (Abb. 2.1 in Kap. 2.1 zeigt einen Ausschnitt des Modellgebiets), wobei die Geländehöhe der Erhebungen im Südwesten Werte um 130 und im Nordosten bis über 250 Meter über Normalnull (NN) erreichen. Im Stadtgebiet von Köln variiert die Geländehöhe zwischen etwa 35 und 110 Metern über NN.

Um die Bebauungsstrukturen in Köln (Abb. 4.22) möglichst gut unterscheiden zu können, stellte die Stadt Köln für das Stadtgebiet den Datensatz einer räumlich hoch aufgelösten Biotopkartierung zur Verfügung, die den MUKLIMO_3-Landnutzungsklassen zugeordnet wurden (Früh et al. 2011a). Bei Gitterzellen im Bereich des Flughafens wurde die durch Start- oder Landebahnen auftretende kleinräumige Versiegelung anteilig berücksichtigt. Für die nicht durch die Biotopkartierung abgedeckten Bereiche des Modellgebiets wurde auf den CORINE-Datensatz zurückgegriffen, dessen Klassen ebenfalls den MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen zugeordnet wurden. Obwohl die Anzahl der CORINE-Klassen geringer ist als die der Biotopkartierungsdaten und auch die räumliche Auflösung der CORINE Daten deutlich unterhalb der verwendeten Modellgitterauflösung von

100 m liegt, ist die Güte der CORINE Daten dennoch ausreichend, um den Einfluss des Lokalklimas der Umgebung auf das Stadtgebiet von Köln zu simulieren.

Die mehrere hundert Meter breite Wasserfläche des Rheins durchzieht mäandrierend das Stadtgebiet von Südwest nach Nordost. In der Innenstadt von Köln ist Blockbebauung die häufigste Bebauungsstruktur. Außerhalb des gut erkennbaren inneren Grüngürtels gibt es in Köln auch viele Gebiete mit Zeilenbebauung (teilweise mit Hochhäusern als sekundärem Bebauungstyp) und Gewerbegebiete, aber auch parkartige Anlagen in verschiedenen Größen. Am Stadtrand finden sich häufig Reihenhaussiedlungen und auch einige kleinere Waldflächen.

Die in Kapitel 3.3 beschriebene Quadermethode für das dynamisch-statistische Downscaling (Verfeinerung) von regionalen Klimaprojektionen (Früh et al. 2011b) wurde hier auf das Stadtgebiet von Köln zur Analyse sommerlicher Hitzeperioden angewendet¹. Die aus der Quadermethode resultierenden Temperaturfelder wurden anschließend hinsichtlich der Überschreitung ausgewählter Schwellenwerte der Lufttemperatur für 30-jährige Zeiträume ausgewertet. Die untersuchten Schwellenwerte sind wie folgt definiert:

1. Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur $\geq 25 \text{ °C}$ ($N_{T_{\max} \geq 25}$),
2. Heiße Tage mit einer Tageshöchsttemperatur $\geq 30 \text{ °C}$ ($N_{T_{\max} \geq 30}$).

4.4.1.2 Verwendete Zeitreihen

Die 30-jährigen Zeitreihen, welche die für Köln regional repräsentativen Umgebungsbedingungen widerspiegeln und als Eingabedaten der Quadermethode dienen, stammen sowohl aus Beobachtungen als auch aus Klimaprojektionsrechnungen. Die Zeitreihe 1971 bis 2000 der DWD-Messstation in Köln-Bonn (Flughafen) wurde zur Evaluierung der klimatologischen Kenntage verwendet.

1 Die verwendeten Quadereckpunkte (siehe Kapitel 3.3 und Früh et al. 2011b) für die MUKLIMO-Rechnungen sind für die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur $T_{c,\min} = 15 \text{ °C}$ und $T_{c,\max} = 25 \text{ °C}$, für die relative Feuchte $r_{hc,\min} = 42 \text{ %}$ und $r_{hc,\max} = 80 \text{ %}$ und für die Windgeschwindigkeit (10 m über Grund) $v_{c,\min} = 0,7 \text{ m/s}$ und $v_{c,\max} = 3,0 \text{ m/s}$. Zur Berücksichtigung der Windrichtungsabhängigkeit des Temperaturfeldes in Köln wurden zwei Quader aufgespannt, jeweils einer für den Halbraum um den Windrichtungssektor Südost und einer für den Halbraum um den Richtungssektor Nordwest. Somit waren 16 MUKLIMO-Rechnungen (8 je Quader) erforderlich.

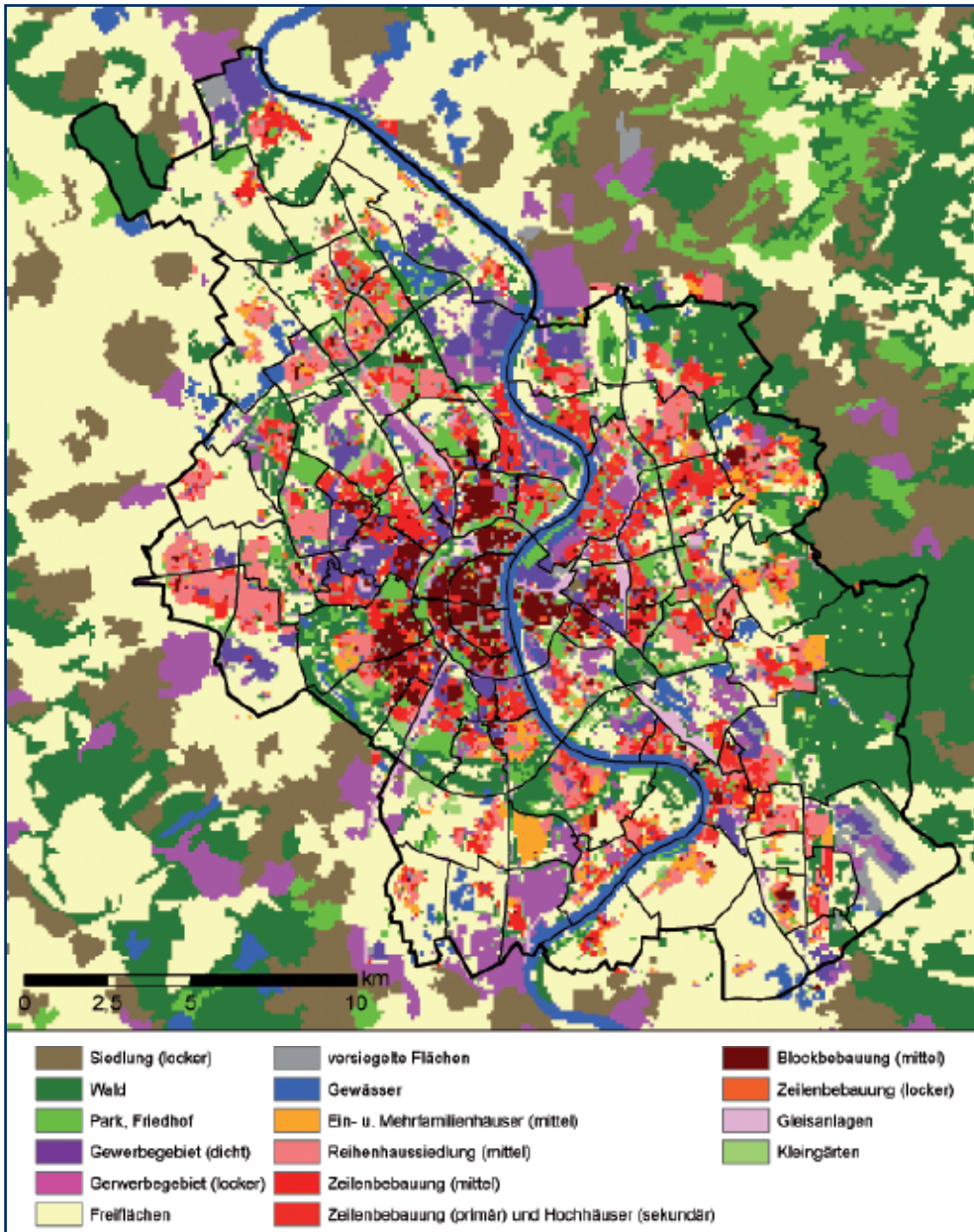


Abb. 4.22: Landnutzung im MUKLIMO_3 Modellgebiet (Ausschnitt). Das Stadtgebiet von Köln ist durch eine durchgezogene schwarze Linie gekennzeichnet.

Zur Abschätzung der Klimaänderung wurden Zeitreihen regionaler Klimamodelle und statistischer Regionalisierungsverfahren verwendet (siehe Kap. 3.3).

Aus den Projektionen der numerischen, regionalen Klimamodelle REMO und CLM wurden Zeitreihen von vier

Gitterzellen in der Nähe von Köln extrahiert. Aus dem Tagesmittelwert der Lufttemperatur (T_i) und dem Taupunkt² in zwei Metern Höhe wurde die relative Feuchte (r_{hi}) berechnet. Die Zeitreihen der meteorologischen Eingabeparameter Lufttemperatur, relative Feuchte und Horizontalwind (10 m über Grund) wurden räum-

2 Der Taupunkt oder besser die Taupunkttemperatur bezeichnet die Temperatur, auf die ein ungesättigtes Luftpaket bei gleichbleibendem Luftdruck über einer ebenen, chemisch reinen Wasserfläche abgekühlt werden muss, um zur Sättigung zu gelangen. Im Sättigungszustand beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 100 %.

lich über die vier Gitterzellen gemittelt. Die vier ausgewählten Gitterzellen liegen nordwestlich der Stadt und wurden als Eingabe für den Quader gewählt, weil sie in der Nähe der Stadt liegen, überwiegend ländlich geprägt sind und die Geländehöhe dieser Gitterzellen annähernd mit denen im Innenstadtgebiet der Stadt Köln übereinstimmen.

Aus den beiden statistischen Regionalisierungsverfahren WETTREG und STAR wurden die Zeitreihen für die Tagesmittelwerte der benötigten meteorologischen Parameter für die Stationen Flughafen Köln-Bonn (92 m ü. NN) und Leverkusen (44 m ü. NN) ausgewählt. Da weder WETTREG noch STAR Informationen über die Windrichtung liefern, wird hierfür eine zufällige Zeitreihe generiert, welche im Mittel der beobachteten Windrichtungsverteilung am Flughafen Köln-Bonn entspricht. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme, dass die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für WETTREG und STAR der beobachteten Windrichtungsverteilung entspricht und während des gesamten Projektionszeitraums konstant bleibt (Früh et al. 2011a).

4.4.2 Ergebnisse für den Zeitraum 1971 bis 2000

4.4.2.1 Evaluierung der simulierten Klimaindizes

Zur Überprüfung der Belastbarkeit der Ergebnisse und zur Evaluierung des gesamten Verfahrens wurde eine MUKLIMO-Simulation mit der Quadermethode für den Zeitraum 1971 bis 2000 auf der Basis der beobachteten Zeitreihe der DWD Station Köln-Bonn (OBS) für den Zeitraum 1971 bis 2000 durchgeführt (Evaluierungslauf EVAL). Die so berechneten klimatologischen Kenntage (Sommertage, heiße Tage) – als arithmetisches Mittel über je drei mal drei Gitterzellen – wurden dann mit denen verglichen, die aus den Daten der Messstationen Leverkusen, Köln-Bonn und Köln Botanischer Garten ermittelt wurden (OBS).

Die Gegenüberstellung der klimatologischen Kenntage aus den Beobachtungen (OBS) und den Ergebnissen der MUKLIMO-Simulation für den Zeitraum 1971 bis 2000 (EVAL) zeigt, dass für die Stationen Köln-Bonn

und Köln Botanischer Garten Abweichungen von ca. 25 Prozent für die Sommertage und von ca. 30 bis 40 Prozent für die heißen Tage auftreten. Für die Stadtstation Leverkusen sind mit sieben Prozent Abweichung die Unterschiede zwischen beobachteter und berechneter mittlerer jährlicher Anzahl Sommertage und heißer Tage deutlich geringer. Die hohen Abweichungen bei den Stationen Köln-Bonn und Botanischer Garten könnten durch stattgefundene Stationsverlegungen sowie durch die unvollständigen Messdatenreihen verursacht sein. Die Quadermethode wird im vorliegenden Fall insgesamt als hinreichend gut angesehen, um für die Berechnung der beiden Klimaindizes Sommertage und heiße Tage im Stadtgebiet Kölns verwendet zu werden.

4.4.2.2 Analyse des Ist-Zustands 1971 bis 2000

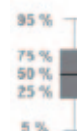
Die Modellergebnisse für den Zeitraum 1971 bis 2000 (EVAL) zeigen, dass die räumliche Variabilität der mittleren Anzahl der Sommertage und heißen Tage im Stadtgebiet von Köln durch unterschiedliche Landnutzungen (Bebauungsstruktur, Freiflächen, Waldflächen etc.) geprägt ist. So zeigt die Karte der berechneten Anzahl an Sommertagen, dass diese in dicht bebauten Stadtteilen innerhalb und außerhalb des Inneren Grüngürtels sowie östlich des Rheins im Stadtteil Deutz am höchsten sind (Abb. 4.23). Gleiches gilt für die berechnete Anzahl an heißen Tagen. Die mittlere jährliche Anzahl der Kenntage erreicht hier verbreitete Werte von über 55 Sommertagen und über 14 heißen Tagen pro Jahr.

Auf den Randhöhen der Kölner Bucht wurden weniger als 25 Sommertage pro Jahr berechnet und mit verbreitet zwischen einem und vier heißen Tagen pro Jahr wurde die 30 °C Temperaturschwelle nur selten überschritten.

4.4.2.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bebauungsstrukturen

Um die Auswirkungen der Landnutzung und der Bebauungsstruktur auf das Stadtklima von Köln systematisch zu untersuchen, wurden statistische Auswertungen durchgeführt, die mit einem Box-Whisker-Plot³ visualisiert werden.

3 Der **Box-Whisker-Plot** ist ein Kasten-Diagramm, bei dem das obere Ende des Kastens das 75 %-Quantil und das untere Ende des Kastens (Box) das 25 %-Quantil zeigt. Dabei beschreibt das 25 %-Quantil den Wert, der von 25 % der Werte einer Stichprobe unterschritten wird. Der Median entspricht dem 50 %-Quantil und ist mit einem dicken Querstrich gekennzeichnet. Die aus dem Kasten herausragenden Linien (Whisker) umfassen bei der gewählten Darstellung den Bereich zwischen dem 5 %- und 95 %-Quantil. Dieser Bereich entspricht dem 90 %-Konfidenzintervall.



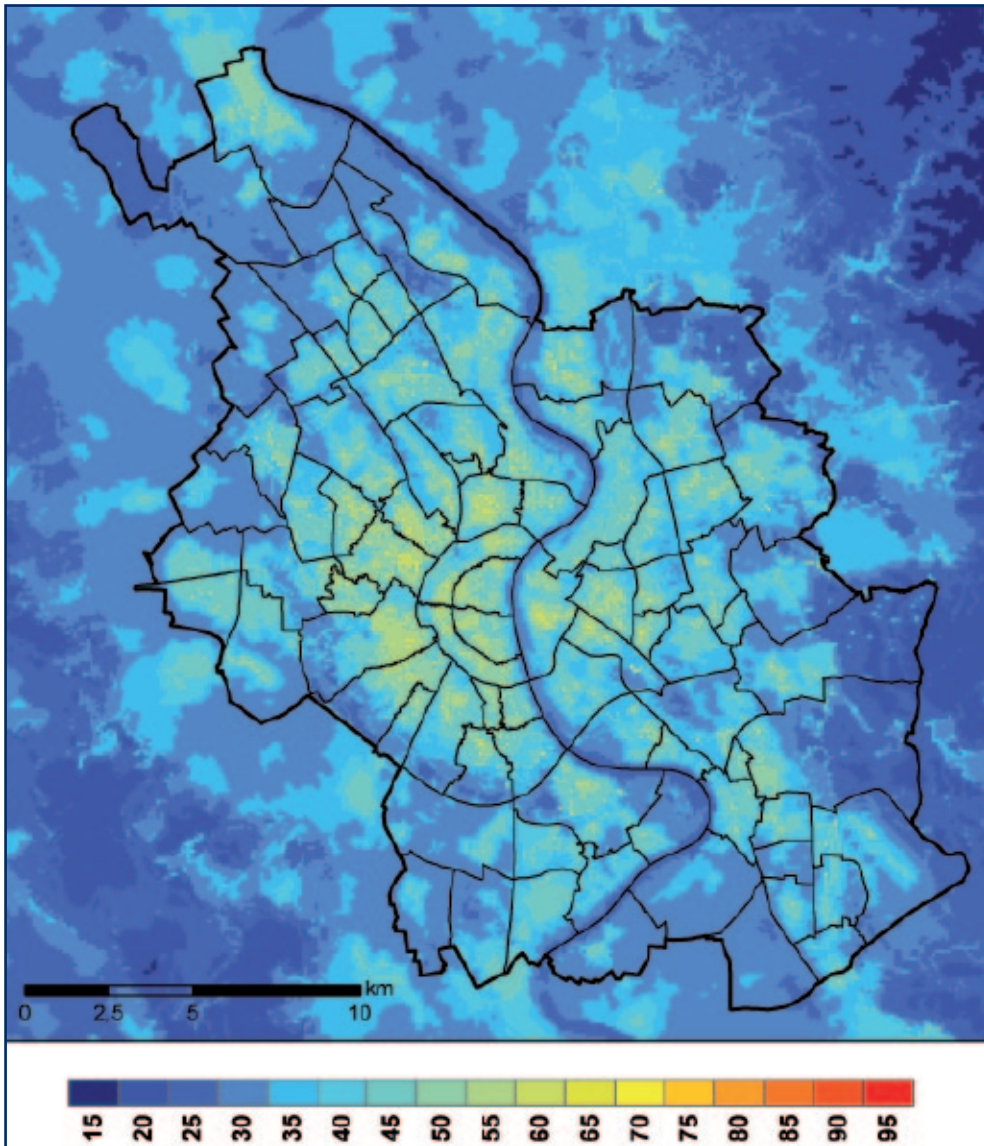


Abb. 4.23: Mittlere jährliche Anzahl Sommertage im Modellgebiet für den Simulationslauf (Mittelwert über die Periode 1971 bis 2000). Es sind sowohl die Umrisse der Stadt als auch der Stadtteile eingezeichnet.

Die Abbildung 4.24 zeigt für die Anzahl der Sommertage die Box-Whisker-Plots für jede einzelne Landnutzungs-kategorie im Mittel über das Stadtgebiet von Köln für den Ist-Zustand 1971 bis 2000 (EVAL). Die niedrigste Anzahl an Sommertagen findet sich im Wald und über Wasserflächen. Sie ist signifikant geringer als die Anzahl der Sommertage gemittelt über alle anderen Landnutzungs-klassen. Die geringe Anzahl im Wald ist durch den Schattenwurf der Bäume verursacht. Die Absorption und Reflexion der Sonnenstrahlung erfolgt überwiegend im Kronenbereich der Bäume. Über Wasserflächen wird die niedrige Anzahl der Sommertage im Wesentlichen

durch die hohe Verdunstung und die Wärmespeicherung im Wasser verursacht. Da die tagsüber im Wasser gespeicherte Wärme (ähnlich wie bei Gebäuden) nachts wieder abgegeben wird, können Wasserflächen nachts zur Wärmebelastung beitragen und sind daher zur Milderung von städtischer Wärmebelastung nur eingeschränkt geeignet.

Die höchste Anzahl der Sommertage ergibt sich bei hoher Baudichte und Versiegelung, insbesondere bei Blockbebauung, aber auch bei Zeilenbebauung, in Industrie- und Gewerbegebieten und bei Reihenhaus-

siedlungen. Dies bedeutet, dass bei Bebauung der tagsüber durch die Gebäude entstehende Schattenwurf die Aufheizung durch die stark reduzierte Verdunstung und den verminderten horizontalen Luftaustausch nicht ausgleichen kann.

Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungen finden sich auch bei der Auswertung der mittleren jährlichen Anzahl heißer Tage. In den Waldgebieten und über den Wasserflächen des ausgewerteten Stadtgebiets sind heiße Tage besonders selten.

Bei der landnutzungsspezifischen Auswertung von Sommertagen und heißen Tagen ist grundsätzlich zu beachten, dass auch die Größe der Areale mit nahezu einheitlicher Landnutzung von Bedeutung ist. Bei größeren zusammenhängenden Gebieten einer einheitlichen Landnutzung kann sich das hierfür charakteristische Mikroklima gut ausprägen, wohingegen bei räumlich stark variierender Landnutzung die Temperaturwerte durch Wechselwirkungen (z. B. Luftaustauschprozesse) mit benachbarten Landnutzungen beeinflusst sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass Parkanlagen mit Flächen auch schon unter zehn Hektar eine deutlich die Temperatur reduzierende Wirkung aufweisen (Bongardt 2006).

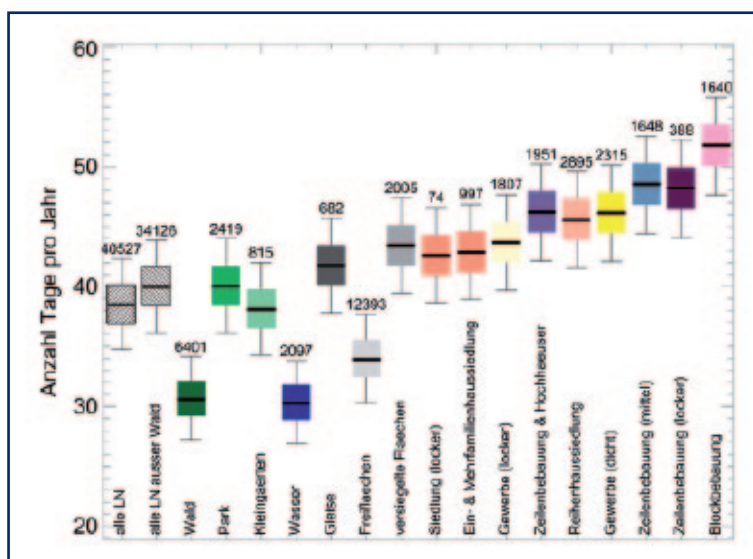


Abb. 4.24: Box-Whisker-Plots für jede Landnutzungs-kategorie, ausgewertet für die Modellgitterzellen im Stadtgebiet von Köln für 1971 bis 2000 (EVAL) für die mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen. Die beiden linken Klassen beziehen sich jeweils auf die berechnete Anzahl von Tagen für alle Landnutzungen (1. Klasse von links) bzw. für alle Landnutzungen mit Ausnahme des Waldes (2. Klasse von links). Die Zahlen über den Box-Whiskers geben die Anzahl der Gitterzellen für jede Klasse an.

4.4.2.4 Geplante Bebauung

Zur Untersuchung der Auswirkungen zukünftiger Planungs- und Bauvorhaben beziehungsweise Grünflächenänderungen auf das Stadtklima stellte die Stadt Köln Informationen über geplante Landnutzungsänderungen (neue Bebauungsgebiete, Änderungen von Bebauungsstrukturen, Schaffung von Grünflächen etc.) zur Verfügung. Für den Planzustand wurden aufgrund der gewählten Modellauflösung von 100 mal 100 Metern nur Nutzungsänderungen für Flächen größer oder gleich zehn Hektar berücksichtigt.

Abbildung 4.25 zeigt die Flächen, auf denen eine Landnutzungsänderung geplant ist: Die Farben kennzeichnen die bisherige (linke Karte) und die geplante Flächennutzung (rechte Karte). Die geplanten Baumaßnahmen bestehen im Wesentlichen aus neuen Arealen

mit Blockbauung und neuen Industrie- und Gewerbegebieten. Die Bauvorhaben sind überwiegend auf bisher als Freiflächen kategorisierten Flächen geplant. Einige Bauvorhaben verändern jedoch lediglich die Bebauungsstruktur auf bereits bebauten Flächen. Die Bauplanungen sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Die Flächenanteile mit geplanten neuen grünen Strukturen (Park- und Waldflächen) sind klein im Vergleich zu den Flächenanteilen mit Bauvorhaben.

Mit diesen – wenn auch noch zum Teil vorläufigen – Planungen kann die kombinierte Wirkung von regionalem Klimawandel und Stadtentwicklung untersucht und bewertet werden. In Kapitel 1.3.4 werden für drei ausgewählte Planungsgebiete die lokalklimatischen Auswirkungen durch die veränderten Flächennutzungen und den Klimawandel (Periode 2021 bis 2050) vorgestellt.

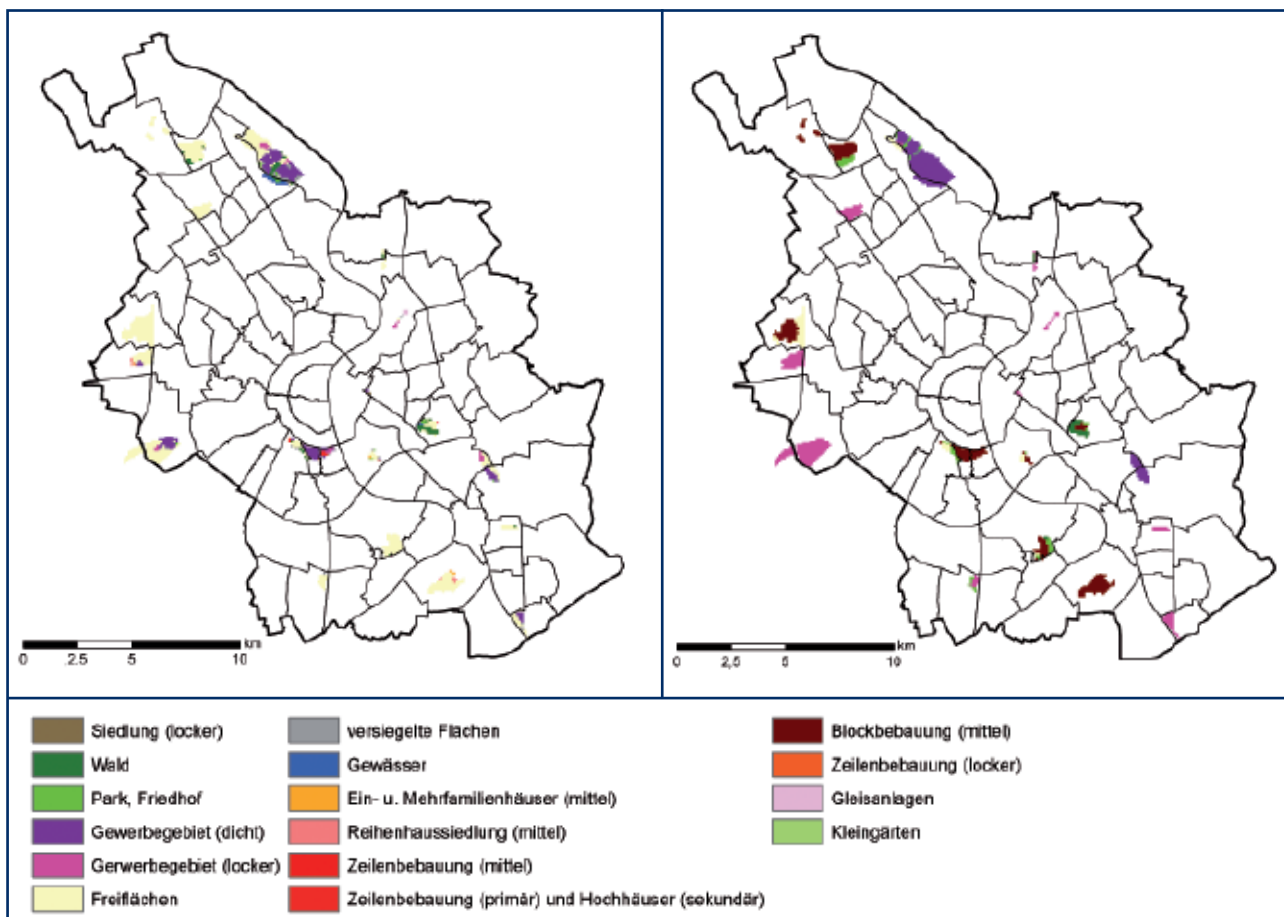


Abb. 4.25: Areale mit geplanter Landnutzung (rechts) im Vergleich zur bisherigen Landnutzung (links). Weiße Flächen bedeuten keine Änderung der Landnutzung.



4.4.3 Klimaprojektionen zum regionalen Klima Kölns bis Mitte des Jahrhunderts

4.4.3.1 Daten regionaler Klimaprojektionen als Eingabewerte

Um Aussagen zum zukünftigen Klima zu erhalten, werden im Folgenden die Werte regionaler Klimaprojektionen als Eingabedaten für die MUKLIMO_3-Berechnungen verwendet. Zur Ermittlung von aus den regionalen Klimaprojektionen resultierenden systematischen Fehlern in der Klimatologie der Sommertage beziehungsweise der heißen Tage für Köln werden verglichen

1. die MUKLIMO Ergebnisse auf Basis der regionalen Klimaprojektionen REMO, CLM, WETTREG und STAR für den Zeitraum 1971 bis 2000 (Kontrollzeitraum C20)
2. der Evaluierungslauf EVAL, ebenfalls für den Zeitraum 1971 bis 2000, basierend auf Messdaten.

Die Unterschiede zwischen dem Evaluierungslauf und den Ergebnissen der verwendeten Klimaprojektionen sind ein Maß für den systematischen Fehler der Modelle (als Bias bezeichnet). Um diesen Biasfehler weitgehend auszugleichen, werden nachfolgend die Sommertage und die heißen Tagen der Periode 2021 bis 2050 als Summe der Werte des Evaluierungslaufs (EVAL) und des auf den regionalen Klimaprojektionen basierenden Änderungssignals (Periode 2021 bis 2050 minus Periode 1971 bis 2000) berechnet.

Zur Abschätzung der Unsicherheit und zur Einschätzung der internen Variabilität der 30-jährigen Stichproben wird das nicht-parametrische Bootstrap-Verfahren zur Bestimmung der Konfidenzintervalle angewendet (Früh et al. 2011a)⁴.

Die MUKLIMO_3-Ergebnisse auf der Basis von CLM liefern im Vergleich zu EVAL deutlich niedrigere Werte der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage, während die Anzahl der Sommertage durch WETTREG und STAR leicht über- und durch REMO leicht unterschätzt werden. Die räumliche Variabilität (Max.–Min.) von EVAL wird von CLM deutlich unterschätzt und durch die anderen drei Regionalmodelle leicht überschätzt.

Im Vergleich zu EVAL überschätzen REMO und STAR das Konfidenzintervall etwas. Die Unterschätzung des Konfidenzintervalls durch WETTREG fällt hingegen deutlicher aus, während CLM das Konfidenzintervall aus EVAL am besten trifft. Dies geht auch aus dem Vergleich der Box-Whisker-Plots hervor (Abb. 6).

Für die entsprechenden Auswertungen der heißen Tage weisen die Simulationen mit den vier regionalen Klimaprojektionen etwas andere Charakteristika in Hinblick auf den Vergleichslauf EVAL auf. Für REMO ergibt sich eine deutliche und für CLM eine leichte Unterschätzung der mittleren jährlichen Anzahl heißer Tage. CLM zeigt hierbei auch eine zu geringe räumliche Variabilität der Werte (Max.–Min.). WETTREG und STAR hingegen überschätzen etwas die Ergebnisse des Vergleichslaufs EVAL (Abb. 4.26). Das 90 Prozent-Konfidenzintervall wird von STAR über- und von REMO unterschätzt, während CLM und WETTREG die Ergebnisse für EVAL recht gut wiedergeben.

Aufgrund der gezeigten Ergebnisse, speziell der weitgehenden Überlappung der Vertrauensbereiche, werden alle Modelle des Ensembles als hinreichend geeignet angesehen, das derzeitige Klima von Köln bezüglich der Kenntage Sommertage und heiße Tage zu modellieren und werden daher auch für die Klimaprojektionen bis Mitte des Jahrhunderts verwendet.

Zur Abschätzung der Änderung der klimatologischen Kenntage in Folge der globalen Erwärmung wird für das MUKLIMO_3 Modellgebiet ein Vergleich der zukünftigen Bedingungen (2021 bis 2050) nach dem IPCC-Szenario A1B (Nakicenovic und Swart, 2000) mit denen der historischen Periode (C20, 1971 bis 2000) durchgeführt. Zunächst werden Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels unter Beibehaltung der aktuellen Landnutzung (Kapitel 1.3.2), im nachfolgenden Kapitel 1.3.3 dann in Kombination mit den geplanten Landnutzungsänderungen präsentiert.

⁴ Das Verfahren liefert unter anderem das 5 %- und 95 %-Quantil, welche als untere und obere Grenze des Konfidenzintervalls auf dem 90 %-Signifikanzniveau zu verstehen sind. Dieses 90 %-Konfidenzintervall berücksichtigt die Unsicherheit auf Grund der kurzfristigen natürlichen Variabilität des Klimasystems (Kendon et al. 2008).

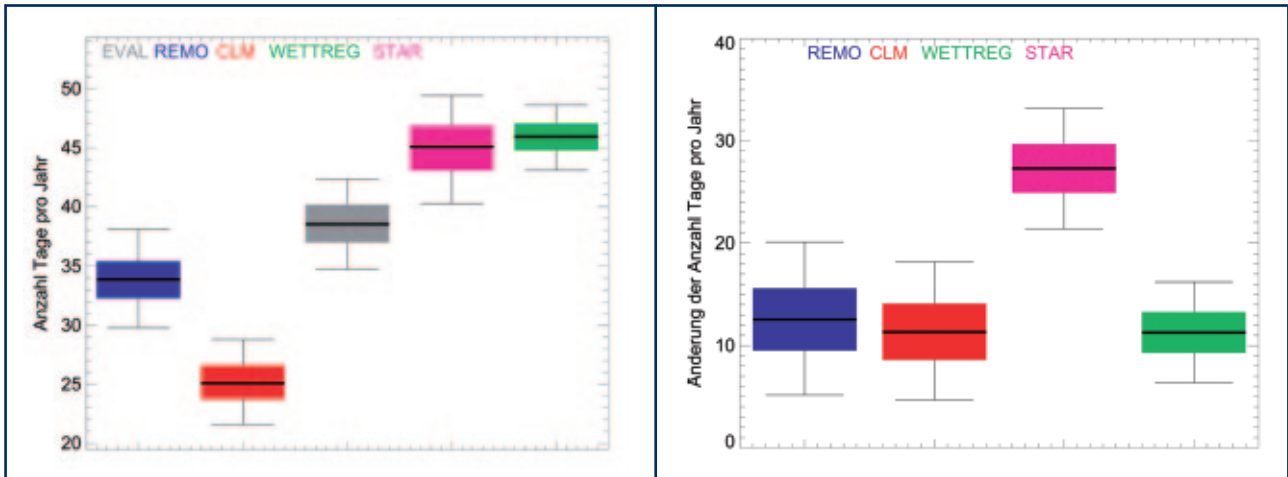


Abb. 4.26: Box-Whisker-Plots für die mittlere jährliche Anzahl Sommertage $N_{T_{max} \geq 25}$ (links) und heiße Tage $N_{T_{max} \geq 30}$ (rechts) ausgewertet für das Stadtgebiet von Köln für EVAL (grau), REMO (blau), CLM (rot), WETTREG (grün) und STAR (magenta) für den Zeitraum 1971 bis 2000.

4.4.3.2 Auswirkung der Klimaänderung bis zum Zeitraum 2021 bis 2050 (ohne Landnutzungsänderungen)

In einem ersten Schritt wird untersucht, wie sich die zu erwartenden regionalen Klimaänderungen auf die Anzahl der Sommertage sowie der heißen Tage im Stadtgebiet auswirken, unter der Annahme, dass die Landnutzung unverändert bleibt. Die geplanten Landnutzungsänderungen sind hier bewusst außen vor gelassen, damit allein der Klimawandeleffekt betrachtet werden kann.

Ergebnisse für die Sommertage (ohne Landnutzungsänderungen)

Tabelle 4.2 zeigt für die mittlere jährliche Anzahl von **Sommertagen** (Periode 2021 bis 2050) jeweils den größten Wert sowie den arithmetischen Mittelwert (Mittelwert über alle Gitterzellen) für das Stadtgebiet Köln. Für die Mitte des Jahrhunderts ist somit zu erwarten, dass – bezogen auf die durchgeführten Rechnungen mit REMO, CLM, WETTREG und STAR – die mittlere maximale Zahl der Sommertage in Köln zwischen etwa 80 und knapp 100 Tagen pro Jahr liegen wird. Diese Zahl liegt zwölf bis 30 Prozent über dem derzeitigen Wert. In dem Gebiet der maximalen Zunahme in Köln kann die Anzahl der Sommertage um 14 bis 32 Tage pro Jahr – im Vergleich zum derzeitigen Klima – zunehmen⁵.

Für das Mittel über das gesamte Stadtgebiet ist eine Zunahme der Anzahl der Sommertage von derzeit etwa 39 auf zukünftig (Periode 2021 bis 2050) 50 bis 66 Tage zu erwarten. Dies bedeutet eine Zunahme um etwa 30 bis 70 Prozent gegenüber dem heutigen Zustand.

Abbildung 4.27 zeigt die statistische Auswertung für die Änderung der Anzahl der Sommertage im Stadtgebiet und illustriert die Konfidenzintervalle für das Änderungssignal $DN_{T_{max} \geq 25}$ auf dem 90 Prozent-Signifikanzniveau für REMO, CLM, WETTREG und STAR (zur Thematik siehe auch Früh et al. 2011b). Die Vertrauensintervalle (bzw. die Länge der Whiskers und damit die Unsicherheit) für die Änderungssignale sind generell größer als für den Evaluierungszeitraum von 1971 bis 2000. Dies ist auf die Summe der Variabilität der Vergangenheit und Zukunft zurückzuführen, aber auch auf die höhere Variabilität der zukünftigen Temperatur selbst (Schär et al. 2004). Die Modelle REMO, CLM und WETTREG zeigen ähnliche Medianwerte und Vertrauensbereiche, während der Medianwert für STAR deutlich höher liegt als bei den anderen Modellen.

⁵ Für alle Gitterpunkte des MUKLIMO-Rechengitters, die sich in Köln befinden, wird die Differenz der Anzahl der Sommertage zwischen dem jeweiligen Modell, z. B. CLM, und dem Evaluierungslauf EVAL gebildet; der maximale Wert all dieser Differenzen liefert somit die maximale Änderung – und den Ort dieser Änderung – für das betrachtete Modell im Stadtgebiet Köln.

Tab. 4.2: Mittlere jährliche Anzahl **Sommertage** für den Lauf EVAL (1971 bis 2000) und für REMO, CLM, WETTREG und STAR (2021 bis 2050) für die Situation „ohne Landnutzungsänderungen“: Maximale Anzahl (in Tagen als Differenz zum derzeitigen Klima (EVAL) in Tagen und Prozent und maximale Differenz je Gitterpunkt (GP)6; Mittelwert (über das Gebiet von Köln); die Werte beziehen sich auf das Stadtgebiet Köln.

Antrieb	Maximum				Mittelwert
	Tage (pro Jahr)	Differenz zu EVAL (Tage)	Differenz zu EVAL (%)	Differenz je GP (Tage pro Jahr)	Tage (pro Jahr)
EVAL	67,6				38,6
REMO	82,1	14,5	21	17,8	51,2
CLM	81,7	14,1	21	14,9	50
WETTREG	79,9	12,3	18	14,4	49,9
STAR	96	28,4	42	31,9	65,9

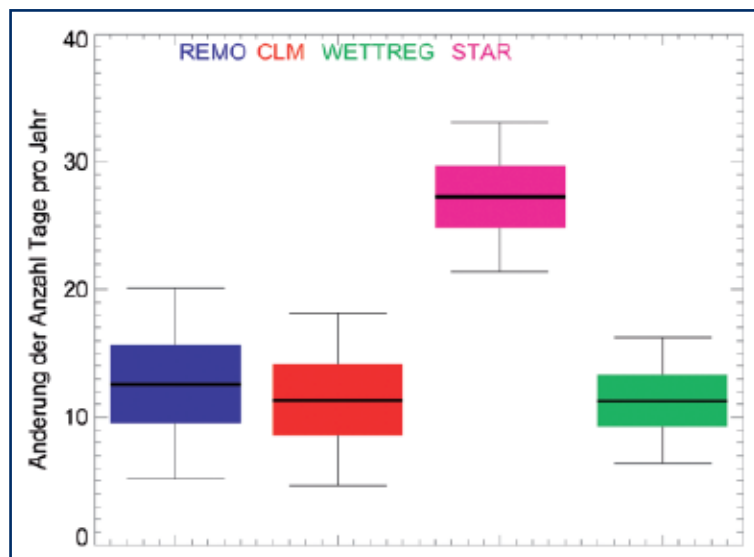


Abb. 4.27: Box-Whisker-Plots für die Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1971 bis 2000 (C20) für REMO (blau), CLM (rot), STAR (magenta) und WETTREG (grün); die statistische Auswertung bezieht sich auf das Stadtgebiet von Köln.

Um den Einfluss der Landnutzung und insbesondere der unterschiedlichen Bebauungsstrukturen auf die Änderung der mittleren Anzahl von Sommertagen zwischen den Zeiträumen 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050 zu ermitteln – bei unveränderter Bebauung –, wurden die Quantilwerte für $DN_{T_{max} \geq 25}$ auch für die einzelnen MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen bestimmt und als Box-Whisker-Plots in Abbildung 4.28 dargestellt. Für die verschiedenen Landnutzungsklassen zeigt sich, dass sich die Medianwerte (50 Prozent-Perzentile) von $DN_{T_{max} \geq 25}$ nur um sehr wenige Tage unterscheiden und

sich die Vertrauensintervalle auf dem 90 Prozent-Signifikanzniveau weitgehend überlappen. **Dies bedeutet, dass der Anstieg der Anzahl der Sommertage durch den regionalen Klimawandel in allen Landnutzungsklassen nahezu den gleichen Betrag aufweist:** Bezogen auf die Anzahl der Sommertage wird sich der heute bestehende relative Unterschied zwischen verschiedenen Landnutzungen nicht wesentlich verstärken. So wird zum Beispiel der derzeitige Unterschied zwischen der Innenstadt und dem Umland durch den erwarteten regionalen Klimawandel nicht signifikant intensiviert,



sondern bleibt weitgehend erhalten. Wenn keine Landnutzungsänderungen erfolgen, wird somit das Niveau der Sommertage über das gesamte Stadtgebiet hin nahezu gleichmäßig angehoben.

Die Ergebnisse mit REMO, CLM und WETTREG liegen recht dicht beisammen, wobei von den drei Projektionen REMO eine etwas größere Zunahme an Sommertagen zeigt, die besonders in bebauten Gebieten gut zu erken-

nen ist. Die berechnete Anzahl an Sommertagen ist bei STAR deutlich größer als bei den anderen drei Projektionen. In Abbildung 4.29 ist die für den Zeitraum 2021 bis 2050 berechnete räumliche Verteilung der Anzahl Sommertage exemplarisch für WETTREG (mit der geringsten Anzahl von Sommertagen) und STAR (höchste Zahl von Sommertagen, vgl. Tabelle 4.2) dargestellt, die somit die Spannweite der Modellrechnungen des MUKLIMO_3-Ensembles aufzeigen.

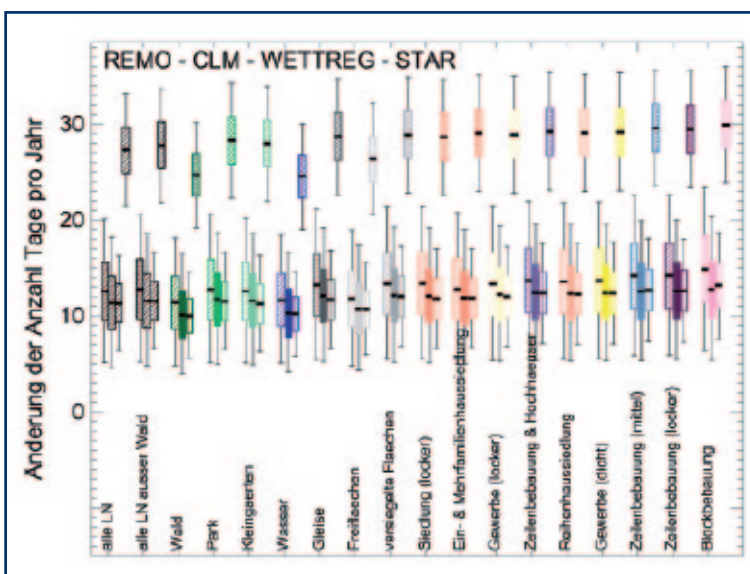


Abb. 4.28: Box-Whisker-Plots für die Änderung der Anzahl Sommertage 2021 bis 2050 (A1B) im Vergleich zu 1971 bis 2000 (C20) ausgewertet für die Landnutzungsklassen im Stadtgebiet von Köln. Die Ergebnisse für REMO (schräg schraffiert), CLM (ausgefüllt), WETTREG (längs schraffiert) und STAR (kreuz schraffiert) sind für jede Landnutzung in dieser Reihenfolge dargestellt.

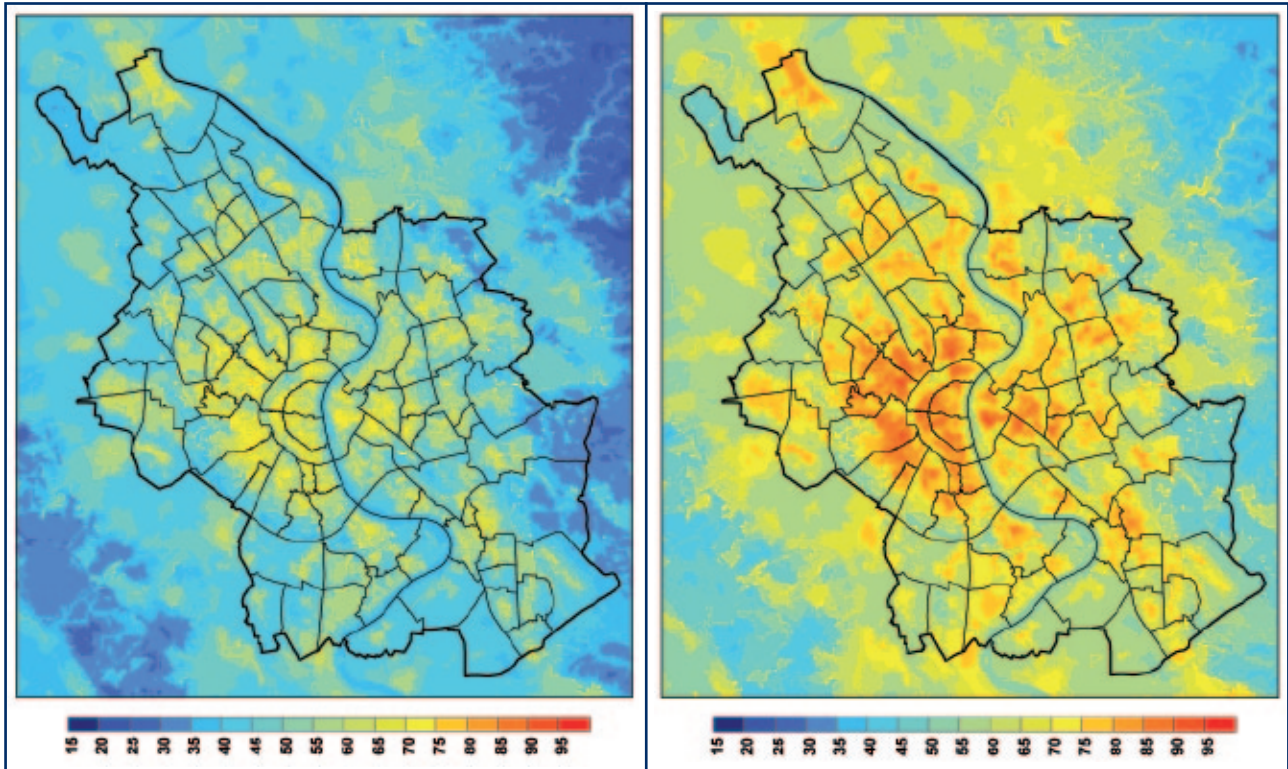


Abb. 4.29: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage im Modellgebiet für den Zeitraum 2021 bis 2050, basierend auf WETTREG (links) sowie STAR (rechts); Szenario A1B; ohne Landnutzungsänderungen; für die beiden Karten wurde dieselbe Skalierung verwendet.

Ergebnisse für die heißen Tage (ohne Landnutzungsänderungen)

Für die Mitte des Jahrhunderts ist zu erwarten, dass – bezogen auf die durchgeführten Rechnungen mit REMO, CLM, WETTREG und STAR – die maximale Zahl der heißen Tage in Köln etwa zwischen 28 und knapp 37 Tagen pro Jahr betragen wird. Diese Zahl liegt 40 bis 80 Prozent über dem derzeitigen Wert von fast 20 Tagen. In dem Gebiet der maximalen Zunahme in Köln kann die Anzahl heißer Tage um acht bis 22 Tage pro Jahr – im Vergleich zum derzeitigen Klima – zunehmen⁶.

Für das Mittel über das gesamte Stadtgebiet ist eine Zunahme der Anzahl der heißen Tage von derzeit etwa acht bis neun auf zukünftig (Periode 2021 bis 2050) 13 bis 20 Tage zu erwarten. Dies bedeutet eine Zunahme um 50 Prozent bis zu etwa dem 1,4-fachen an Tagen gegenüber dem heutigen Zustand.

Die Auswertung der Quantilwerte für die einzelnen MUKLIMO_3 Landnutzungsklassen bezüglich der heißen Tage zeigt ähnliche Ergebnisse wie für die Sommertage. Für STAR ist eine leichte Abhängigkeit der Zunahme der heißen Tage von der Landnutzung zu beobachten. Insgesamt ergibt sich aber für alle vier Projektionen (aufgrund der starken Überlappung der fünf Prozent- und 95 Prozent-Whisker) auf dem 90 Prozent-Signifikanzniveau keine aussagekräftige Abhängigkeit der Zunahme der heißen Tage von der Bebauungsstruktur beziehungsweise der Landnutzung. Der relative Unterschied zwischen bebauten und unbebauten Flächen bleibt demnach – wie auch bei den Sommertagen – zur Mitte des Jahrhunderts weitgehend unverändert.

Die Karten der heißen Tage für das Stadtgebiet weisen eine ähnliche Struktur auf wie für die Sommertage (Abb. 4.29) und werden im nächsten Kapitel – für den Fall mit Flächennutzungsänderungen – diskutiert.

⁶ Für alle Gitterpunkte des MUKLIMO-Rechengitters, die sich in Köln befinden, wird die Differenz der Anzahl der Sommertage zwischen dem jeweiligen Modell, z. B. CLM, und dem Evaluierungslauf EVAL gebildet; der maximale Wert all dieser Differenzen liefert somit die maximale Änderung – und den Ort dieser Änderung – für das betrachtete Modell im Stadtgebiet Köln.

4.4.3.3 Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021 bis 2050

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel werden hier die Resultate für die MUKLIMO_3-Ergebnisse der Periode 2021 bis 2050 unter Berücksichtigung der in Kapitel 1.2.4 aufgeführten Planungsgebiete erläutert. Das heißt, die für die Jahre 2021 bis 2050 erwarteten Klimabedingungen werden unter der Annahme berechnet, dass die geplanten Vorhaben in der angenommenen Weise umgesetzt werden.

Ergebnisse für die Sommertage (mit Landnutzungsänderungen)

Die maximale Anzahl und die über das Stadtgebiet gemittelte Anzahl der Sommertage (Mittelwert über alle Gitterpunkte) nimmt – im Vergleich zu den Berechnungen ohne Flächennutzungsänderungen – nur geringfügig zu (siehe Kap. 1.3.2): Für das Mittel über das gesamte Stadtgebiet ist eine Zunahme der Anzahl der Sommertage von derzeit etwa 39 auf zukünftig (2021 bis 2050) auf etwa 51 bis 67 Tage zu erwarten und bedeutet eine Zunahme um ca. 30 bis 70 Prozent – wie im Falle

der heutigen Flächennutzung – gegenüber der Periode 1971 bis 2000.

In den Gebieten aber, in denen das Klimaänderungssignal (Änderung durch den Klimawandel bis Mitte des Jahrhunderts) durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung überlagert ist, kann es zu einer deutlichen Verstärkung der Zunahme von Sommertagen kommen: Gegenüber einer unveränderten Fläche kann in einer Fläche, die durch eine Bebauungsverdichtung geprägt ist, die zusätzliche Zunahme an Sommertagen in der Größenordnung des Klimasignals liegen: Zunahme um 29 bis 57 Tage, davon durch den Klimawandel 14 bis 32 Tage (Tabellen 4.2 und 4.3, Spalte 4).

Abbildung 4.30 zeigt die Anzahl der Sommertage für die Periode 2021 bis 2050 mit geplanter Landnutzungsänderung exemplarisch für WETTREG (geringste maximale Anzahl Sommertage) und STAR (höchste maximale Anzahl Sommertage). Mit diesen beiden Modellen wird in etwa die Spannweite der Ergebnisse der vier Modelle REMO, CLM, WETTREG und STAR abgebildet.

Tab. 4.3: Mittlere jährliche Anzahl der **Sommertage** für den Lauf EVAL (1971 bis 2000) und für REMO, CLM, WETTREG und STAR (2021 bis 2050) für die Situation „mit Planungsänderungen“: Maximale Anzahl (in Tagen als Differenz zum derzeitigen Klima (EVAL) in Tagen und Prozent und maximale Differenz je Gitterpunkt (GP)6); Mittelwert (über das Gebiet von Köln); Die Werte beziehen sich auf das Stadtgebiet.

Antrieb	Maximum				Mittelwert
	Tage (pro Jahr)	Differenz zu EVAL (Tage)	Differenz zu EVAL (%)	Differenz je GP (Tage pro Jahr)	Tage (pro Jahr)
EVAL	67,6				38,6
REMO	82,6	15	22	47	51,9
CLM	81,7	14,1	21	28,6	50,4
WETTREG	80	12,4	18	41,9	50,6
STAR	96,1	28,5	42	57,3	66,6

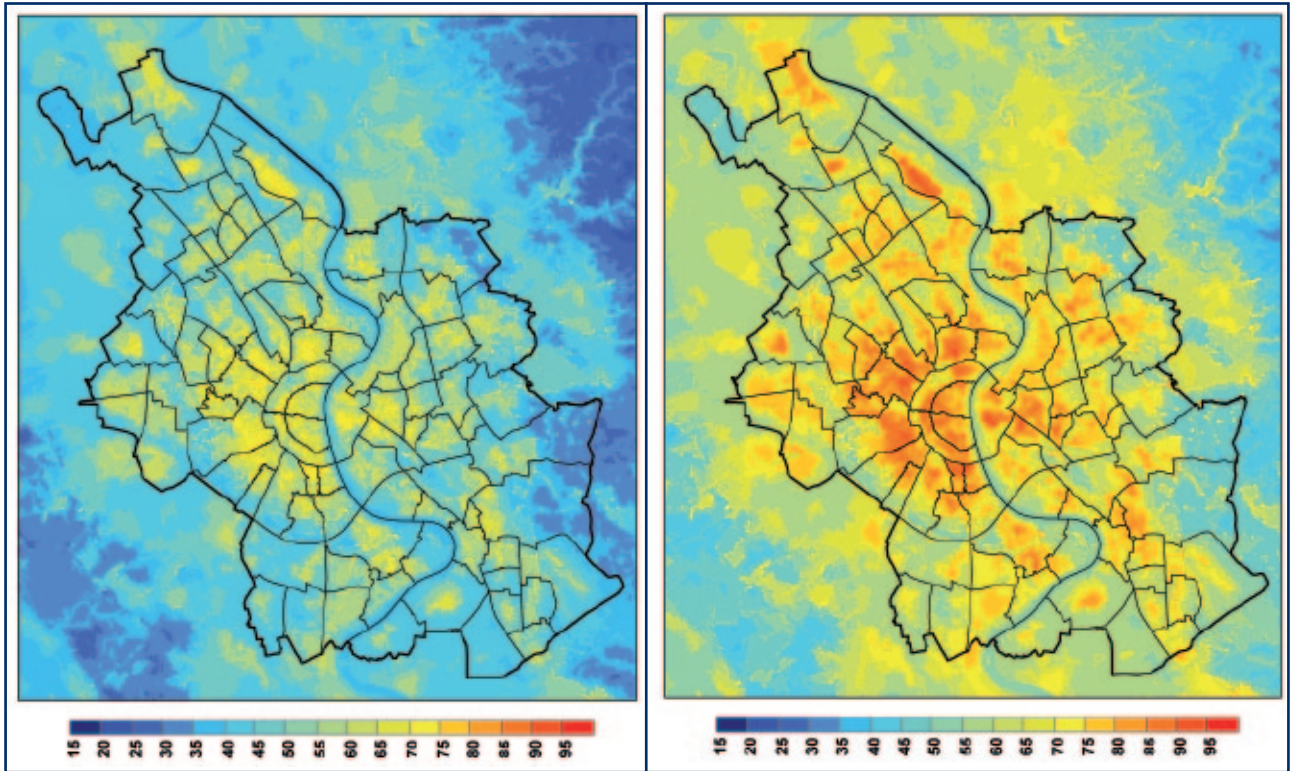


Abb. 4.30: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage im Modellgebiet für den Zeitraum 2021 bis 2050 unter Berücksichtigung der Flächennutzungsänderungen, basierend auf WETTREG (links) sowie STAR (rechts); Szenario A1B; für die beiden Karten wurde dieselbe Skalierung verwendet.

**Ergebnisse für die heißen Tage
(ohne Landnutzungsänderungen)**

Auch die maximale Anzahl der heißen Tage und die über das Stadtgebiet gemittelte Zahl (Mittelwert über alle Gitterpunkte) heißer Tage nimmt – im Vergleich zu den Berechnungen ohne Flächennutzungsänderungen – nur

geringfügig zu (siehe Kap. 1.3.2): Für das Mittel über das gesamte Stadtgebiet ist eine Zunahme der heißen Tage von derzeit (Periode 1971 bis 2000) acht bis neun auf zukünftig (2021 bis 2050) etwa 13 bis 20 Tage zu erwarten, was einer Zunahme von ca. 60 Prozent bis zum 1,5-fachen der Tage entspricht (Tabelle 4.4).



In den Gebieten, in denen das Klimaänderungssignal durch Bebauungsverdichtung oder Versiegelung überlagert ist, kann es zu einer deutlichen Zunahme von heißen Tagen kommen: Vergleicht man die Werte mit den nur durch den regionalen Klimawandel verursachten Maximalwerten an heißen Tagen, so zeigt sich, dass durch die zusätzliche Bebauungsverdichtung oder Versiegelung die maximale Änderung der Anzahl heißer Tage zunehmen wird, allerdings nicht in dem Umfang wie bei den Sommertagen: gesamte Zunahme um elf bis 26 Tage, davon durch den Klimawandel acht bis 22 Tage.

Die Abbildung 4.31 zeigt die Anzahl der heißen Tage für die Periode 2021 bis 2050 mit geplanter Landnutzungsänderung für REMO, CLM, WETTREG und STAR.

Tab. 4.4: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage für den Lauf EVAL (1971 bis 2000) und für REMO, CLM, WETTREG und STAR (2021 bis 2050) für die Situation „mit Planungsänderungen“: Maximale Anzahl (in Tagen als Differenz zum derzeitigen Klima (EVAL), in Tagen und Prozent und maximale Differenz je Gitterpunkt (GP)6); Mittelwert (über das Gebiet von Köln); Die Werte beziehen sich auf das Stadtgebiet.

Antrieb	Maximum				Mittelwert
	Tage (pro Jahr)	Differenz zu EVAL (Tage)	Differenz zu EVAL (%)	Differenz je GP (Tage pro Jahr)	Tage (pro Jahr)
EVAL	19,9				8,2
REMO	29,4	9,5	48	14,3	12,9
CLM	28,5	8,6	43	11,2	13,8
WETTREG	28,2	8,3	42	16,7	13,8
STAR	41,4	21,5	108	26,1	20,2

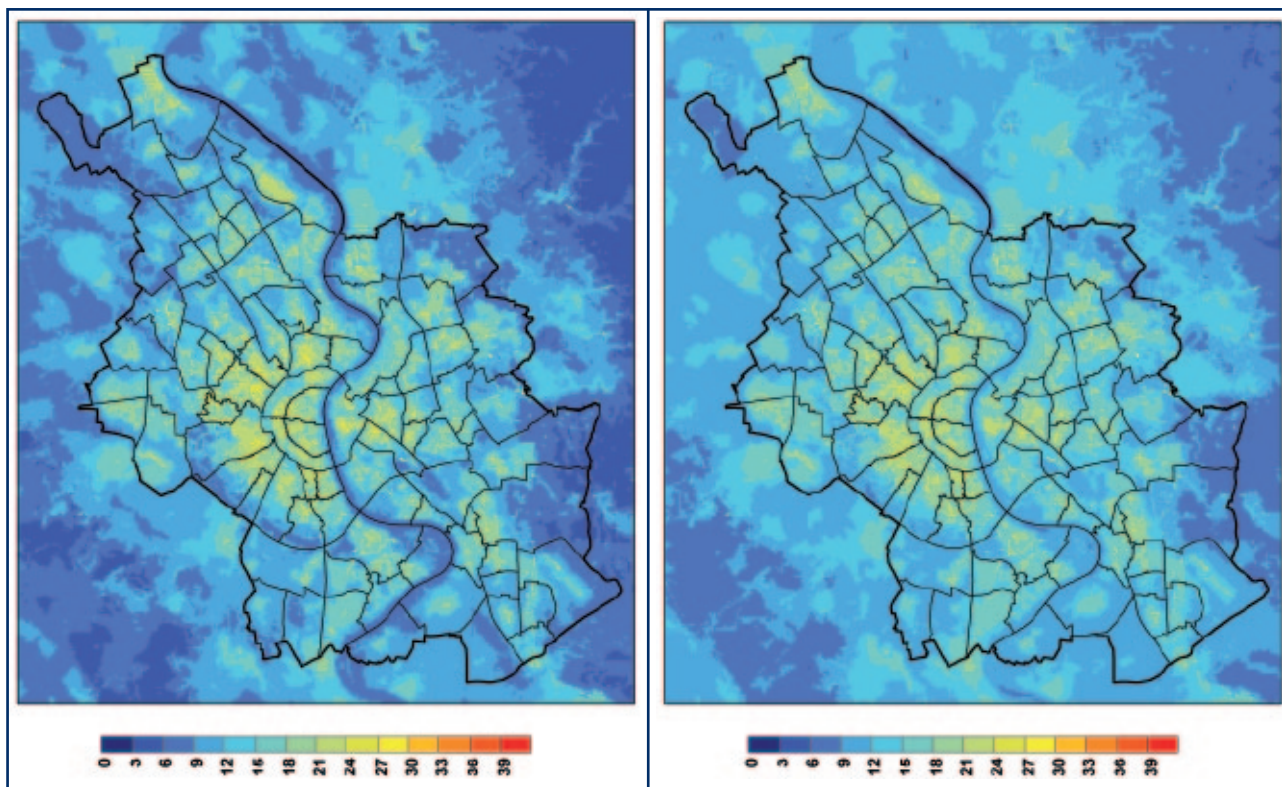


Abb. 4.31: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage im Modellgebiet für den Zeitraum 2021 bis 2050 unter Berücksichtigung der Flächennutzungsänderungen, basierend auf REMO (links) sowie CLM (rechts); Szenario A1B.

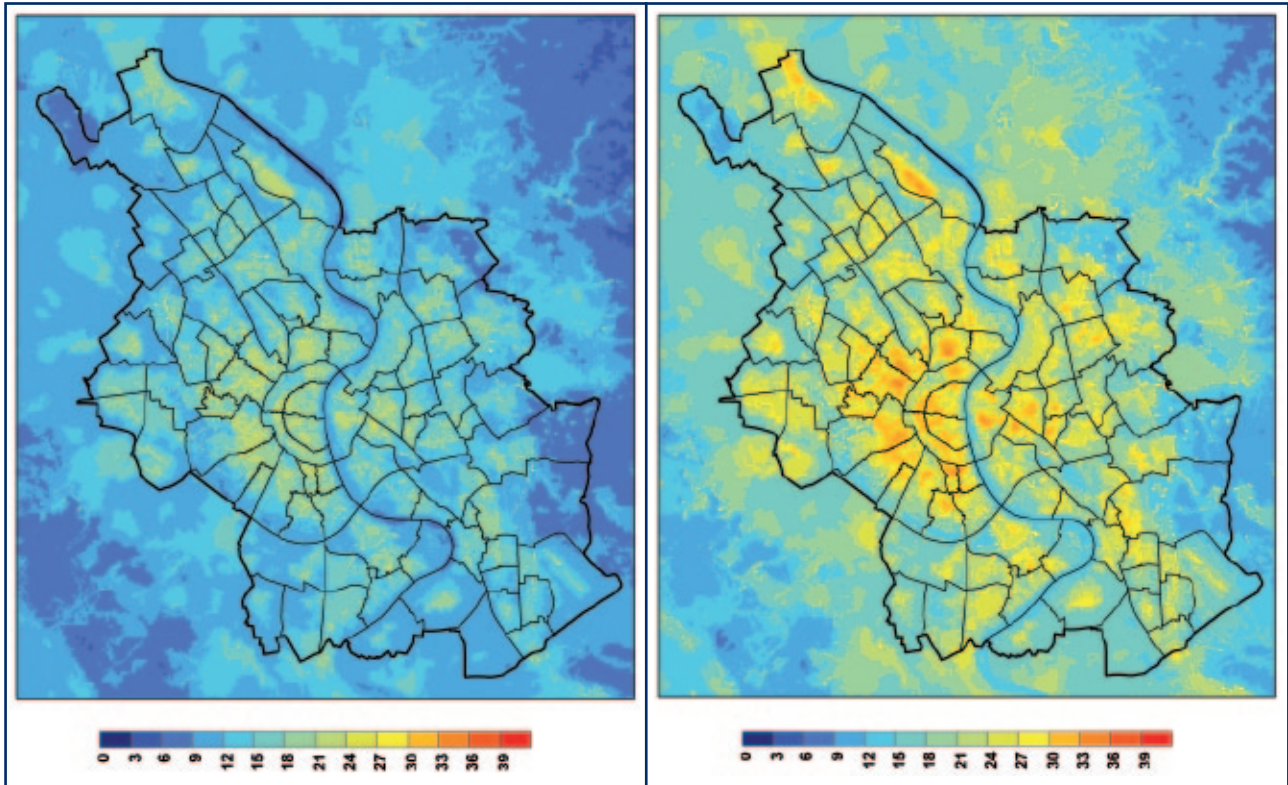


Abb. 4.31: Mittlere jährliche Anzahl der heißen Tage im Modellgebiet für den Zeitraum 2021 bis 2050 unter Berücksichtigung der Flächennutzungsänderungen, basierend WETTREG (links) sowie STAR (rechts); Szenario A1B.

4.4.3.4 Auswirkung der geplanten Bebauung im Zeitraum 2021 bis 2050 für ausgewählte Plangebiete

Für drei ausgewählte Plangebiete werden die Auswirkungen durch die veränderten Klimabedingungen (Periode 2021 bis 2050) und die geplanten Flächennutzungsänderungen untersucht. Es handelt sich um die Plangebiete „Sürther Feld“, „Frischezentrum Marsdorf“ und das „Gewerbe- und Industriegebiet Langel“.

Sürther Feld: Das Plangebiet hat eine Fläche von ca. 70 ha. An das Plangebiet grenzen Wohngebiete. Die Grundstücke innerhalb des Gebietes werden derzeit landwirtschaftlich genutzt. Nach den von der Stadt Köln zur Verfügung gestellten Unterlagen sind Einfamilien- und Doppelhäuser sowie Wohneinheiten im Geschosswohnungsbau (bis zu vier Geschosse) geplant.

Frischezentrum: Der Großmarkt soll nach 2020 von Bayenthal/Raderberg nach Marsdorf verlagert werden.

Dies hat der Rat der Stadt Köln am 13. Dezember 2007 beschlossen. Derzeit wird ein Verlagerungskonzept erarbeitet⁷. Für das neue Frischezentrum steht ein 16 Hektar großes städtisches Grundstück zur Verfügung. Derzeit besteht das Ersatzgelände weitgehend aus Flächen für die Landwirtschaft.

Gewerbegebiet Langel in Fühlungen/Merkenich⁸:

Bei dem genannten Plangebiet handelt es sich um ein bestehendes Gewerbe- und Industriegebiet, welches in nordwestlicher Richtung in mehreren Änderungs- und Erweiterungsschritten eine Neuordnung der zulässigen Nutzungen erfuhr, die Verlagerung einer Bundesstraße planungsrechtlich ermöglichte und letztlich einer führenden Lebensmittelgruppe die Errichtung beziehungsweise Erweiterung eines Frische- und Verteilungszentrums auf einer Fläche von etwa 14 Hektar ermöglichen sollte. Bei der bestehenden Nutzung handelt es sich im Wesentlichen um landwirtschaftliche Flächen.

⁷ <http://www.stadt-koeln.de/7/maerkte/grossmarkt/06947/>

⁸ <http://www.stadt-koeln.de/4/stadtplanung/bebauungsplaene/01724/>,

http://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/plaene/langel_6_aend_geltung.pdf

Die Abbildungen 4.32 und 4.33 zeigen die Lage der Planungsgebiete sowie die Anzahl der heißen Tage für die Varianten „derzeitige Flächennutzung“ und „zukünftige Flächennutzung nach Realisierung der Planungen“. Dargestellt ist die mittlere jährliche Anzahl an heißen Tagen für die Periode 2021 bis 2050. Verwendet wur-

den die Ergebnisse des regionalen Klimamodells STAR, welches die höchsten Werte des Ensembles aus den vier Regionalmodellen REMO, CLM, WETTREG und STAR liefert. Es beschreibt somit, bezogen auf das betrachtete Ensemble und das Szenario A1B, die maximal zu erwartenden Werte.

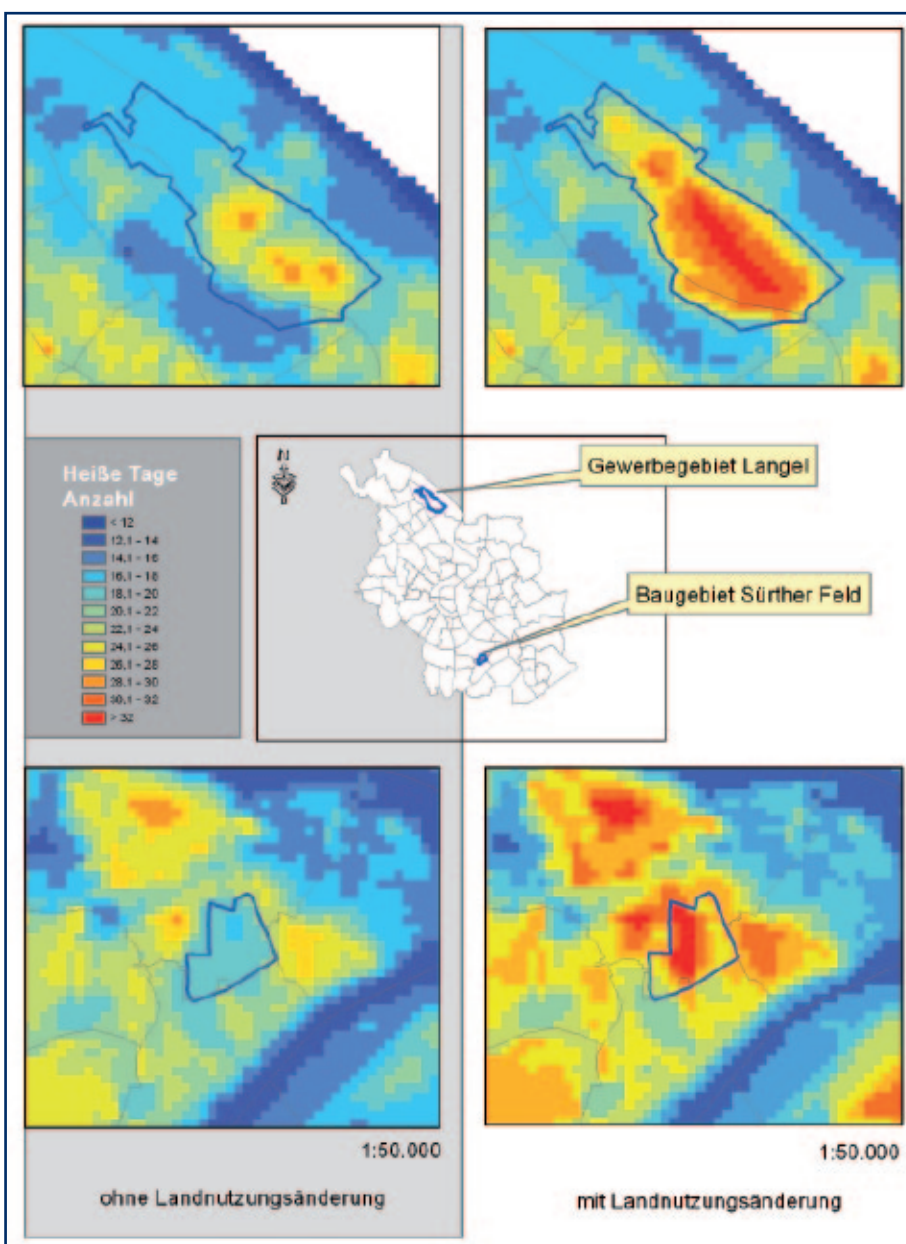


Abb. 4.32: Anzahl der heißen Tage mit der derzeitigen Landnutzung (links) und der geplanten zukünftigen Landnutzungsänderung (rechts) für die Plangebiete „Gewerbegebiet Langel“ (oben) und „Sürther Feld“ (unten); Projektionszeitraum: 2021 bis 2050; MUKLIMO_3-Rechnungen bei Verwendung der Ergebnisse des Regionalmodells STAR.

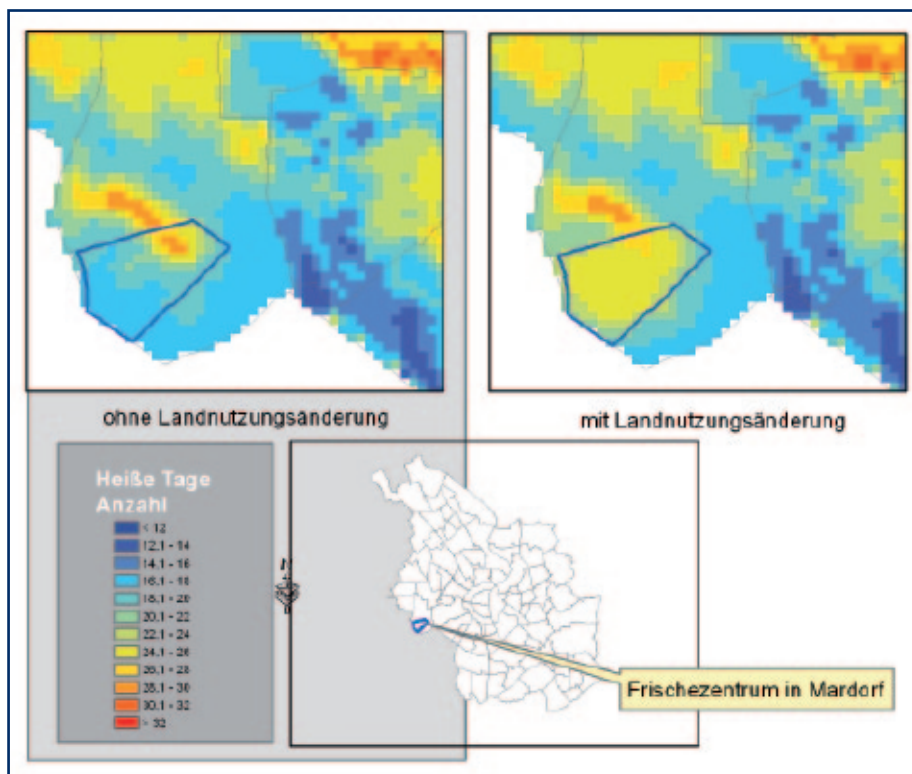


Abb.4.33: Anzahl der heißen Tage mit der derzeitigen Landnutzung (links) und der geplanten Landnutzungsänderung (rechts) für das Plangebiet „Frischezentrum Marsdorf“; Projektionszeitraum: 2021 bis 2050; Ergebnisse für das Regionalmodell STAR.

Alle drei Planungsgebiete zeigen für die Periode 2021 bis 2050 bei derzeitiger Landnutzungsstruktur im Vergleich zu dem stark wärmebelasteten Stadtzentrum von Köln – mit maximal 37 heißen Tagen – deutlich niedrigere Werte. So weist das bisher weitgehend landwirtschaftlich genutzte Sürther Feld (Abb. 4.32) nur Werte von 16 bis 20 heißen Tagen auf, ebenso wie das Gebiet Frischezentrum im westlichen Bereich (Abb. 4.33). Das Gebiet Langel ist in Teilbereichen bei heutiger Landnutzung (Gewerbe- und Industriegebiet) mit bis zu 28 heißen Tagen deutlich stärker wärmebelastet als die beiden anderen Plangebiete.

Durch die geplanten Flächennutzungsänderungen erhöht sich die Zahl der heißen Tage deutlich. Durch die geplante Wohnbebauung im Plangebiet Sürther Feld steigt die mittlere jährliche Zahl auf 24 bis 26, im zentralen Bereich auf mehr als 32 heiße Tage, was einer Verdoppelung der Zahl der heißen Tage durch die Flächennutzungsänderungen entspricht. Auch in den anderen Plangebieten steigt die Anzahl der heißen Tage dort besonders stark an, wo sich bisher landwirtschaftlich genutzte Flächen befinden. Im Bereich des neuen Frischezentrums nehmen die heißen Tage von etwa 16 bis 18 auf bis zu 26 Tagen zu. Im Gebiet Langel werden nach Realisierung der Ergänzungs- und Erweiterungsbauten Werte bis über 32 heiße Tage erwartet.

Zusammenfassung

Die Modellrechnungen zeigen, dass die Zahl der Sommertage bis Mitte des Jahrhunderts für das Stadtgebiet Köln, im Vergleich zu den derzeitigen klimatischen Verhältnissen, um 30 bis 70 Prozent, für die heißen Tage um 60 bis 150 Prozent zunehmen. Insgesamt nehmen diese klimatischen Kenntage in allen Stadtteilen um etwa denselben Betrag zu, das heißt, das „Hitzeniveau“ wird fast gleichmäßig angehoben.

Besonders zu betrachten sind Flächennutzungsänderungen in Bereichen, die bisher Freiflächen oder landwirtschaftlich genutzte Flächen sind: Die heute dort noch geringe Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen würde bis Mitte des Jahrhunderts bei einer erheblichen

Verdichtung (z. B. durch Wohnbebauung oder Gewerbeflächen) eine deutliche Zunahme erfahren, die wesentlich höher sein kann als in bereits stark versiegelten Bereichen.

Dies macht deutlich, dass bei Planungsvorhaben darauf zu achten ist, dass die Zunahme an Sommertagen und heißen Tagen (als Maß für die Wärmebelastung) durch den Klimawandel nicht durch eine ungünstige Flächennutzungsänderung noch deutlich verstärkt wird. Diese Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit, bereits in einem frühen Planungsstadium mit Hilfe von Stadtklimamodellen klimatisch optimierte Planungsvarianten zu erarbeiten, um eine Verstärkung der Wärmebelastung zu vermeiden.

Literatur

- Bongardt, B., 2006: Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks – Essener Ökologische Schriften, Bd. 26, Westarp-Wissenschaften, 227 S.
- Früh, B., Becker, P., Deutschländer, T., Hessel, J.-D., Koßmann, M., Mieskes, I., Namyslo, J., Roos, M., Sievers, U., Steigerwald, T., Turau, H., Wienert, U., 2011a: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *J. Appl. Meteor. Clim.*, Vol. 50, No. 1, 167-184.
- Früh, B., Koßmann, M. und Roos, M., 2011b: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 237, 68 S.
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201106095249>
- Kendon, E. J., Rowell, D. P., Jones, R. G., Buonomo, E., 2008: Robustness of future changes in local precipitation extremes. *J. Clim.*, 21, 4280–4297, doi:10.1175/2008JCLI2082.1.
- Nakicenovic, N., Swart, R., (Eds.), 2000: Emissions scenarios – Summary for policymakers. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 20 pp.
- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, S. 332–336.

4.5 Extremwertstatistische Auswertungen von stündlichen Radarniederschlagsdaten

Die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen (Kap. 4.6) mit örtlichen Überschwemmungen erfordert für eine Vorsorge die möglichst genaue zeitliche und räumliche Kenntnis solcher Ereignisse.

Die bisherigen Verfahren, wie das KOSTRA-DWD-2000-Verfahren¹, beruhen auf dem vorhandenen Niederschlagsmessnetz und liefern eine nicht hinreichend hohe räumliche Auflösung. Für das Stadtgebiet Köln wird hier erstmalig untersucht, ob extremwertstatistische Auswertungen von einstündigen – mit Stationsdaten angeeichten – flächendeckenden Radarniederschlagsdaten für Köln ein realistisches, räumlich differenziertes Niederschlagsfeld liefern, was dann auch zusammen mit Kanalnetzmodellierungen für die Ableitung von Maßnahmen genutzt werden kann.

In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse der Radardatenauswertung nach Arbeitsblatt DWA-A 531 (DWA 2012) für den Zeitraum Juni 2005 bis Dezember 2011 gezeigt (Abb. 4.34): Dargestellt werden – je Gitterpunkt

von etwa 1 km mal 1 km – die höchsten in einer Stunde aufgetretenen Werte der angeeichten Radarniederschlagsdaten (in mm, entspricht l/m²). Der Raum Köln wird durch 1681 RADOLAN-Rasterfelder belegt. Zu den Stadtteilgrenzen sind die in diesem Gebiet vorhandenen DWD-Stationen (SY = synoptische Stationen; RR = Niederschlagsstationen) eingezeichnet.

Die angewandte extremwertstatistische Methode der sogenannten partiellen Serien (Kap. 3.5) liefert im oben genannten Zeitraum für einige Gitterpunkte einstündige Niederschlagswerte von mehr als 50 mm. Diese Werte liegen um mehr als das Doppelte höher als der maximale gemessene Niederschlagswert an den vier stündlich messenden Stationen im Messgebiet: Am 29.06.2005 wurde der maximale Wert mit 24 mm pro Stunde an der Messstation Köln-Bonn festgestellt.

Diese örtlich begrenzten Gebiete mit maximalen RADOLAN-Werten sind durch – vom Radar flächendeckend erfasste – konvektive Niederschlagsereignisse

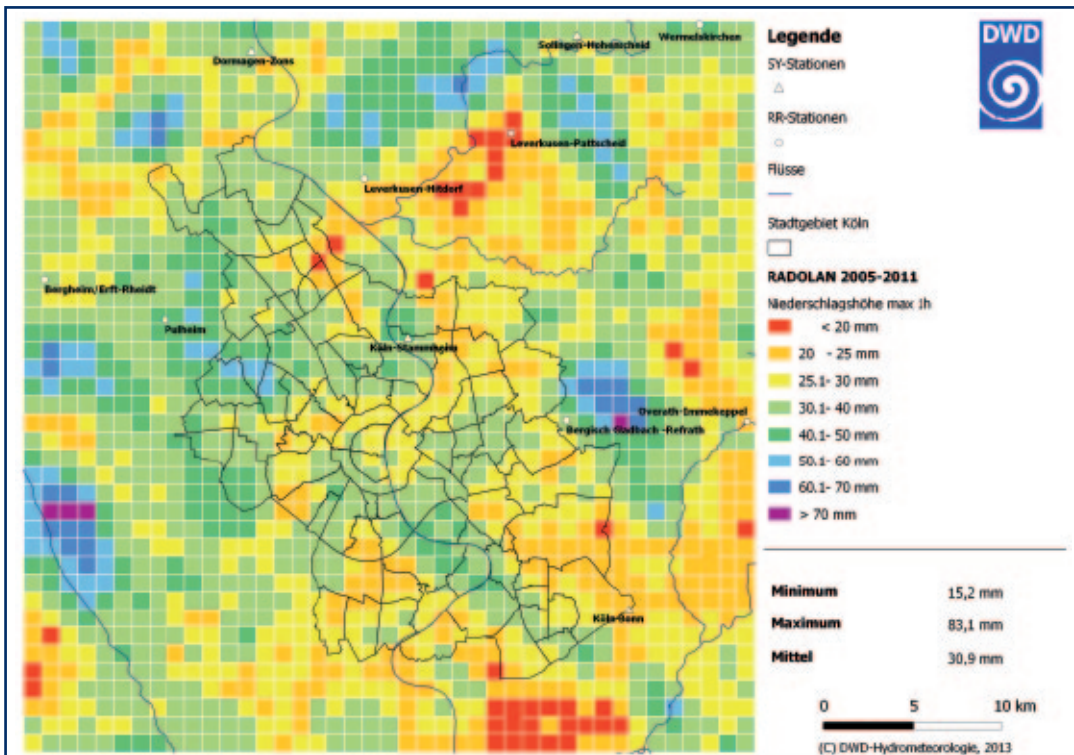


Abb. 4.34: Größte durch Radarmessungen erfasste 1-h-Werte der Niederschlagshöhe (in mm); Untersuchungsperiode: Juni 2005 bis Dezember 2011; Region Köln.

1 www.dwd.de/kostra

in einzelnen unterschiedlichen Stunden während der 6,5-jährigen Zeitspanne verursacht und als realistisch zu betrachten. Das Ereignis mit der maximalen stündlichen Niederschlagshöhe fand westlich von Köln statt (83,1 mm/h am 26.07.2008 um 16:50 UTC bei Horrem an der Erft).

Zur Darstellung von Extremniederschlagsereignissen werden sogenannte Dauer- und Wiederkehrzeiten-Tabellen auf der Basis extremwertstatistischer Analysen erstellt (Kap. 3.5): Für einen Ort oder ein Gebiet können damit Aussagen getroffen werden, wie hoch zum Beispiel die Niederschlagsmenge eines einstündigen Niederschlagsereignisses ist, mit dem einmal pro Jahr zu rechnen ist.

Hier wird nun gezeigt, welche Ergebnisse die extremwertstatistischen Analysen der RADOLAN-Radardaten

- für die Dauerstufe eine Stunde ($D = 1$ h) und eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal pro Jahr (Wiederkehrzeit $T = 1$ a (Abb. 4.35 oben) sowie
- für die Dauerstufe eine Stunde und eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von einmal in zehn Jahren ($T = 10$ a) (Abb. 4.36 oben)

liefern.

In den Abbildungen 4.35 und 4.36 sind zum Vergleich auch die mit KOSTRA-DWD-2000 ermittelten Starkniederschlagshöhen dargestellt.



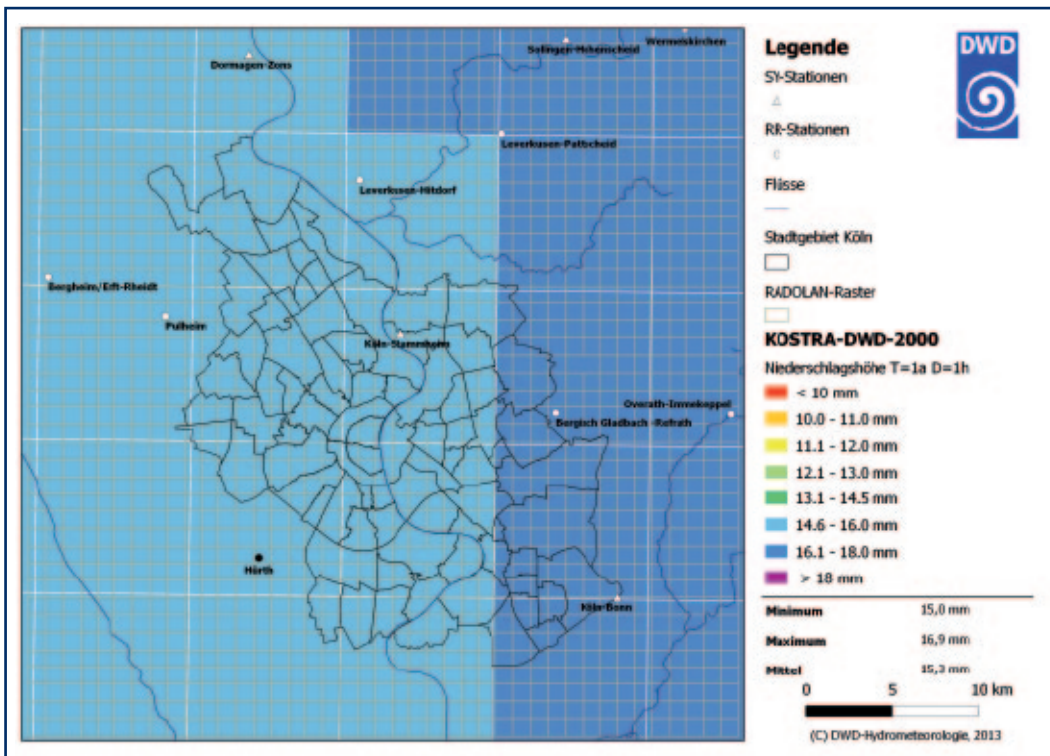
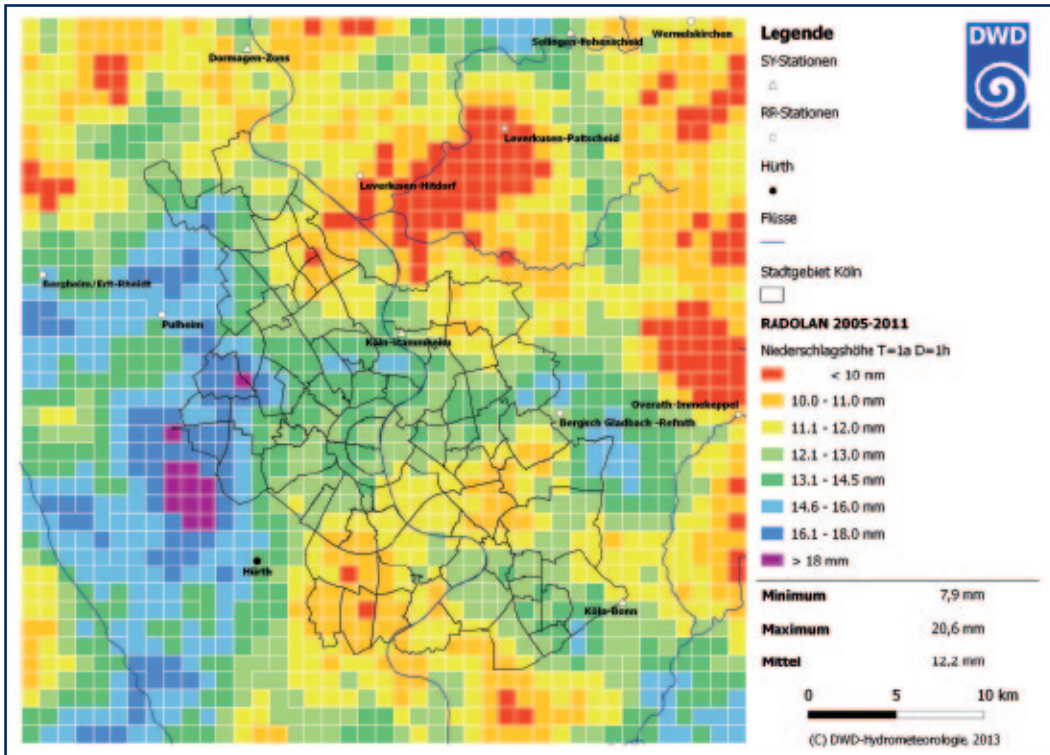


Abb. 4.35: Extremwertstatistisch ermittelte Starkniederschlagshöhen (laut DWA-A 531) in der Region Köln für die Dauerstufe D = 1 Stunde und das Wiederkehrintervall T = 1 Jahr aus radarbasierten Niederschlagsmessungen (oben) und mit KOSTRA-DWD-2000 (unten); für beide Abbildungen wurden die gleichen Klassengrenzen gewählt.

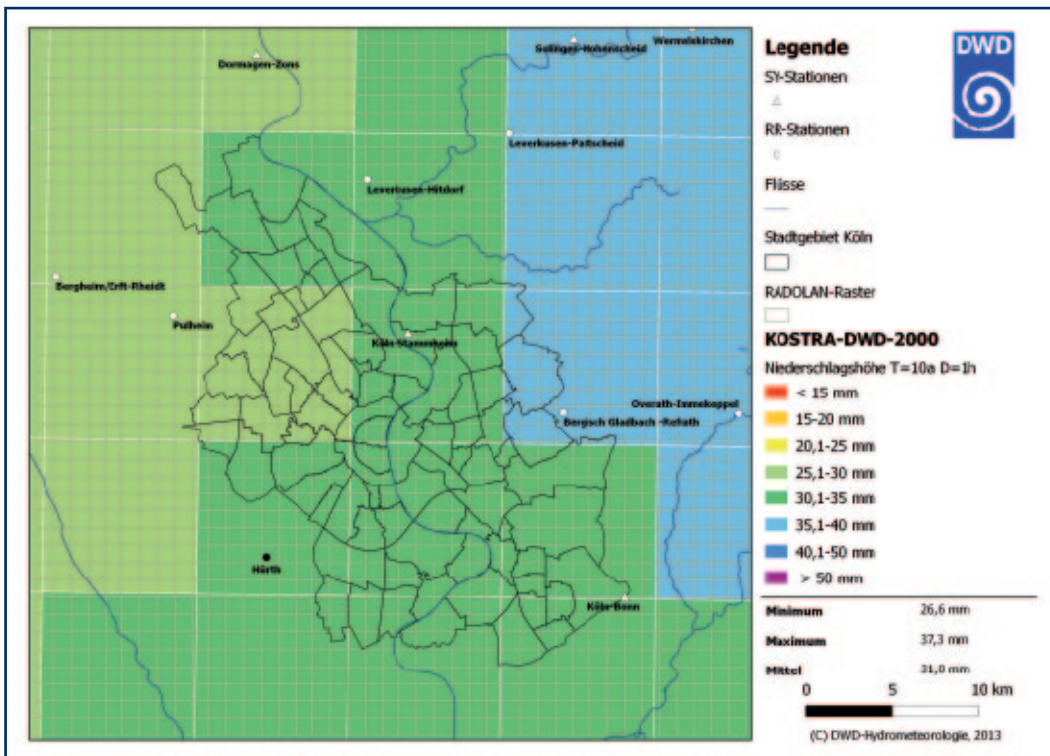
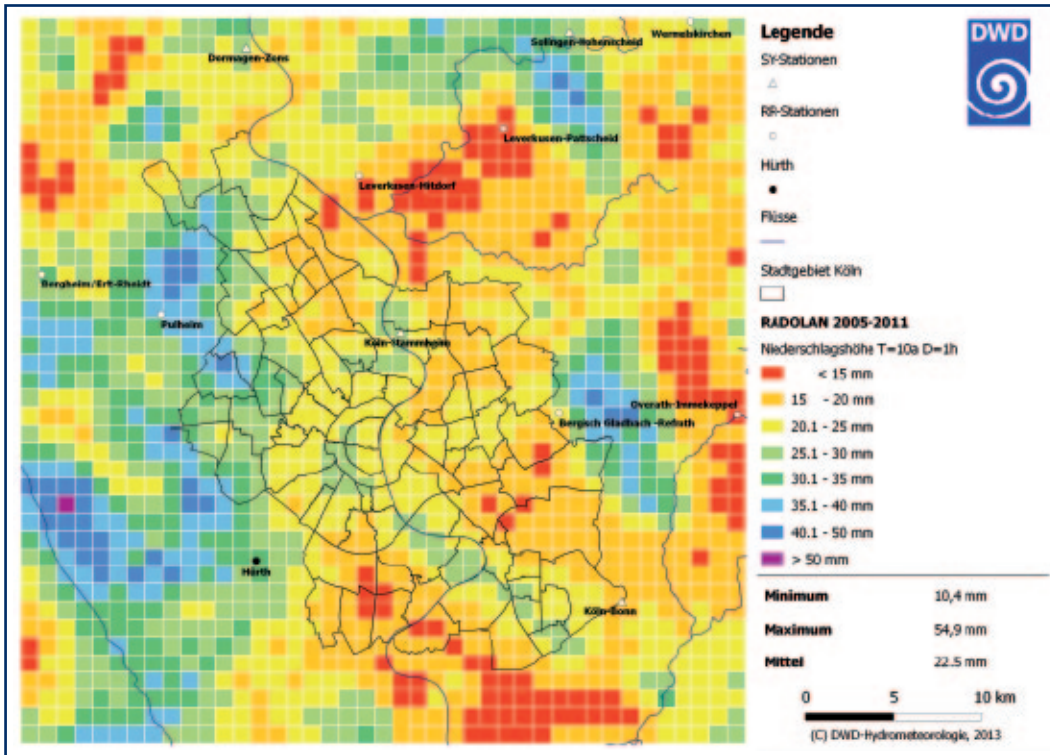


Abb. 4.36: Extremwertstatistisch ermittelte Starkniederschlagshöhen (laut DWA-A 531) in der Region Köln für die Dauerstufe D = 1 Stunde und das Wiederkehrintervall T = 10 Jahre aus radarbasierten Niederschlagsmessungen (oben) und mit KOSTRA-DWD-2000 (unten); für beide Abbildungen wurden die gleichen Klassengrenzen gewählt.

Den Abbildungen 4.35 und 4.36 ist unter anderem zu entnehmen, dass in den westlichen Stadtteilen von Köln im Mittel

- einmal pro Jahr (a) innerhalb von einer Stunde (h) mit einer Niederschlagshöhe von $h_N(1h;1a) = 14,6$ bis 18 mm zu rechnen ist. Ein Pixel weist sogar Werte von mindestens 18 mm auf. Das heißt, einmal pro Jahr fallen dort innerhalb von einer Stunde 14,6 bis über 18 Liter Niederschlag auf eine Fläche von einem Quadratmeter.
- einmal in zehn Jahren innerhalb von einer Stunde mit einer Niederschlagshöhe von $h_N(1h;10a) = 25,1$ bis 40 mm zu rechnen ist. Ein Pixel erreicht sogar Werte von mehr als 40 mm. Das heißt, einmal in zehn Jahren fallen dort innerhalb von einer Stunde 25,1 bis über 40 Liter Niederschlag auf eine Fläche von einem Quadratmeter.

Die Starkniederschlagshöhen laut KOSTRA-DWD-2000 für diese beiden Andauer- und Wiederkehrzeit-Kombinationen betragen bei $T = 1$ Jahr rund 15,5 mm und bei $T = 10$ Jahre ca. 30 mm (s. a. Abb. 4.35 und 4.36). Wenn gleich die Größenordnungen für beide Wiederkehrintervalle im Mittel getroffen werden, so ist die Spannweite für die aus radarbasierten Niederschlagsmessungen ermittelten Starkniederschlagshöhen im Raum Köln sehr hoch. Für jeden Quadratkilometer liegt eine extremwertstatistisch ermittelte Starkniederschlagshöhe vor. Diese hohe räumliche Auflösung wird erst durch die Radardaten ermöglicht und erklärt auch die hohe Spannweite gegenüber den auf der Basis von Stationsdaten ermittelten Ergebnissen von KOSTRA-DWD-2000.

Die Auswertung der Radarniederschlagsdaten ergibt eine Variationsbreite für die Kombination „Dauer eine Stunde/Wiederkehrzeit ein Jahr“ von acht bis 21 mm in der Region Köln. Sie ist größer als die mit dem KOSTRA-DWD-2000-Verfahren ermittelte Variationsbreite von 15 bis 17 mm. Der Mittelwert über das gesamte Gebiet ist für die Radarniederschlagsdaten etwas geringer als der KOSTRA-DWD-2000-Wert.

Gleiches gilt für die Wiederkehrzeit von zehn Jahren: Der Variationsbreite bei den Radarniederschlagsdaten von zehn bis 55 mm stehen die entsprechenden Werte von 26 bis 38 mm der KOSTRA-DWD-2000-Auswertungen gegenüber. Auch hier ergeben die Radarniederschlagsdaten im Mittel über das gesamte Gebiet eine leicht geringere Starkniederschlagshöhe als die KOSTRA-DWD-2000-Auswertungen.

Eine Bewertung dieser Ergebnisse muss die unterschiedlichen Zeitspannen berücksichtigen. Daher wurden die stationsbasierten täglichen Niederschlagshöhen nach dem Regionalisierungsverfahren REGNIE (DWD 2009) für die beiden Zeitspannen von 1951 bis 2000 (Grundlage für KOSTRA-DWD-2000) sowie für Juni 2005 bis Dezember 2011 (Radarniederschlagsdaten) ausgewertet.

In Tabelle 4.5 sind die prozentualen Änderungen der minimalen, mittleren und maximalen Niederschlagshöhen des Mittelwertes für das Jahr, den Winter (Monate Dezember bis Februar) und den Sommer (Monate Juni bis August) sowie die Anzahl der Tage mit mindestens 20 mm Niederschlag innerhalb der Region Köln für die Zeitspanne vom Juni 2005 bis Dezember 2011 im Vergleich zur Zeitspanne von 1951 bis 2000 angegeben.

Tab. 4.5: Prozentuale Änderungen für vier statistische Kenngrößen für die Region Köln aus stationsbasierten Niederschlagsmessungen nach REGNIE (grüne Zahlen: geringe Abnahme; rote Zahlen: markante Zunahme von $\geq 10\%$); Referenz: 1951 bis 2000; Angaben in Prozent.

Zeitspanne → ↓ Kenngröße	Jahr (06-11)	Winter (06-11)	Sommer (05-11)
Minimum	-2,23	-9,62	9,39
Mittel	0,38	-2,08	12,01
Maximum	4,07	1,14	13,15
20 mm/d	14,41	6,06	26,47

Die mittleren stationsbasierten Niederschlagshöhen für die 50-jährige Zeitspanne bewegen sich im Raum Köln zwischen 605,1 und 1288,5 mm für das Jahr, zwischen 124,8 und 359,9 mm für den Winter sowie zwischen 195,9 und 328,4 mm im Sommer. Für die jüngere Zeitspanne von 06/2005 bis 12/2011 sind die Werte für das Jahr und den Winter auf einem relativ ähnlichen Niveau. Die Werte für den Sommer fallen allerdings deutlich höher aus: Beim Mittel ist ein um zwölf Prozent höherer Wert festzustellen.

Die Auswertung hinsichtlich der Anzahl von Tagen mit einer Niederschlagshöhe von mindestens 20 mm pro Tag zeigt, dass diese Regenereignisse in der hier betrachteten jüngeren Zeitspanne von 06/2005 bis 12/2011 um 14,4 Prozent im Gesamtjahr und um 26,5 Prozent im Sommer häufiger aufgetreten sind, als in der klimatologischen Zeitspanne von 1951 bis 2000.

Die höhere räumliche Variabilität der extremwertstatistischen Ergebnisse für die radarbasierten Niederschlagsdaten wird hauptsächlich durch die sommerlichen, räumlich begrenzten konvektiven Niederschlagsereignisse verursacht. Diese lokalen Starkniederschlagsereignisse im Sommer können durch die mittels nur weniger Stationen interpolierten REGNIE-Daten nicht wiedergegeben werden (Abb. 4.37). Im Stadtgebiet von Köln dominiert die in erster Linie durch die Orographie aufgeprägte Zunahme des Niederschlages von West (Gebiet im Lee der Ville) nach Ost (Anstieg zum Bergischen Land). Diese Verteilung wird bei den Radarniederschlagsdaten durch die konvektiven Starkniederschlagsereignisse überlagert und liefert ein deutlich differenzierteres räumliches Bild (Abb. 4.38). So sind lokale Maxima sowohl etwas westlich des Stadtgebietes an der Grenze zu Köln-Junkersdorf (eher konvektiv geprägt) als auch in den nordöstlichen Stadtteilen von Köln (eher orographisch geprägt) zu erkennen.

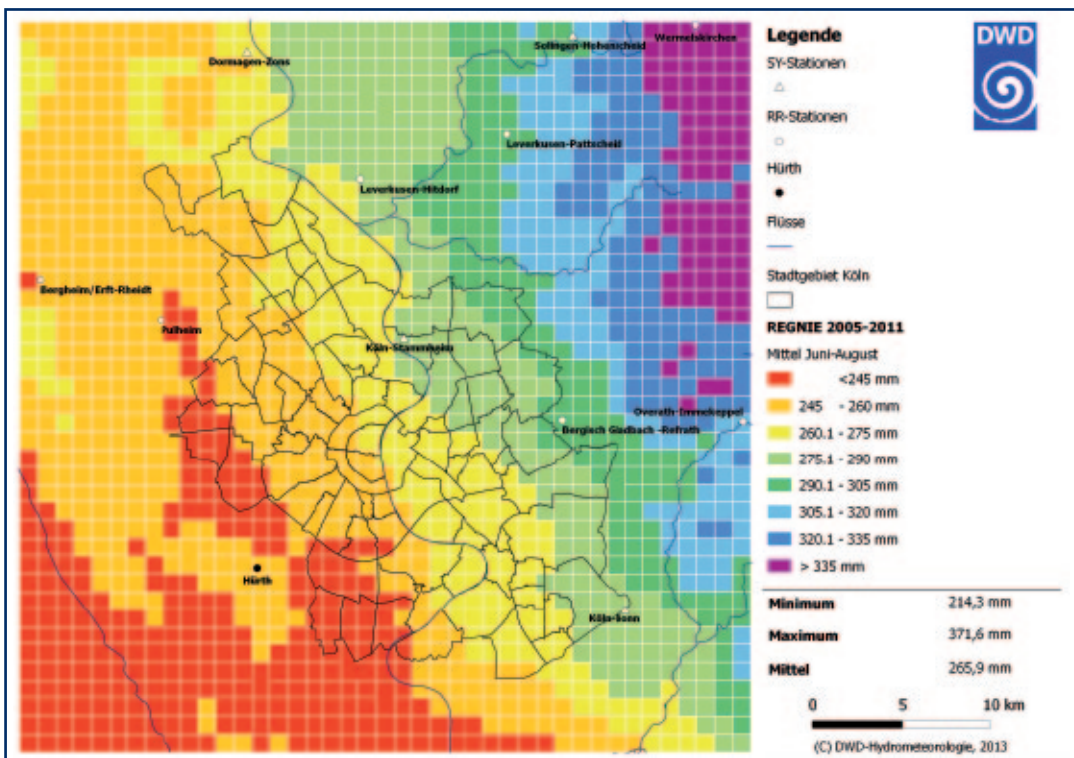


Abb. 4.37: Mittlere Sommerniederschlagsverteilung für 2005 bis 2011 aus stationsbasierten Niederschlagsmessungen nach dem REGNIE-Verfahren.

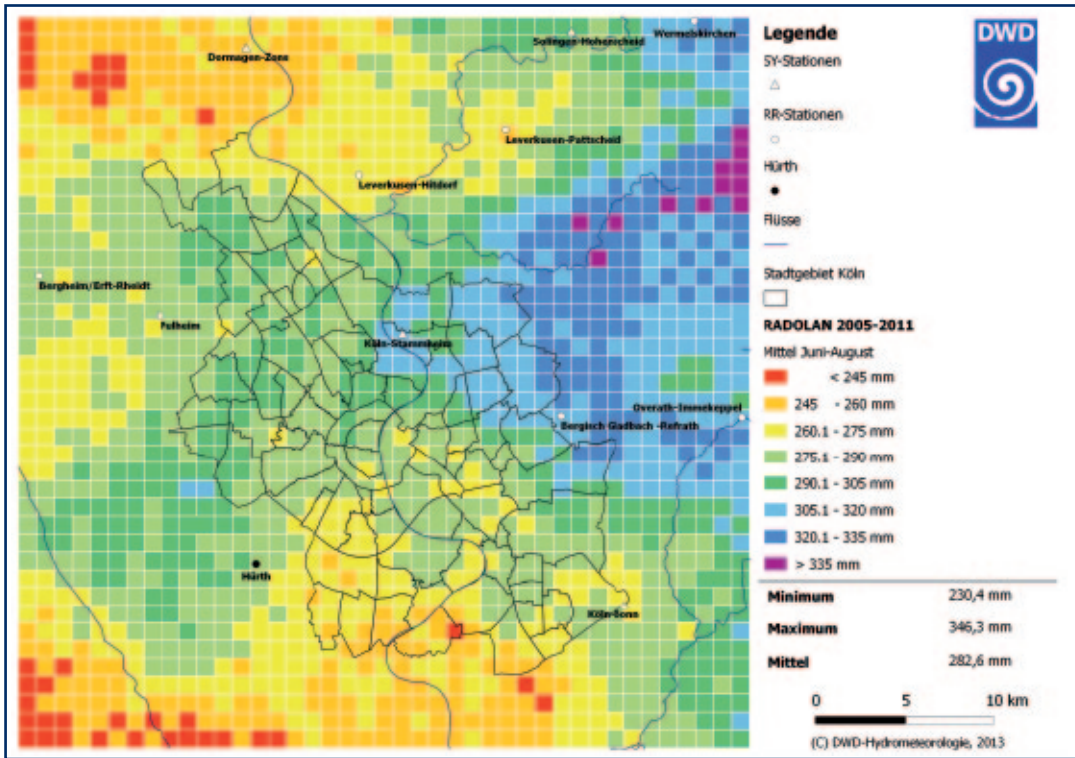


Abb. 4.38: Mittlere Sommerniederschlagsverteilung für 2005 bis 2011 aus radarbasierten Niederschlagsmessungen nach dem RADOLAN-Verfahren.

In der Konsequenz ist aus fachlicher Sicht eine Relativierung der oben erstellten Aussagen zu den extremwertstatistischen Ergebnissen erforderlich. Die Größenordnung dieser Relativierung ist auf Basis dieser Studie nicht durchführbar und sollte mittels weiterer statistisch fundierter Analysen angegangen werden.

Es ist außerdem offensichtlich, dass radarbasierte Niederschlagsanalysen für starkregenorientierte Auswertungen unabdingbar sind.



Zusammenfassung

Es wurde erstmalig eine extremwertstatistische Auswertung anhand von stündlichen, routinemäßig vorliegenden angeeichteten Radarniederschlagsdaten erstellt. Die Radardaten wurden einer ausführlichen Qualitätskontrolle unterzogen, um fehlerhafte Werte zu beseitigen. Für die Niederschlagsdauer von einer Stunde wurden die Niederschlagsmengen für die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von „einmal pro Jahr“ und „einmal in zehn Jahren“ in einem flächendeckenden Raster (1 km mal 1 km Felder) für den Raum Köln erstellt.

Im Vergleich mit bisherigen Verfahren, wie KOSTRA-DWD-2000, basierend auf konventionellen Niederschlagsstationen, wird offensichtlich, dass radarbasierte Niederschlagsanalysen für starkregenorientierte Auswertungen unabdingbar sind. Sie liefern ein räumlich differenzierteres Bild und erfassen sommerliche, konvektionsbedingte Starkniederschlagsereignisse wesentlich besser als vereinzelte bodengestützte Niederschlagsstationen.

Die ersten Ergebnisse extremwertstatistischer Auswertungen radarbasierter Niederschläge zeigen einige Gebiete, die in der betrachteten Zeitspanne stärkere Niederschläge als die jeweils benachbarten Gebiete

erfahren haben. Es stellt sich die Frage, ob diese Gebiete tatsächlich, also zum Beispiel aufgrund besonderer geographischer oder meteorologischer Gegebenheiten, eine andere Niederschlagsklimatologie aufweisen, oder aber ob die betrachtete 6,5-jährige Zeitspanne die Auswertung zu sensibel gegenüber seltenen Extremereignissen macht und die räumliche Verteilung der Maxima durch zufällige Einzelereignisse bestimmt ist. Die vorgestellten Ergebnisse entsprechen dem Stand der Forschung. Nicht zuletzt aufgrund der bisher nur wenige Jahre umfassenden radarbasierten Zeitreihe kann die Güte der Ergebnisse noch nicht abschließend beurteilt werden.

Zur besseren Abschätzung von extremen Niederschlagsereignissen auf dem Stadtgebiet von Köln werden in naher Zukunft einheitlich qualitativ hochwertige, für quantitative Niederschlagsauswertungen verwendbare Radardaten flächendeckend ab dem Jahr 2001 (sogenannte RADOLAN-Reanalyse) beim DWD verfügbar sein. Auf Basis dieser Daten wird eine radarbasierte Niederschlagsklimatologie realisiert werden können. Damit steht dann als eine weitere Datengrundlage für stadtplanerische Maßnahmen eine hochaufgelöste räumliche Verteilung der Niederschlagssummen (Jahresbasis oder Jahreszeiten), aber auch zu Starkniederschlagsereignissen, zur Verfügung.

Literatur

- DWA 2012: Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Arbeitsblatt DWA-A 531, September 2012, 29 S.
- DWD, 2009: Deutscher Wetterdienst, Regionalisierte Niederschlagshöhen REGNIE www.dwd.de/hydrometeorologie

4.6 Niederschlagstrends in Köln auf der Basis regionaler Klimamodellierung und Extremwertstatistik

Für eine Abschätzung der Veränderung von Extremniederschlägen in Köln bis Mitte des Jahrhunderts, werden Zeitreihen stündlicher Niederschlagssummen des regionalen Klimamodells HIRHAM5 des Dänischen Wetterdienstes (DMI) verwendet (Kap. 3.6). Abbildung 4.39 zeigt das Ergebnis für die neun Gitterpunkte im Raum Köln für das 99 Prozent-Perzentil der Stundensummen des Niederschlags. Auf Stundensummen bezogen bedeutet das 99. Perzentil eine Jährlichkeit $T = 0,01$ (ca. 88 Stunden pro Jahr). Die Überschreitungshäufigkeit bis Mitte des Jahrhunderts beträgt ca. 1,1 bis 1,36. Dies bedeutet, dass Niederschlagsereignisse (Anzahl der Stunden pro Jahr) – die oberhalb des 99. Perzentilwertes (der Periode 1961 bis 2000) liegen bis Mitte des Jahrhunderts um etwa zehn bis 40 Prozent¹ häufiger auftreten werden.

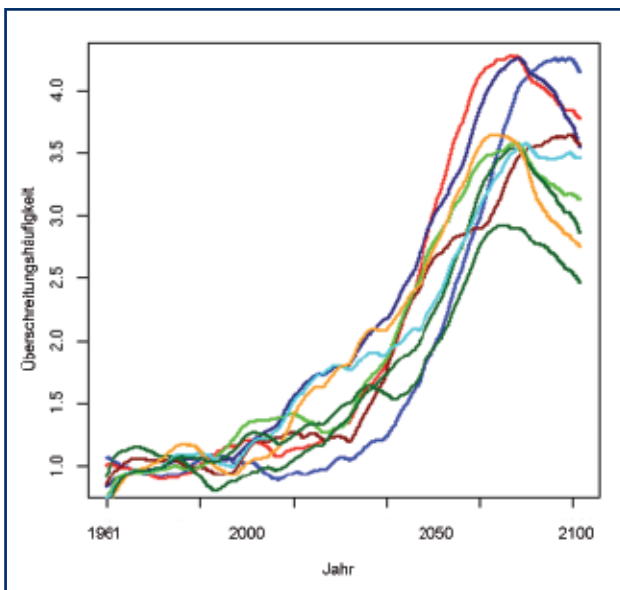


Abb. 4.39: farbige Linien: Verlauf der Überschreitungshäufigkeit von 1961 bis 2100 für die neun betrachteten Gitterpunkte im Raum Köln; Schwellwert: 99 %-Perzentil; Überschreitungshäufigkeit 1 (100 %): Mittelwert über die Jahre 1961 bis 2000; Basis: Extremwertstatistische Analyse von Einstunden-Zeitreihen, Modell: HIRHAM5, Szenario A1B (Kap. 3.6).

Um einen Zusammenhang zu den Ergebnissen der Fallstudie „Klimawandel und Überflutungsrisikobetrachtungen mit Einsatz neuer Niederschlag-Abfluss-Modelle“ (Kap. 5.2) herzustellen, wurde als weiteres Beispiel die Jährlichkeit $T = 1$ (ein Ereignis pro Jahr) betrachtet. Diese entspricht – bei Stundensummen – dem 99,9886 Prozent-Perzentil. Abbildung 4.40 zeigt den Verlauf der Überschreitungshäufigkeiten für die neun betrachteten Gitterpunkte. Bis Mitte des Jahrhunderts ergibt sich eine Zunahme der Überschreitungshäufigkeit von 1 (im Mittel der Jahre 1961 bis 2000) auf 1,35 bis 2,9 zur Mitte des Jahrhunderts. Dies bedeutet, dass Niederschlagsereignisse, die in der Periode 1961 bis 2000 im Mittel einmal pro Jahr aufgetreten sind, bis Mitte des Jahrhunderts 40 bis knapp 200 Prozent häufiger auftreten werden.

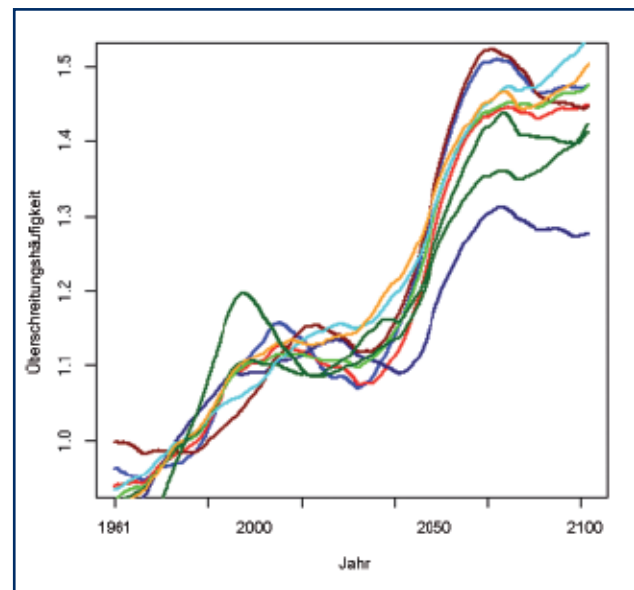


Abb. 4.40: farbige Linien: Verlauf der Überschreitungshäufigkeit von 1961 bis 2100 für die neun betrachteten Gitterpunkte im Raum Köln; Schwellwert: 99,9886 %-Perzentil (Jährlichkeit $T = 1$); Überschreitungshäufigkeit 1 (100 %): Mittelwert über die Jahre 1961 bis 2000; Basis: Extremwertstatistische Analyse von stündlichen Zeitreihen, Modell: HIRHAM5, Szenario A1B (Kap. 3.6).

¹ Die Spannweite ergibt sich durch Betrachtung der Werte der Überschreitungshäufigkeiten des Zeitraums 2045 bis 2055.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass bis Mitte des Jahrhunderts Niederschlagsereignisse mit hohen (stündlichen) Niederschlagsmengen häufiger auftreten werden. Dies wird durch andere Untersuchungen gestützt, zum Beispiel durch die extremwertstatistischen Analysen im Rahmen der Fortschreibung von KOSTRA-DWD (Malitz 2013). Während die Ensembles der Klimaprojektionen für Deutschland und für das Jahresmittel des Niederschlags kaum eine Veränderung bis zur Mitte des Jahrhunderts feststellen (www.dwd.de/klimaatlas), zeigen verschiedene Untersuchungen, dass die Häufigkeit von Niederschlagsereignissen mit großen Niederschlagsmengen zunehmen wird (z. B. Deutschländer, Dalelane 2012; Sunyer et al. 2012).

Trotzdem sind die oben gezeigten Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren, da sie auf nur einem Rechenlauf beruhen. Erst ein Ensemble von Rechenläufen und ein detaillierter Nachweis der Anwendbarkeit der Modelle zur Simulation konvektiver Niederschlagsereignisse kann den Ergebnissen mehr Sicherheit geben.

Literatur

- Deutschländer, T., Dalelane C., 2012: Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht, Oktober 2012.
- Malitz, G., 2013: Persönliche Mitteilung.
- Sunyer, M., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., Rosbjerg, D., 2012: Effects of climate model interdependency on the uncertainty quantification of extreme rainfall projections. UrbanRain 12, 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, Switzerland, 6-9 December 2012.



5 Fallstudien

Zusätzlich zu den Untersuchungen, die im Rahmen des Projektes für das ganze Stadtgebiet Köln durchgeführt wurden (Kap. 4), wurden zwei Bereiche in Köln für die kleinräumigen Untersuchungen ausgewählt. Solche detaillierten Betrachtungen sind erforderlich, um daraus konkrete Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel abzuleiten.

Im Rahmen der Thematik „Wärmebelastung“ wurde das Büro Dr. Düttemeyer Umweltmeteorologie, Essen, vom LANUV NRW beauftragt, den städtebaulichen Planentwurf „Großmarktgelände Raderberg“ in Köln hinsichtlich der humanbioklimatischen Auswirkungen an Sommertagen mit Hitzestress sowie hinsichtlich der Austauschbedingungen zu untersuchen (LANUV 2012). Das Kapitel 5.1 enthält die wichtigsten Ergebnisse des Gutachtens.

Im Bereich „Starkniederschläge“ wurde ein Teilgebiet des Kölner Stadtteils Porz als Beispielgebiet ausgewählt, für das detaillierte Überflutungsbetrachtungen mit einem hydrodynamischen Kanalnetzmodell (DYNA®/GeoCPM®) durchgeführt wurden. Für die überflutungsgefährdeten Bereiche im Untersuchungsgebiet wurden Sanierungsvarianten untersucht und deren Auswirkungen modelltechnisch abgebildet. Diese Studie wurde im Auftrag des LANUV NRW von der Dr. Pecher AG in enger Zusammenarbeit mit den StEB Köln durchgeführt (LANUV 2011). Im Kapitel 5.2 sind die wichtigsten Ergebnisse der Studie vorgestellt.

5.1 Human-bioklimatische Bewertung für den Gestaltungsplan eines Teils des Großmarktgeländes in Köln

5.1.1 Einleitung

Der städtebauliche Planentwurf „Großmarktgelände Raderberg“ in Köln wurde hinsichtlich der human-bioklimatischen Auswirkungen auf den **Hitzestress** an Sommertagen und auf sommerliche **Austauschbedingungen** untersucht. Anlass ist die geplante Süderweiterung der Innenstadt auf dem Großmarktgelände in Köln-Raderberg (Abb. 5.1), das derzeit ein hoch versiegeltes Gewerbegebiet darstellt und einer neuen Nutzung einschließlich Wohnfunktion zugeführt werden soll.

Um den Planentwurf in Relation zur aktuellen Situation bewerten zu können, wurden die Untersuchungen sowohl mit Blick auf den geplanten als auch den Ist-Zustand durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde anschließend der Planentwurf hinsichtlich des thermischen Komforts und der Durchlüftung städtebaulich **optimiert** und nach weiteren Simulationen erneut bewertet.

Da insbesondere die Frage nach der thermischen Behaglichkeit und Belüftungssituation im Vordergrund steht, wurden fünf verschiedene sommerliche **Witterungsszenarien** untersucht.

- Szenario 1: **Sehr warmer Sommertag** während einer windschwachen, strahlungsreichen Wetterlage mit trockenen Böden zur Beurteilung der Wärmebelastung.
- Szenario 2: Bedeckter, **windiger Sommertag** zur Untersuchung der Durchlüftungsverhältnisse.
- Szenario 3: **Normaler Sommertag** mit mittleren sommerlichen Witterungsverhältnissen als Vergleichsszenario.
- Szenario 4: **Heißer Tag**; wie Szenario 1, aber sehr heiß und windschwach sowie mit bewässerten Böden („Worst-Case-Situation“).
- Szenario 5: **Heißer Tag mit hellen Fassaden**; wie Szenario 4, aber unter der Annahme einheitlich heller Gebäudefassaden.

Die Berechnungen wurden mit dem dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklimamodell ENVI-met, Version 3.1® (Bruse und Fleer 1998) durchgeführt. Die horizontale räumliche Auflösung beträgt vier Meter.

Zur Beschreibung der thermischen Verhältnisse und der Durchlüftungsverhältnisse wurden die meteorologischen Größen Lufttemperatur (hier als potenzielle Lufttemperatur angegeben, die als normale Lufttemperatur aufgefasst werden kann), Wind (Windgeschwindigkeit und Strömungsverhältnisse) und die thermische Behaglichkeit berechnet und ausgewertet.

Zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit wird der PMV-Wert (predicted mean vote) nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (VDI 2008) verwendet. Ähnlich wie bei der Berechnung der Gefühlten Temperatur (Kap. 3.3) wird bei der Bestimmung des Wärmereizes/Hitzestresses mit dem PMV-Wert – im Sinne eines Energiebilanzmodells des Menschen – neben der Lufttemperatur und der Luftfeuchte der Einfluss der Windgeschwindigkeit, der solaren Strahlung und der körperlichen Aktivität berücksichtigt. Die PMV-Skala reicht von -3,5 (sehr kalt) bis 3,5 (sehr heiß, Hitzestress).

5.1.2 Untersuchungsgebiet

Ist- und Plan-Zustand

Das ca. 40,5 Hektar große Plangebiet „Großmarkt“ in Köln-Raderberg liegt ca. 1,5 Kilometer südlich der Kölner Innenstadt sowie 800 Meter westlich des linken Rheinuferes. Es handelt sich um ein Gewerbegebiet, das durch eine Bahntrasse im Norden, die Bonner Straße im Osten, die Marktstraße im Süden und den Bischofsweg im Westen begrenzt wird (Abb. 5.1, links).

Der Planentwurf sieht für das Großmarktgelände eine Neugestaltung vor (Abb. 5.1, rechts). Ausgenommen sind hiervon die Großmarkthalle und der Bürohauskomplex an der Kreuzung Bonner Straße/Marktstraße.

Am nördlichen und südlichen Gebietsrand sind auf Flächen von ca. zehn Hektar beziehungsweise ca. 16 Hektar große Gebäudeensembles aus gemischter Büro- und Wohnbebauung geplant, die durch eine zentrale, west-östlich orientierte, ca. 13 Hektar große Grünfläche (Park) miteinander verbunden sind.



Abb. 5.1: Luftbild zum Ist-Zustand des ENVI-met-Simulationsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg links (blaue Grenze: Plangebiet) und der Planentwurf rechts (Darstellung mit 4,2° Nordabweichung. Bildquelle: GeoServer NRW der IT.NRW (2012), Luftbildstand: 20.08.2010).

Optimierter Plan-Zustand

Der Planentwurf wurde in einem nächsten Schritt stadtklimatisch optimiert (Abb. 5.2).



Abb. 5.2: Optimierter Planentwurf des ENVI-met-Simulationsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg (Darstellung mit 4,2° Nordabweichung. Bildquelle: GeoServer NRW der IT.NRW (2012), Luftbildstand: 20.08.2010).

Dabei wurden folgende das Klima verbessernde Grundmodifikationen angestrebt:

- Schutz der südlichen bis westlichen Gebäudefasaden gegen Aufheizung durch solare Einstrahlung mittels Baumpflanzungen.
- Verbesserung der Durchlüftung innerhalb der Quartiere:
 - Orientierung der Straßenzüge in Richtung der beiden Hauptwindrichtungen Südost und West,
 - Vergrößerung der Gebäudeabstände,
 - Öffnung enger oder geschlossener Innenhöfe.
- Bepflanzung des Parks nach dem sogenannten Savannenprinzip, das durch Grasflächen und einzelnstehende Bäume/Baumgruppen mit schattigen Zonen des thermischen Komforts geprägt ist, ohne die Durchlüftung wesentlich zu beeinträchtigen.

Im Folgenden werden im Hinblick auf die Durchlüftung und die Wärmebelastung die wichtigsten Ergebnisse der Studie – Szenario 4 „Heißer Tag mit bewässerten Böden“ – vorgestellt.

5.1.3 Szenario – Heißer Tag mit bewässerten Böden

Dieses Szenario spiegelt den typischen Tag einer Hitzewelle wieder, an dem mit sehr hohen thermischen Belastungen zu rechnen ist. Es werden Tageshöchsttemperaturen von mindestens 30 °C („heißer Tag“) erreicht. Die Windverhältnisse sind mit Geschwindigkeiten von ca. 0,6 m/s aus südöstlichen Richtungen äußerst schwach. Mangelnde Durchlüftung führt zu Hitzestau im Quartier. Nächtliche Abkühlung findet kaum oder nur langsam statt. Diese Situation führt regelmäßig zu Hitzestress. Dieses Szenario liegt für den Plan-Zustand sowie den optimierten Plan-Zustand vor.

5.1.3.1 Tagsituation (15.00 Uhr MEZ)

Diese Situation zur heißesten Stunde des Tages stellt den Worst-Case für die Wärmebelastung dar.

5.1.3.1.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur erreicht um 15.00 Uhr für den Plan-Zustand innerhalb des Simulationsgebietes Werte zwischen 26,0 und 30,3 °C (Abb. 5.3). Die niedrigsten Temperaturen – mit weniger als 26,6 °C – werden durch großflächige Beschattung im Stammraum der Gehölze des Vorgebirgsparks (im Westen des Planentwurfs) erreicht. Im Bereich kleinerer Baumgruppen und Wiesen, insbesondere im Park, ist die Lufttemperatur infolge höherer Sonneneinstrahlung etwas höher. Hohe Temperaturen oberhalb von 28 °C treten im Umfeld versiegelter Flächen und Gebäude auf. Insbesondere im Straßenraum von hohen Gebäuden kommt es infolge dunkler Asphaltdecken und aufgeheizter Fassaden zum Hitzestau (> 29 °C). Bei flacheren Gebäuden sind die Lufttemperaturen um ca. 1 bis 2 K niedriger (ca. 28 °C). In den Innenhöfen der geplanten Gebäude ist das thermische Niveau mit 27,0 bis 28 °C ebenfalls deutlich niedriger als im Straßenraum, da die Innenhöfe nicht versiegelt sind und damit eine geringere Aufheiztendenz haben.

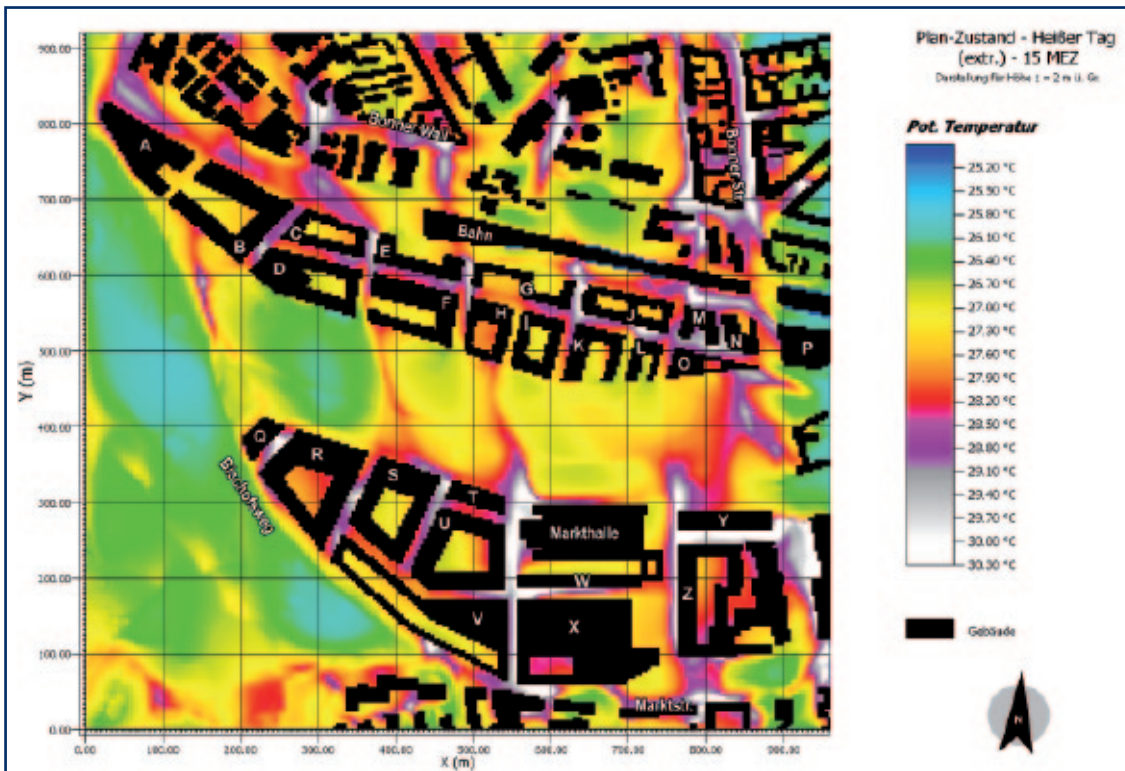


Abb. 5.3: Verteilung der potenziellen Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

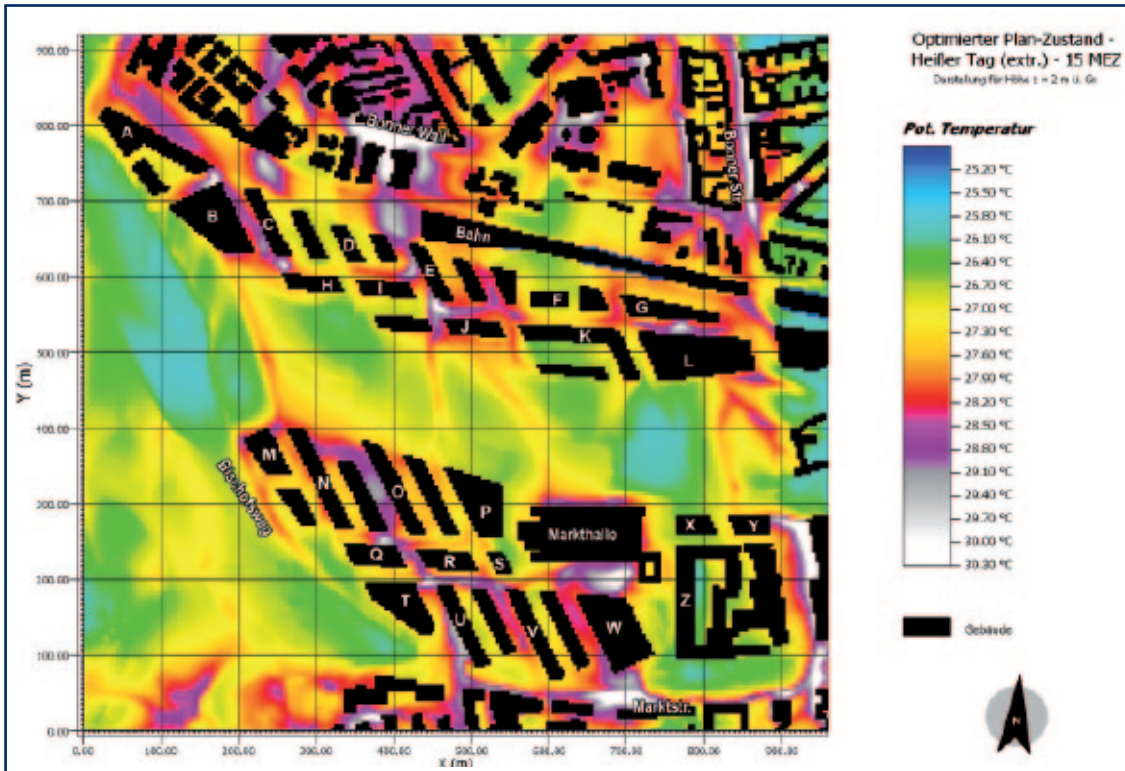


Abb. 5.4: Verteilung der potenziellen Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. im optimierten Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

Abbildung 5.4 zeigt die Verteilung der Lufttemperatur um 15.00 Uhr eines heißen Tages für den optimierten Plan-Zustand.

Die Lufttemperatur erreicht für den optimierten Plan-Zustand innerhalb des Simulationsgebietes Werte zwi-

schen 26,0 und 30,3 °C. Im Vergleich zum Planentwurf konnte das thermische Niveau insgesamt verbessert werden. Insbesondere im westlichen Umfeld der Markthalle sowie im westlichen und nördlichen Umfeld des Gebäudes Z sinkt die Lufttemperatur um beachtliche 3,8 K von 30,3 auf ca. 26,5 °C.



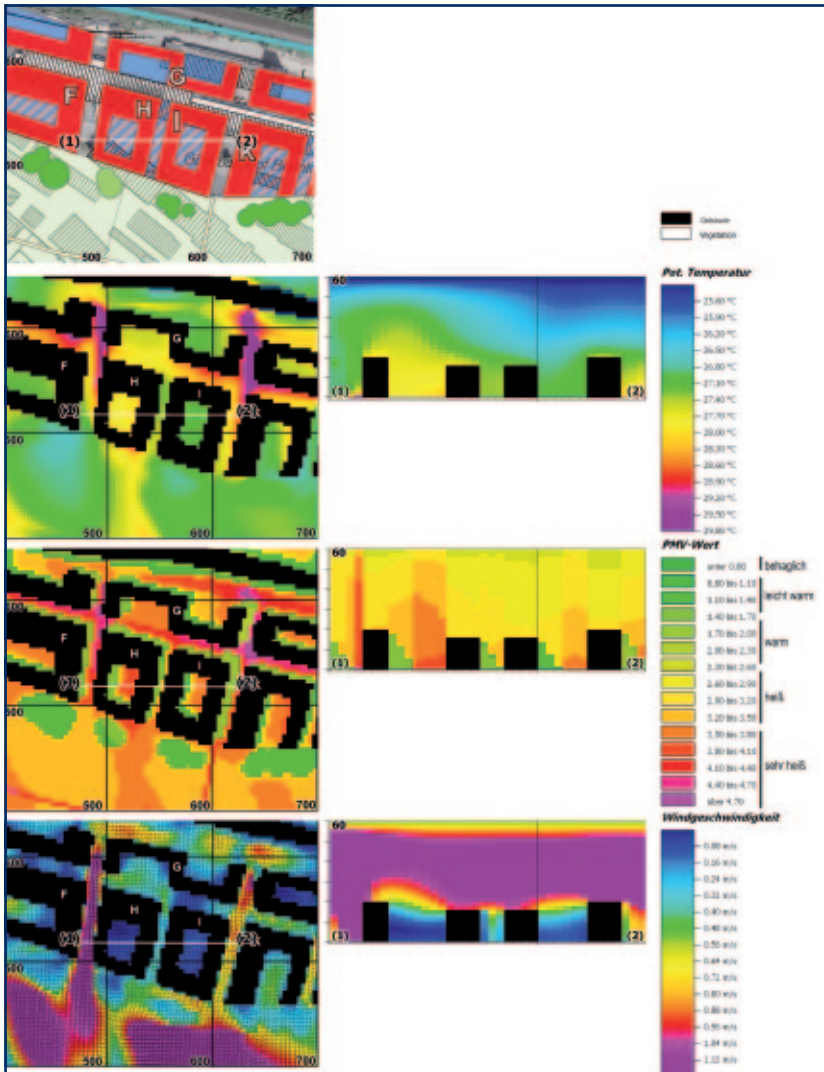


Abb. 5.5: Vergrößerter Beispielausschnitt zur Verteilung der potenziellen Lufttemperatur, der thermischen Behaglichkeit PMV und des Windfeldes in 2 m ü. Gr. (links) sowie im Vertikalschnitt (rechts) im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

Die unterschiedlichen Erwärmungseffekte für Oberflächen aus Asphalt, unversiegelten, nackten Böden und Rasenflächen wird anhand der exemplarischen **Detailvergrößerung mit Vertikalprofilen** entlang der geplanten Gebäude F, H, I und K in Abbildung 5.5 deutlich. Die obere Reihe zeigt die Verteilung der Lufttemperatur in der Aufsicht (links) sowie im 60 Meter hohen Vertikalschnitt (rechts). Die asphaltierte Straße verläuft zwischen den Gebäuden G, H und I von Nordwest nach Südost und weist in den besonnten Kreuzungsbereichen Lufttemperaturen von knapp 30 °C auf. In den Innenhöfen der Gebäude H und I sind die Temperaturen niedriger. Im H-Gebäudehof befindet sich anstatt der

Asphaltdecke ein unversiegelter, aber nackter Boden, der sich weniger aufheizt und mit 27,5 °C um 1,5 K kühler als die Straßendecke ist. Der Hof des I-Gebäudes ist vollständig mit Rasen bedeckt, so dass hier die Aufheizung des Untergrundes mit 27 °C am niedrigsten und damit mit der Parkwiese vergleichbar ist.

Im Vertikalschnitt ist zu erkennen, dass über dem wärmeren Innenhof des H-Gebäudes die Warmluftblase auf ca. 30 bis 40 Meter aufsteigt und dabei auch die Dächer der beiden Gebäudeflügel einschließt, während am I-Gebäude die etwas kühlere Luft nur leicht über das Gebäude herausragt.

Auch innerhalb der neuen nördlichen und südlichen Quartiere ist an vielen Stellen eine Temperaturabnahme von bis zu 1,5 K zu verzeichnen. Dieses gilt insbesondere für die nun mit Rasen begrünten Innenhöfe, wie der Detailausschnitt in Abbildung 5.6 für die Gebäude N und O zeigt. Dort ist auch zu erkennen, dass die Wärme abstrahlende, asphaltierte Straßenschlucht zwischen den Gebäuden N und O um mindestens 2 K wärmer ist und als Warmluftblase bis in eine Höhe von ca. 40 Metern reicht.

Die dunkel asphaltierten, zur Aufheizung neigenden Straßenzüge bilden aus thermischer Sicht das einzig verbleibende Problem der neuen optimierten Quartiere, so dass weiterer Optimierungsbedarf besteht.

5.1.3.1.2 Thermische Wirkung von Dachbegrünungen

Die Wärmebelastung in Gebäuden während Hitzewellen ist unter anderem auf die Aufheizung der besonders sonnenexponierten Dächer zurückzuführen. Dachbegrünungen können dieser Dachaufheizung entgegenwirken.

Hier wurde mit dem Modell ENVI-met berechnet, wie Dachbegrünungen um 15.00 Uhr eines heißen Tages

auf die Lufttemperatur im Außenbereich wirken. Zu diesem Zweck wurde ein Gebäude ohne Dachbegrünung aus dem ersten Planentwurf (Gebäude X) mit einem Gebäude mit Dachbegrünung aus dem optimierten Planentwurf (Gebäude W) verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Die linke Spalte zeigt das unbegrünte Gebäude X, während rechts das Gebäude W mit Dachbegrünung zu sehen ist. In der mittleren Bildreihe sind die Lufttemperaturen in Höhe des Dachniveaus (16 m ü. Gr.) als Karte einschließlich skizzierter Gebäudeumrisse dargestellt. Die untere Bildreihe zeigt die dazugehörigen Vertikalschnitte bis zur Modellobergrenze (60 m ü. Gr.).

An den heißesten Dachstellen erreicht das unbegrünte Dach eine Lufttemperatur von 29,5 °C und das begrünte Dach von 28,5 °C. Die Temperaturdifferenz beträgt somit 1,0 K. Dass die Unterschiede nicht größer sind und die Überwärmung nicht die jeweilige gesamte Dachfläche abdeckt, ist neben der großen Modellschichtdicke des verwendeten Rechenmodells vor allem auf den Wind zurückzuführen, der in dieser Höhe das Temperaturfeld deutlich verwischt. Aus diesem Grund ist am rechten Gebäude W auch eine nach Nordosten abziehende Warmluftfahne zu erkennen. Beim linken Gebäude X hingegen sind die jenseits des Gebäudewestrandes auftretenden hohen Temperaturen auf die Wärmeabstrahlung der besonnenen und ungeschützten Westfassade sowie der darunter liegenden, asphaltierten und damit überwärmten Straßenschlucht zurückzuführen, wie der Vertikalschnitt in der unteren Bildreihe zeigt. Die Westfassade des rechten

Gebäudes W ist hingegen durch eine Baumreihe gegen Aufheizung geschützt. In den Vertikalschnitten ist ferner zu erkennen, dass sich über den Dächern jeweils unterschiedlich warme Warmluftblasen bilden, die bis in eine Höhe von ca. 30 m ü. Gr. reichen.

Ein Einfluss der Lufttemperatur im Dachniveau auf die Lufttemperatur in Bodennähe kann nicht festgestellt werden und wird auch nicht erwartet, da die zu dieser Tageszeit dominierende Konvektion die aufsteigende warme Luft nach oben abtransportiert.

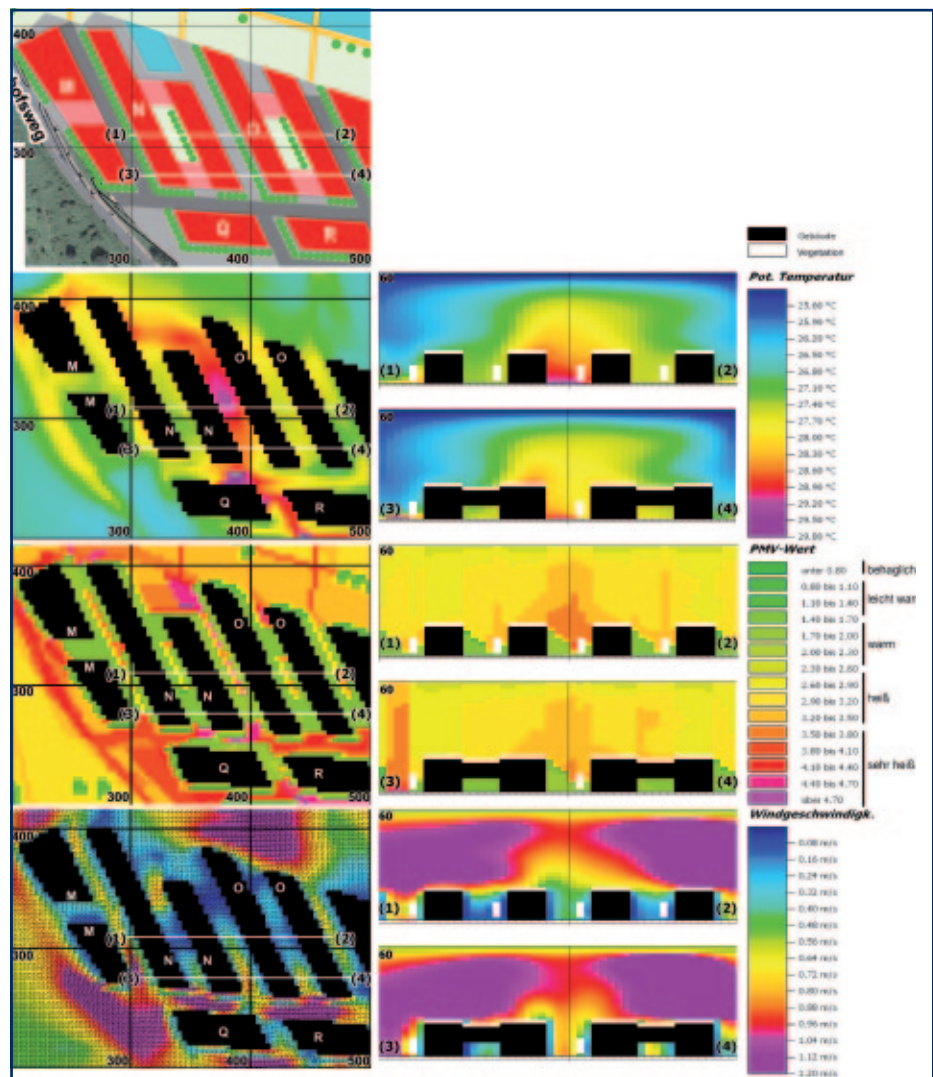


Abb. 5.6: Vergrößerter Beispielausschnitt zur Verteilung der potenziellen Lufttemperatur, der thermischen Behaglichkeit PMV und des Windfeldes in 2 m ü. Gr. (links) sowie im Vertikalschnitt (rechts) im optimierten Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr eines heißen Tages.

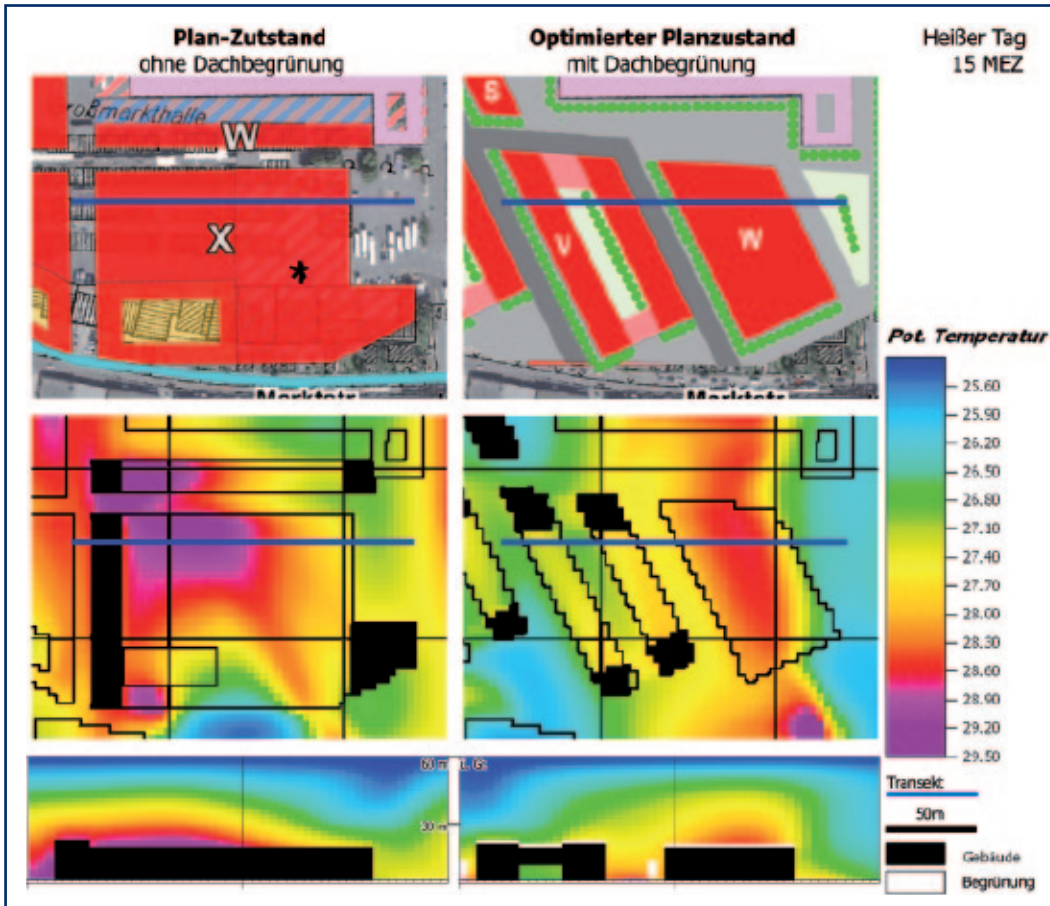


Abb. 5.7: Vergleich der berechneten potenziellen Lufttemperatur für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages im Bereich eines Gebäudes ohne (links, erster Planentwurf) sowie eines Gebäudes mit Dachbegrünung (rechts, optimierter Planentwurf) im Dachniveau in 16 m ü Gr. (mittlere Bildreihe) sowie im Vertikalschnitt (untere Bildreihe) im Untersuchungsgebiet „Großmarkt“ in Köln-Raderberg.

5.1.3.1.3 Windfeld

Die berechneten Windverhältnisse (Abb. 5.8) zeigen ein räumliches Verteilungsmuster, das durch hitzebedingte Konvektion geprägt ist. Denn trotz einer Initialwindgeschwindigkeit von nur schwachen 0,6 m/s sind auf größeren Freiflächen (insbesondere im Park) Bereiche mit Windgeschwindigkeiten von bis zu 1,8 m/s zu erkennen, die nicht durch horizontale Transportprozesse hervorgerufen werden, sondern durch aufsteigende Warmluft. Im Vorgebirgspark sind diese Effekte nicht zu beobachten, da hier aufgrund der Verschattung keine Erwärmung des Bodens erfolgen kann. Allerdings ist hier die Durchlüftung erwartungsgemäß mit 0,3 bis 0,7 m/s deutlich geringer.

In den Gebäudegruppen ist erneut eine nur äußerst schwache Belüftung festzustellen, wenn man von weni-

gen Bereichen mit Düseneffekten absieht. Auch sind es hier wieder die weitgehend abgeschotteten Innenhöfe, in denen die Durchlüftung zum Erliegen kommt. Der im Dachniveau über die Häuser strömende Wind ist nicht in der Lage, bis zum Boden durchzugreifen. Während im Straßenraum noch eine Strömung mit mindestens 0,4 m/s vorherrscht, kommt sie am Boden der Innenhöfe der beiden Gebäude H und I mit weniger als 0,15 m/s faktisch zum Erliegen. Im Vertikalschnitt ist zu erkennen, dass der Wind im oberen Gebäudebereich nur einige Meter tief in die Innenhöfe hinab reichen kann (Abb. 5.5). Aufgrund der engen Abstände der Gebäudeflügel ist ein Vordringen bis zum Boden nicht möglich.

Das in Abbildung 5.9 dargestellte Windfeld für 15.00 Uhr eines heißen Tages ist – wie im Planentwurf auch – durch Konvektion geprägt. Im Gegensatz zum Planent-



wurf ist eine verbesserte Durchlüftung der Innenbereiche der neuen nördlichen und südlichen Modellquartiere festzustellen, da die Straßenzüge und Gebäude zur Anströmrichtung ausgerichtet sind und die Innen-

höfe durch Durchbrüche geöffnet wurden, so dass die Strömung besser in die Bebauung vordringen kann. Die Windgeschwindigkeit steigt von vormals weniger als 0,2 auf 0,6 m/s bis hin zu 1,2 m/s an.

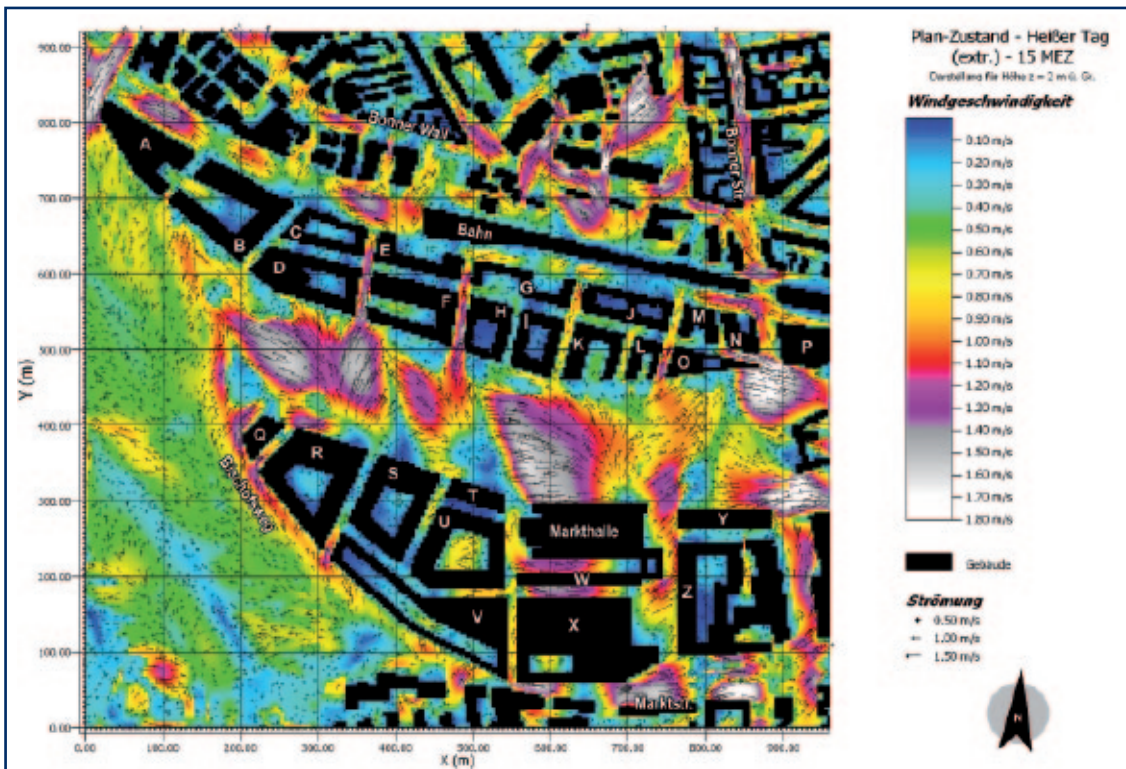


Abb. 5.8: Verteilung der Strömungsverhältnisse in 2 m ü. Gr. im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

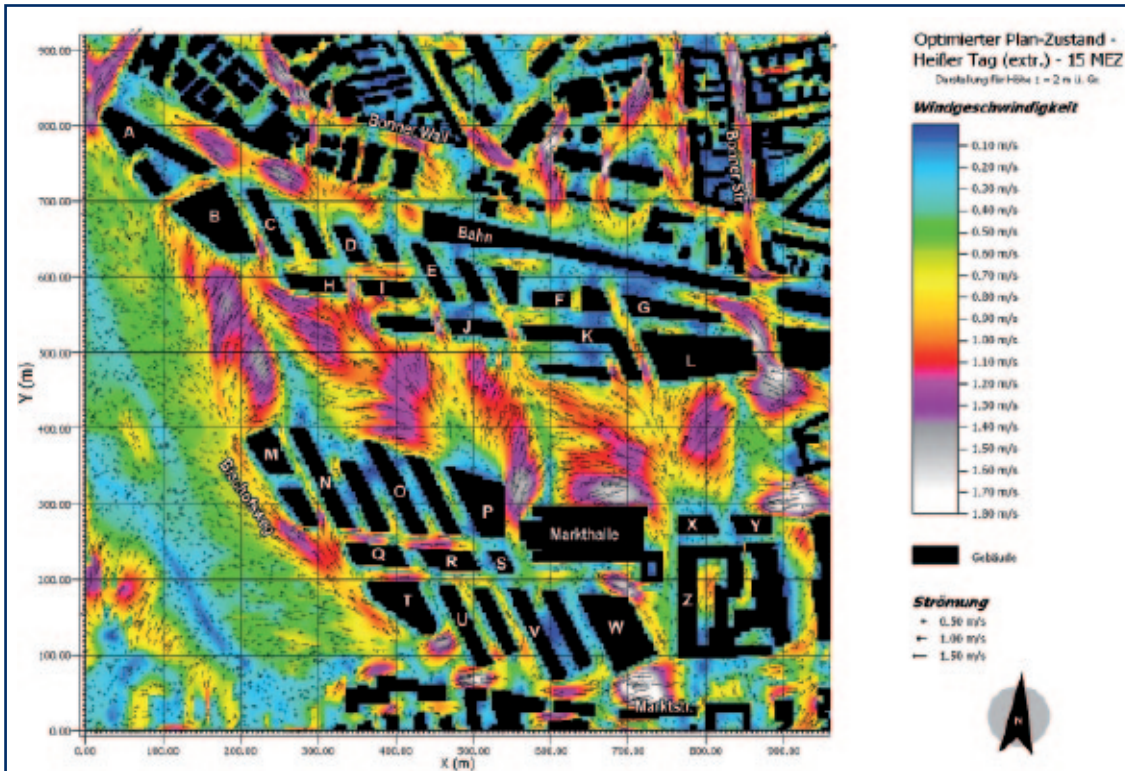


Abb. 5.9: Verteilung der Strömungsverhältnisse in 2 m ü. Gr. im optimierten Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

5.1.3.1.4 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit um 15.00 Uhr des heißen Tages für den Plan-Zustand (Abb. 5.10) stellt sich äußerst differenziert dar. Die günstigen Bereiche mit „behaglichem“ bis „leicht warmem“ thermischen Komfort (grüne Bereiche mit 0 PMV bis 1,5 PMV) konzentrieren sich auf die schattigen Bereiche von Bäumen und Gebäuden, während auf offenen und besonnten Flächen die Wärmebelastung auf über 2,9 PMV mit „heißem“ bis „sehr heißem“ Bedingungen deutlich ansteigt.

Die höchste Wärmebelastung mit mehr als 4,5 PMV (extremer Hitzestress) weisen die sonnenexponierten Süd- und Westfassaden der Gebäude auf. Dies trifft auch auf Asphaltdecken besonnter Straßenabschnitte zu. Die Ausschnittvergrößerung der Abbildung 5.5 (mittleres Bildpaar) zeigt deutlich, wie Sonnenexposition und Schattenwurf den thermischen Komfort beeinflussen. Während an der Südseite des Gebäudes G die thermische Belastung sehr hoch ist („sehr heiß“), ist auf der Südseite der Gebäude F, H, I, und K aufgrund der Baum Schatten die Belastung „behaglich“ bis „leicht warm“. Auch die nach Norden und Osten fallenden Schatten der

Gebäude erzeugen angenehme thermische Komfortzonen. Beim Vergleich der Innenhöfe beider Gebäude H und I ist zu erkennen, dass im Hof des Gebäudes H die Wärmebelastung über der unversiegelten nackten Bodenoberfläche höher ist („sehr heiß“) als über dem Rasen des Innenhofes des Gebäudes I („heiß“). Neben der Hitzebelastung im Gebäudebereich ist auch im Park – im Bereich der unverschatteten Wiesenflächen – die Wärmebelastung aufgrund der Sonnenexposition sehr hoch (> 2,9 PMV „heiß“), wobei die versiegelten Gehwege nochmals um eine zusätzliche Belastungsstufe stärker betroffen sind (3,8 PMV „sehr heiß“).

Auch bei der in Abbildung 5.11 dargestellten thermischen Behaglichkeit für 15.00 Uhr eines heißen Tages ist für den optimierten Plan-Zustand gegenüber dem ersten Planentwurf eine Verbesserung in mehrfacher Hinsicht festzustellen.

Am offensichtlichsten ist die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit an den sonnenexponierten Süd- und Westfassaden der Gebäude, wo durch die Pflanzung von Fassadennahen Baumreihen die Behaglichkeit von

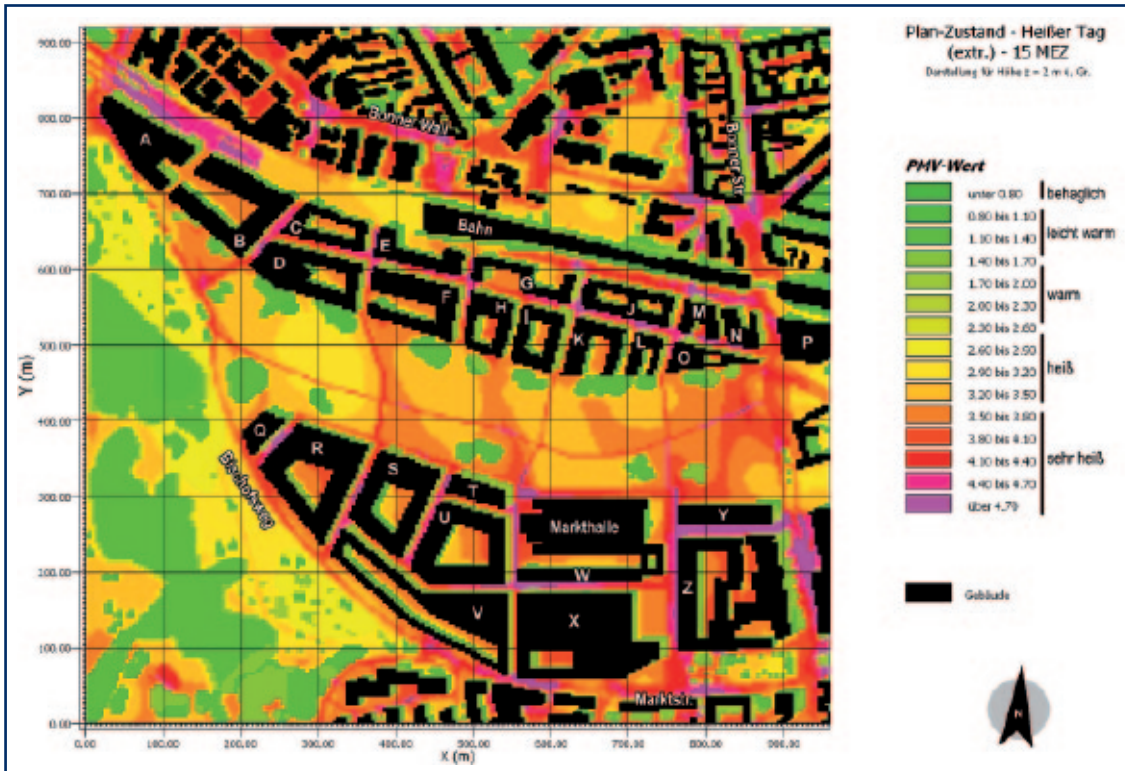


Abb. 5.10: Verteilung der thermischen Behaglichkeit PMV in 2 m ü. Gr. im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

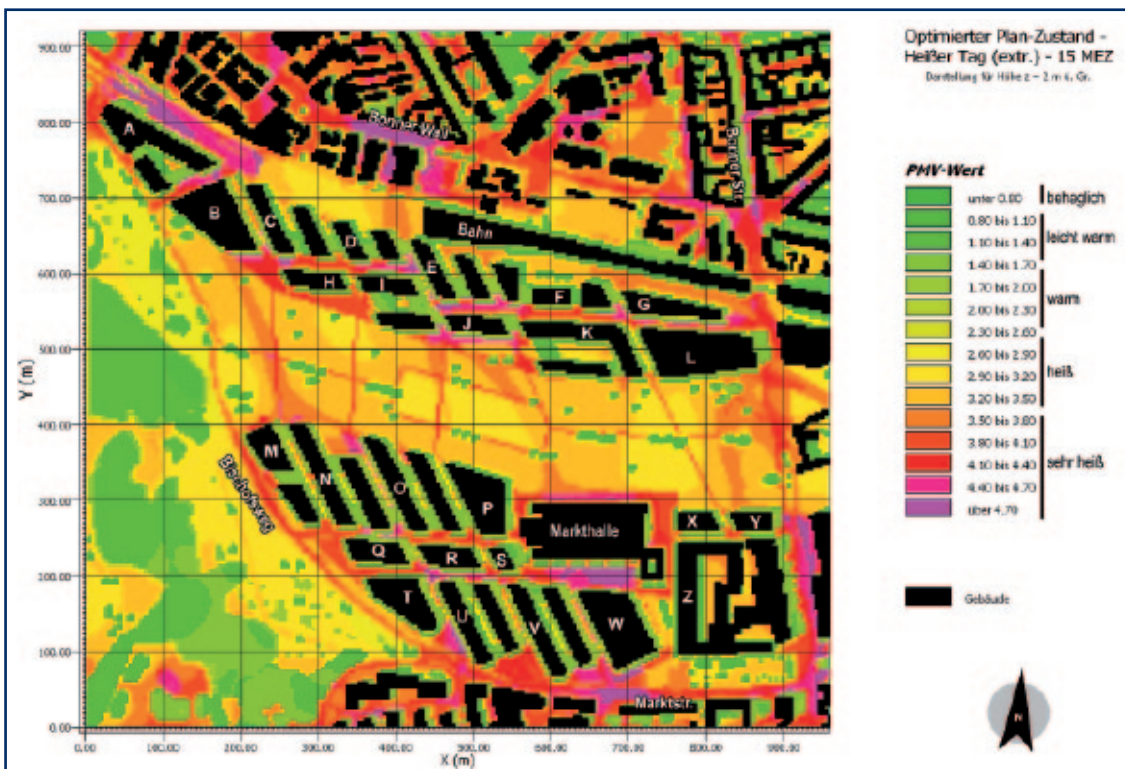


Abb. 5.11: Verteilung der thermischen Behaglichkeit in 2 m ü. Gr. im optimierten Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 15.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

„heißer“ bis „sehr heißer“ Belastung um bis zu -3,5 PMV auf die „behagliche“ bis „leicht warme“ Stufe reduziert werden konnte. Damit sind auch die Fassaden gegen Aufheizung geschützt. Unter Einbeziehung der Schattenzonen an den Ost- und Nordfassaden sind nun die einzelnen Gebäude sowie die Straßenzüge in beiden neuen Quartieren allseits von einer thermischen Komfortzone umgeben, die einen unbeschwerten Aufenthalt im Freien ermöglichen.

Auch im Park konnte die thermische Belastung durch das Einströmen kühlerer Luft aus dem südlichen Quartier um durchschnittlich eine halbe Belastungsstufe, das heißt um 0,5 PMV – von „sehr heiß“ auf „heiß“ – gesenkt werden. Dieses ist insofern bemerkenswert, da sich die Sonneneinstrahlung als dominierende Größe der Wärmebelastung nicht verändert hat. Innerhalb des Parks ist am zentralen Teich sowie am Zierteich des Gebäudes K eine zusätzliche Absenkung um 0,3 PMV zu verzeichnen, wenngleich sich die Belastungsstufe dadurch nicht ändert. Die entlang der Gehwege gesetzten Bäume reduzieren die thermische Belastung für die Spaziergänger im Bereich der Schattenzonen auf ein behagliches Niveau.

5.1.3.2 Nachtsituation (23.00 Uhr MEZ)

5.1.3.2.1 Lufttemperatur

Das thermische Niveau um 23.00 Uhr (Abb. 5.12) ist mit Temperaturen zwischen 22 und 25 °C nur um ca. 4,5 K niedriger als nachmittags (15.00 Uhr) und damit noch immer relativ hoch. Die räumliche Differenzierung mit maximal 3 K eher schwach ausgeprägt. Der Vorgebirgspark ist in dieser Situation im Vergleich zum übrigen Gebiet am kühlfsten. Auch im Bereich der über das Gesamtgebiet verstreut stehenden Einzelbäume und kleineren Baumgruppen sind die Temperaturen mit weniger als 22,8 °C relativ angenehm. Die offenen Flächen des zentralen Parks sowie die überbauten Areale jedoch weisen deutlich höhere Temperaturen (> 23 °C) auf. Der geplante südliche Gebäudekomplex ist aufgrund der Abstrahlung der in der Gebäudesubstanz aufgespeicherten Wärme mit Temperaturen zwischen 24 und 25 °C am wärmsten. Durch die südöstliche Anströmung wird warme Luft in den zentralen Park geleitet, so dass auch hier trotz einer möglichen Bodenabkühlung die Lufttemperatur mit 23 bis 24 °C weiterhin relativ hoch ist.

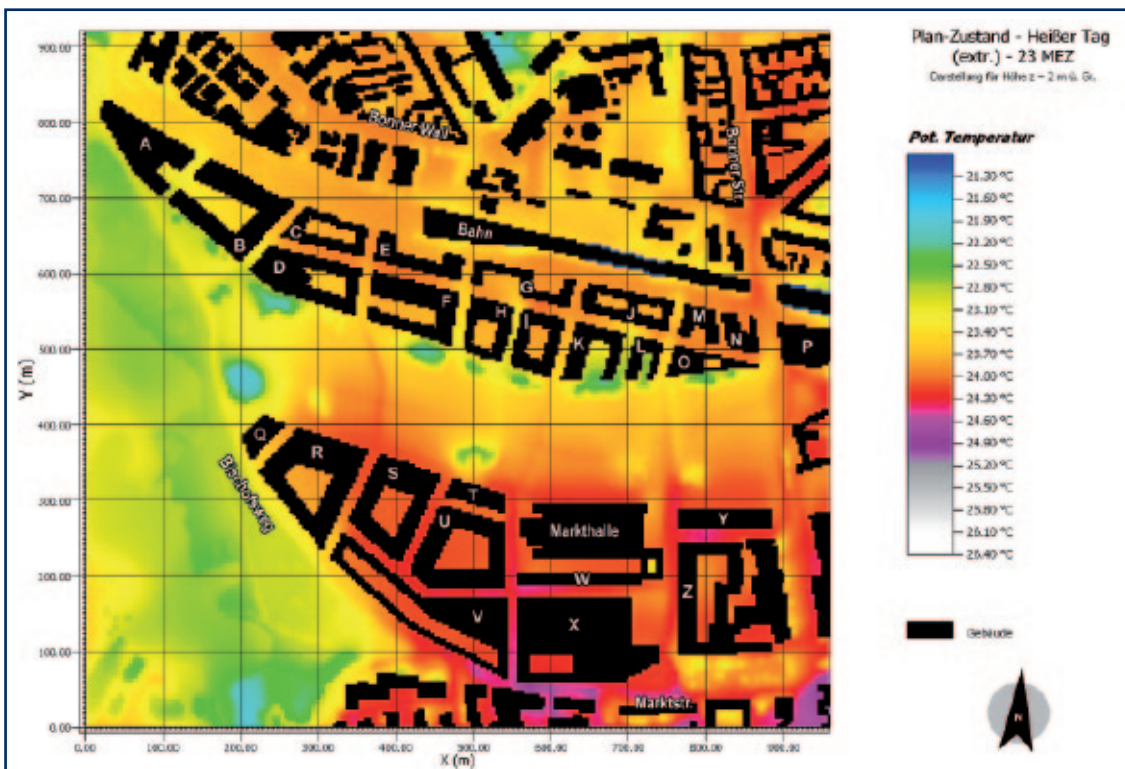


Abb. 5.12: Verteilung der potenziellen Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 23.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

Das thermische Niveau um 23.00 Uhr für den optimierten Plan-Zustand (Abb. 5.13) ist bezüglich der gebietsweiten Temperaturspannweite von 22 bis 25 °C (3,0 K) mit dem Planentwurf identisch. Gegenüber der Nachmittagssituation hat eine Abkühlung um 4,5 K stattgefunden. In den beiden neuen nördlichen und südlichen Quartieren treten geringfügig niedrigere Temperaturen (0,3 bis 0,6 K) auf – im Vergleich zum Plan-

Zustand. Absolut betrachtet ist der Unterschied nicht von Bedeutung, jedoch zeigt er, dass durch Lageoptimierung der Gebäude und Innenhofbegrünung das Klima im Quartier verbessert werden kann. Im Zuge der Südostanströmung bewirkt die aus dem südlichen Quartier in den Park transportierte Luft auch dort eine Senkung der Lufttemperatur um ca. 0,3 K.

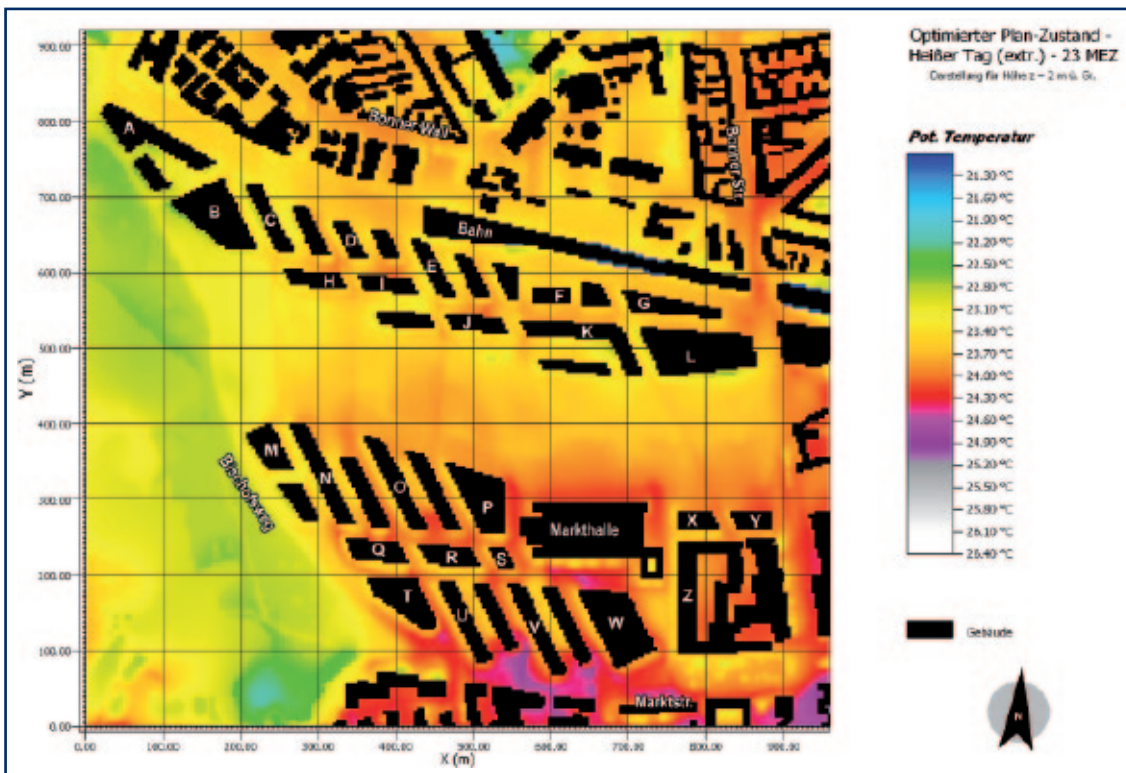


Abb. 5.13: Verteilung der potenziellen Lufttemperatur in 2 m ü. Gr. im optimierten Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 23.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

5.1.3.2.2 Thermische Behaglichkeit

Bezüglich der thermischen Behaglichkeit (Abb. 5.14) ist hier bemerkenswert, dass – unter Annahme des Aufenthaltes im Freien in leichter Sommerbekleidung – auch um 23.00 Uhr im Plan-Zustand noch ein behagliches Klima (-0,5 PMV bis 0,5 PMV) vorherrscht.

In der räumlichen Verteilung stellt sich die thermische Behaglichkeit weitgehend einheitlich dar. Lediglich im

nahen Umfeld vieler Gebäude ist eine um 0,5 PMV höhere Behaglichkeitsstufe zu verzeichnen, die jedoch nicht zu einer Verschlechterung der thermischen Behaglichkeit führt. Die thermische Behaglichkeit für den **optimierten Plan-Zustand** präsentiert um 23.00 Uhr gegenüber dem ersten Planentwurf – abgesehen von der veränderten Gebäudeanordnung – keine Veränderung. Eine Beeinflussung des thermischen Niveaus durch den optimierten Planentwurf ist somit nicht feststellbar.

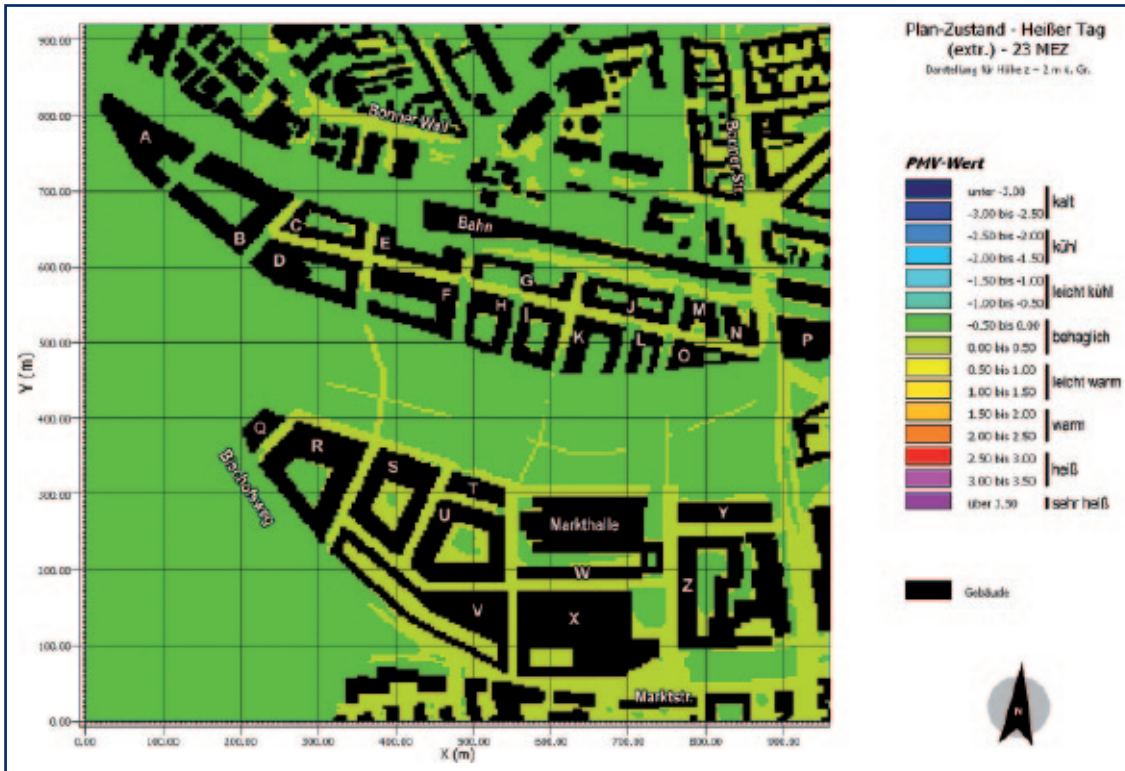


Abb. 5.14: Verteilung der thermischen Behaglichkeit PMV in 2 m ü. Gr. im Plan-Zustand des Untersuchungsgebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg für 23.00 Uhr MEZ eines heißen Tages.

Zusammenfassung

Die Untersuchung ergab, dass im versiegelten Bereich sowie auf unbewachsenen Böden die **Lufttemperatur** höher ist als auf unversiegelten, vegetationsbestandenen Flächen (Wiesen, Bäume, Wälder), solange dort die Böden gut mit Wasser versorgt sind und durch Verdunstung zur Luftabkühlung beitragen können. Über trockenen nackten Böden oder Wiesen erreicht die Lufttemperatur jedoch ähnlich hohe Werte wie über versiegelten Flächen. Die räumliche Temperaturverteilung ist nicht flächennutzungsscharf, da die warme Luft mit dem Wind räumlich verteilt wird. In den Nächten heißer Tage ist es sehr warm („Tropennacht“), wenngleich im Außenbereich die Wärmebelastung bei geeigneter Bekleidung gering ist. Ein Zufluss kühlerer Luft aus dem Vorgebirgspark in das Plangebiet konnte während heißer Tage nicht beobachtet werden.

Eine hohe **Wärmebelastung** ist im Freien nur während der Tagstunden heißer Tage bei hoher Sonneneinstrahlung von Relevanz. Offene, sonnenexponierte Flächen (auch Wiesen) sind besonders betroffen, während im

Schattenbereich von Gebäuden und Bäumen die Wärmebelastung nicht so kritisch ist. Zu den übrigen Tageszeiten sowie während anderer Witterungsbedingungen stellt die Wärmebelastung hingegen kein Problem dar.

Bei den **Durchlüftungsverhältnissen** ist zwischen offenen Flächen und bebauten oder mit Bäumen bestandenen Arealen zu unterscheiden. Auf größeren, offenen, unversiegelten und versiegelten Flächen ist der Austausch in der Regel gewährleistet. Gebäude, Wälder, Baumgruppen (Gehölze) und einzelne große Bäume stellen jedoch aerodynamische Strömungshindernisse dar, die generell und unabhängig von den Witterungs- und Windverhältnissen zur Reduzierung der Durchlüftung in Bodennähe führen. Dabei nimmt die Verringerung der Windgeschwindigkeit mit der Lagedichte von Gebäuden und Bäumen deutlich zu. Die ungünstigste Durchlüftungssituation tritt ein, wenn die dicht angeordneten Strömungshindernisse in ihrer Längsausrichtung quer zur Hauptanströmrichtung liegen und dadurch einen kaum zu durchdringenden Riegel bilden. Insbesondere kleine oder von hohen Gebäuden umschlossene

Innenhöfe sind davon besonders betroffen, da sie selbst unter dem Einfluss starker Winde nicht durchlüftet werden. Innerhalb einer dichten Bebauung ist die Durchlüftung stellenweise nur dort besser, wo Gebäude und Straßenzüge in ihrer Länge entsprechend der Anströmung ausgerichtet sind und dadurch Wind beschleunigende Kanalisierungs- und Düseneffekte verursachen. Dieses ist selbst bei austauscharmen Bedingungen der Fall.

Zur **stadtklimatischen Optimierung** des Planentwurfs wurden verschiedene Maßnahmen zur Quartier- und Gebäudegestaltung ergriffen, um die thermische Behaglichkeit sowie die Durchlüftungsverhältnisse zu verbessern. Zu den Maßnahmen zählen u. a. die Orientierung der Straßenzüge in Nordwest-Südostrichtung, die Vergrößerung der Gebäudeabstände sowie die Öffnung von Innenhöfen zur Verbesserung der Durchlüftung. Ferner wurden an südlichen und westlichen Gebäudefassaden Bäume gepflanzt und Dachbegrünungen angebracht, um die Aufheizung der Gebäude zu reduzieren. Eine bioklimatisch-thermische Optimierung des Parks wurde durch Anlage schattenspendender Baumgruppen und verdunstungsaktiver Teiche erreicht.

Die Simulationsergebnisse zu den klimatischen Auswirkungen des optimierten Planentwurfs zeigen an heißen Tagen eine deutliche **Verbesserung** der stadtklimatischen Situation.

An heißen Tagen werden hohe Temperaturen in weiten Teilen des Gebietes spürbar gesenkt und stellen nur noch in dunkel asphaltierten Straßenschluchten ein Problem dar. Dachbegrünungen reduzieren die Lufttemperatur im Dachniveau, sind aber ohne Wirkung für den bodennahen Bereich. Die Hitzebelastung konnte im gesamten bebauten Bereich auf ein behagliches Maß reduziert werden. Ferner wird die Durchlüftung in weiten Teilen der neuen Quartiere deutlich verbessert. Sämtliche Verbesserungen betreffen in abgeschwächter Form auch den Park.

5.1.4 Ausblick und weitere Empfehlungen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass durch die geplante Neugestaltung des heutigen Gewerbegebietes „Großmarkt“ in Köln-Raderberg das Stadtklima im Plangebiet verbessert werden kann. Dies gilt insbesondere für den (klimatisch) optimierten Planentwurf.

Es wurde aber auch deutlich, dass der optimierte Planentwurf noch Verbesserungspotenzial – hier speziell bezüglich Wärmestau oder Durchlüftungsengpässen in engen Straßenzügen – aufweist. Zur Verbesserung dieser Belastungsbereiche seien an dieser Stelle einige Maßnahmen empfohlen, die aufgrund methodischer Einschränkungen des benutzten Modells beziehungsweise der planerischen Vorgaben nicht untersucht wurden:

1. In Zonen, in denen die Gebäudeabstände sehr gering sind, ist zum Schutz der Gebäudefassaden gegen ihre Aufheizung anstatt der Pflanzung hoher Bäume auch die Anbringung einer **Fassadenbegrünung** in Betracht zu ziehen. Dadurch wird der Straßenraum von Baumkronen befreit, so dass die vertikale Durchlüftung verbessert wird. Als geeignete Fassadenbegrünung gelten insbesondere der Gemeine Efeu (*Hedera helix*) und Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*), ferner auch Kletterhortensie, Geißblatt, Blauregen, Waldrebe, Kletterrose, Pfeifenwinde oder Immergrüner Kletter-Spindelstrauch. Auch helle Fassadenfarben oder Fassadenelemente können zur Reduktion der Gebäudeaufheizung beitragen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die von den Fassaden reflektierte Strahlung nicht im Straßenraum absorbiert wird und dort zu einer Temperaturerhöhung führt. Bei nur gering geneigten oder flachen Dächern kann Dachbegrünung eine Aufheizung des Dachgeschosses reduzieren.
2. Bei den versiegelten Flächen im Straßenraum (Bürgersteige, Straßenbeläge oder Plätze) sollten möglichst **helle Materialien** benutzt werden, um die sonnenbedingte Aufheizung des Bodens zu verringern.
3. Als Maßnahme zur Durchlüftungsverbesserung wird empfohlen, die Gebäudeabstände um weitere 15 bis 20 Meter zu vergrößern. Dieses bedeutet allerdings, dass entweder die Anzahl der Gebäude verringert wird oder Bebauungsgrenzen beziehungsweise Grundflächenzahlen (GRZ) geändert werden.

Bei einer weiteren Optimierung sollten darüber hinaus folgende Aspekte beachtet werden:

4. Das Plangebiet ist mit Ausnahme der westlich angrenzenden, unversiegelten Park- und Sportflächen an **keine klimatischen Gunst- oder Ausgleichsräume** angeschlossen, die von außen positiv auf das Lokalklima einwirken könnten. Das bedeutet, dass zumindest an **heißen Tagen** das Mikroklima des Plangebietes aus-

schließlich aus der eigenen Flächennutzungsstruktur heraus erzeugt wird, so dass die klimatische Optimierung des Areals ausnahmslos durch entsprechende Maßnahmen vor Ort zu erzielen ist.

5. Die auf Quartier- oder Gebäudeebene möglichen Maßnahmen haben jedoch in der Einzelanwendung nur eine **geringe räumliche Wirkung** beziehungsweise Reichweite (Mikroklima). Daher können sie nur dann das Klima des Gesamtquartiers oder eines Stadtteils verbessern, wenn sie sinnvoll kombiniert und anschließend konsequent und flächendeckend – im gesamten Quartier oder Stadtteil – umgesetzt werden.
6. Gegen **Hitzestau im Außenbereich** (Straßenschluchten, Hinterhöfe und Gebäudezwischenräume) ist im Bestand die Schaffung beschatteter Flächen, beispielsweise durch Begrünung von Straßenzügen und Innenhöfen mit Bäumen, geeignet. Wenn Bäume zu dicht stehen, kann es zu einem Kronenschluss kommen, der den vertikalen Luftaustausch behindern und somit zu einer bodennahen Anreicherung von Luftschadstoffen führen kann. Um dies zu vermeiden

wird die Pflanzung im Sinne einer Baumwiese (Savannentyp) empfohlen, bei der vereinzelte großkronige Bäume mit weitläufigem Abstand zueinander und in Längsrichtung der primären Anströmung während der Hitzeepisoden angeordnet werden. Bei der Auswahl der Bäume sollte darauf geachtet werden, dass die Pflanzenarten ein geringes Ozonbildungspotenzial, optimale Toleranzen gegenüber Trockenheit bei eingeschränkter Wasserversorgung und hinreichende Frostresistenz aufweisen. Da Böden und Grünflächen, die bei Hitzeereignissen gut mit Wasser versorgt sind, durch die Verdunstung Wärmeenergie verbrauchen, tragen sie zu einer signifikanten Verbesserung der thermischen Behaglichkeit bei. Aus diesem Grunde sollte eine ausreichende Wasserversorgung der Böden sichergestellt werden. Auch sollten im Zuge einer möglichen baulichen Neugestaltung von Quartieren, bei der auch Böden neu aufgetragen werden müssen, solche mit hoher nutzbarer Feldkapazität (nFK), wie beispielsweise lehmige, möglichst wenig verdichtete Böden, bevorzugt werden.

Literatur

- BRUSE, M., FLEER H., 1998: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environmental Modelling and Software*, 13, S. 373–384.
- LANUV, 2011: Klimawandel und Überflutungsrisikobetrachtungen mit Einsatz neuer N-A-Modelle im Rahmen des Projektes Köln_21. Unver. Gutachten von Dr. Pecher AG im Auftrag des LANUV NRW, 87 S.
- LANUV, 2012: Umweltmeteorologisches Gutachten. Human-bioklimatische Bewertung für den Gestaltungsplan eines Teils des Großmarktgeländes in Köln im Rahmen des Projektes Köln_21. Unver. Gutachten von Dr. Düttemeyer, Umweltmeteorologie & EDV-Dienstleistung im Auftrag des LANUV NRW, 117 S.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure, 2008: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 – Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I : Klima. Düsseldorf.

5.2 Klimawandel und Überflutungsrisikobetrachtungen mit Einsatz neuer Niederschlag-Abfluss-Modelle

5.2.1 Einleitung

Im Rahmen des Themenbereichs „Starkniederschläge“ wurde das Büro Dr. Pecher AG vom LANUV NRW beauftragt, die Studie „Klimawandel und Überflutungsbetrachtungen mit Einsatz neuer Niederschlag-Abfluss-Modelle“ als Teil des Projektes „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ durchzuführen. Nachfolgend werden wesentliche Ergebnisse der Studie (LANUV 2011) zusammengefasst.

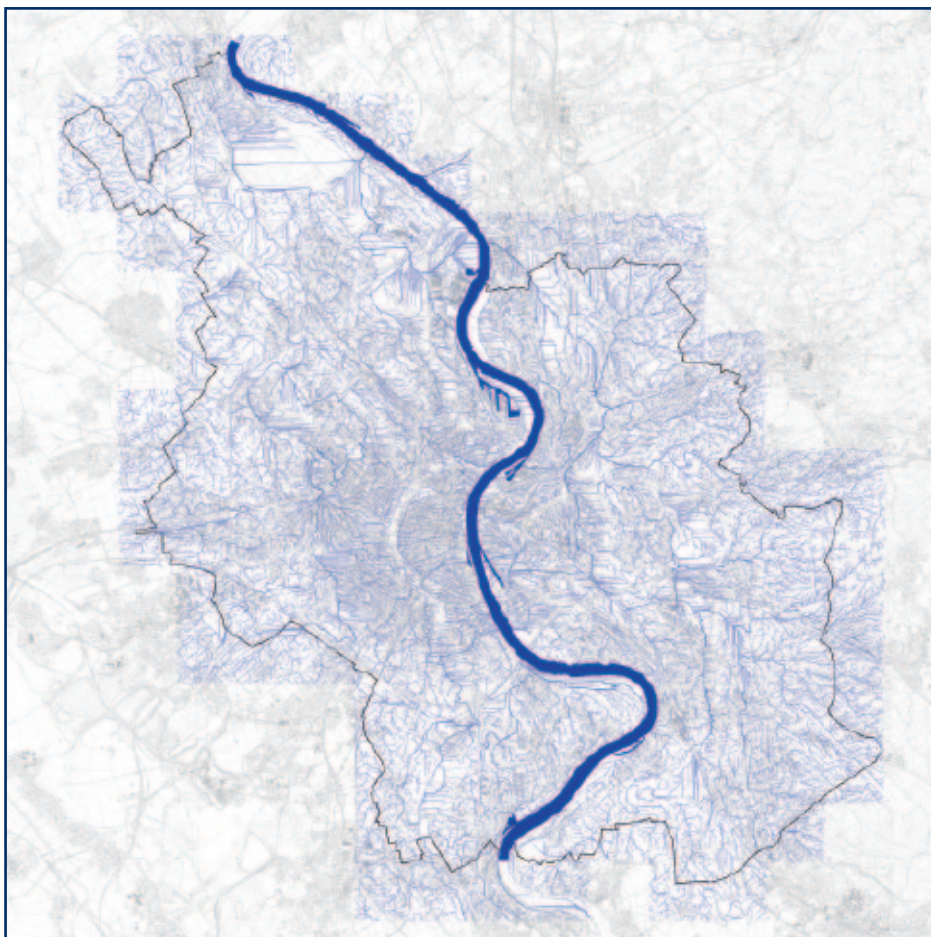
5.2.2 Modelltechnische Umsetzung

5.2.2.1 Stadtgebietsweite Betrachtung der Fließwege (Grobanalyse)

Für das gesamte Kölner Stadtgebiet wurden die Hauptfließwege auf der Geländeoberfläche auf Grundlage eines DGM10 und DGM1 (Höhendaten im 10 m- und 1 m-Rasterabstand) mittels eines geographischen Informationssystems ermittelt (Abb. 5.15, blaue Farbe).

Ziel der Fließweganalyse ist eine erste Abschätzung überflutungsgefährdeter Bereiche, die anschließend in einem zweiten Schritt mit Betriebserfahrungen des Kanalbetriebs und der Katastrophendienste sowie weiteren Modellergebnissen (Kanalnetz- und Oberflächenberechnungen) und den Erkenntnissen aus Ortsbegehungen abgeglichen werden müssen. Die Grobanalyse ist notwendig, da rechentechnisch eine flächendeckende Detailanalyse noch nicht durchführbar ist.

Die ermittelten Fließwege lassen Rückschlüsse auf die topographische Situation in Köln zu und erlauben es, Bereiche zu identifizieren, die stark vom Oberflächenabfluss gefährdet sein können. Dieses Verfahren beruht ausschließlich auf einer Auswertung der Geländetopographie; es werden hier keine Abflussvorgänge an sich simuliert. Das Verfahren dient somit als wichtige erste Orientierung, besitzt aber auch einige Einschränkungen:



- Das für die Niederschlagsentwässerung verantwortliche Kanalnetz wird nicht berücksichtigt.
- Niederschlagswasser, welches durch das Kanalnetz an andere Stellen geleitet wird und dort zu einem Überstau und Überflutungen führt, wird hiermit nicht verfolgt.
- Außerdem wird bei diesem Verfahren nicht zwischen befestigten und unbefestigten Flächen unterschieden, die bei Abflussbildung beziehungsweise -transport unterschiedlich stark partizipieren.

Abb. 5.15: Stadtgebietsweite Analyse von Fließwegen im Stadtgebiet von Köln.

5.2.2.2 Prüfung eines lokalen Überflutungsbereichs (Detailanalyse)

5.2.2.2.1 Grundlagen und Modellvarianten

Auf Grundlage der ermittelten Oberflächenfließwege, der Starkregeneinsätze der Feuerwehr sowie der Betriebserfahrungen wurde im Pilotprojekt ein überflutungsgefährdetes Beispielgebiet im Bereich Porz ausgewählt. Es schloss sich eine detaillierte Überflutungsbetrachtung mit einem hydrodynamischen N-A-Kanalnetzmodell (hydrodynamische 1D-Kanalnetz gemeinsam mit einer 2D-Oberflächenabflussmodellierung; Programmsystem DYNA®-GeoCPM®) auf der Basis hoch aufgelöster Geländedaten an.

Das ausgewählte Untersuchungsgebiet weist eine Einzugsgebietsgröße von rund 155 Hektar auf und wird im Mischverfahren entwässert. Die Oberflächenfließwege innerhalb des Untersuchungsgebietes zeigen relativ klar erkennbare Fließwege auf, die durch Ortsbegehungen bestätigt werden konnten.

Es wurden die folgenden drei Modellvarianten (Abb. 5.16) aufgebaut:

- Modelltyp 1 – „klassische“ hydrodynamische 1D-Kanalnetzberechnung (Abb. 5.17),
- Modelltyp 2 – 1D-Kanalnetzberechnung mit Berücksichtigung der Straßenprofile,
- Modelltyp 3 – 1D-Kanalnetzberechnung mit 2D-Oberflächenmodellierung.

Der Zwischenschritt über die Straßenprofilmethode wird in der Praxis nur selten angewendet.

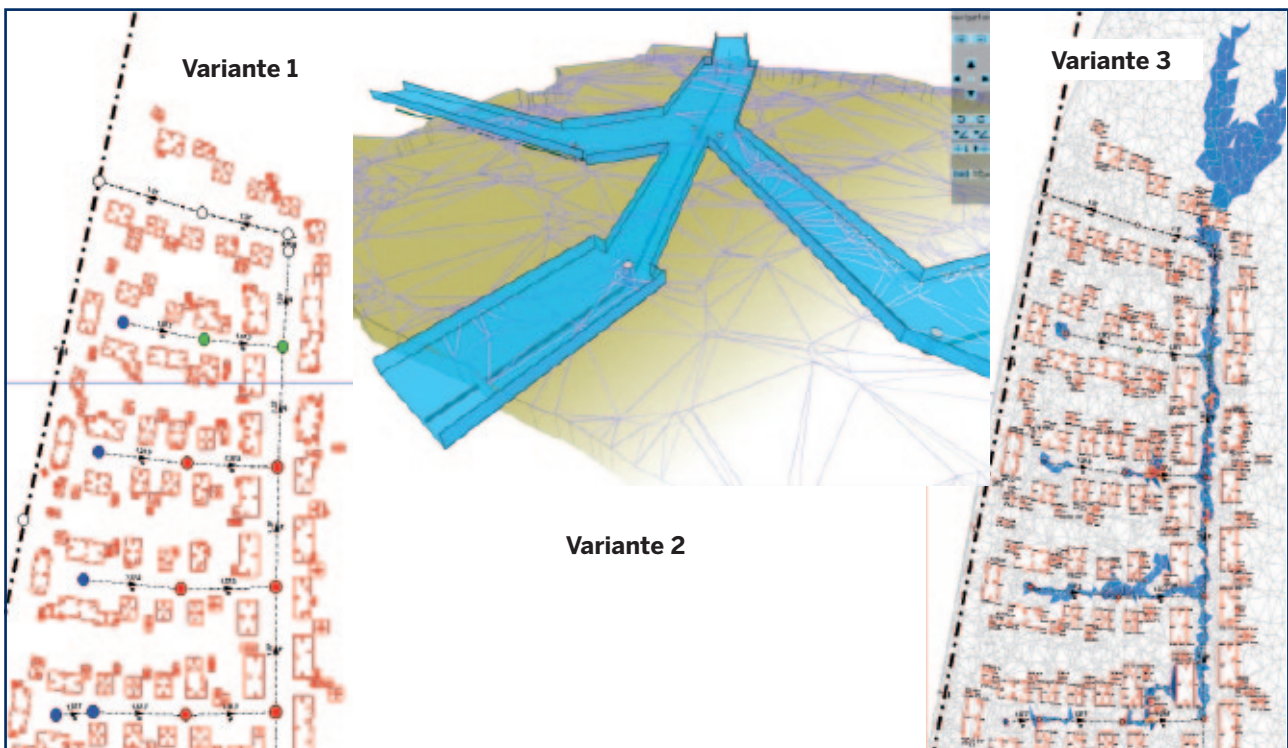


Abb. 5.16: Von der 1D-Kanalnetzberechnung über die Straßenprofilmethode zur gekoppelten 1D/2D-Oberflächenberechnung.

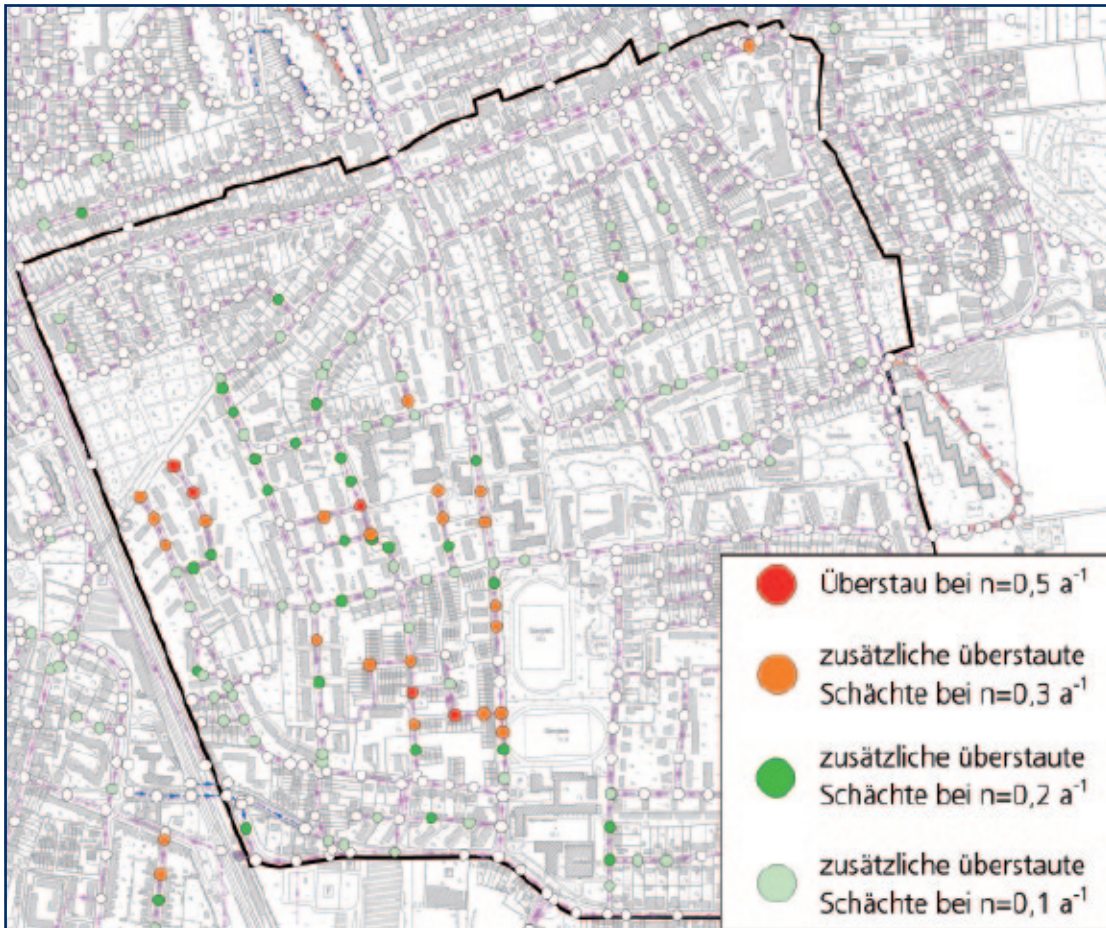


Abb. 5.17: Ergebnisse der Überstaubetrachtung für das Beispielgebiet – überstaute Schächte in Abhängigkeit der Niederschlagsbelastung ($n = 0,5 \text{ a}^{-1}$).

5.2.2.2.2 Sensitivitätsanalyse – Variation der Niederschlagsbelastung

Für die Berechnung mit dem Programmsystem DYNA®/GeoCPM® wurden von den StEB Modellregen vom Typ Euler II für die Jährlichkeiten $T = 2 \text{ a}$ bis $T = 100 \text{ a}$ sowie eine Starkregenserie, basierend auf Auswertungen der Regenreihe Rondorf (1967–2009), zur Verfügung gestellt. Ein Modellregen $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$ bedeutet, dass ein Starkregenereignis alle zwei Jahre auftritt, bei einem Modellregen mit $n = 0,01 \text{ a}^{-1}$ tritt das Starkregenereignis alle 100 Jahre auf. Eine Übersicht über die Gesamtniederschlagshöhen der Modellregen bietet der Bericht zum Teilprojekt.

Wie die Untersuchungen in Kapitel 4.6 (Extremwertstatistiken) zeigen, ist damit zu rechnen, dass lokale Starkregenereignisse infolge des Klimawandels zunehmen werden. Da diese Ergebnisse zum Zeitpunkt der

Erstellung der Studie noch nicht vorlagen, wurden die folgenden Steigerungsraten gewählt:

- Modellregen Euler Typ II, $D = 180 \text{ min}$:
 $n = 0,1 \text{ a}^{-1}$, $n = 0,2 \text{ a}^{-1}$, $n = 0,5 \text{ a}^{-1}$,
 $n = 0,3 \text{ a}^{-1}$, inkl. Variation dieses Modellregens um bis zu +45 % in 5 %-Schritten.
- Lokale Starkregenserie (1967–2009):
 89 maßgebende Regen, inkl. Variation dieser Serie um +10 % und +30 %.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse der drei Kanalnetzmodellvarianten erfolgte hinsichtlich des Überstauverhaltens eine Überflutungsbetrachtung nach DIN EN 752 beziehungsweise DWA-A 118.

Die Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die aus dem Klimawandel zu erwartenden, aber derzeit schwer prognostizierbaren Auswirkungen auf das Kanal-

netz bewertbar und das Verhalten der Kanalnetzmodelle hinsichtlich Überstau und Überflutung abschätzbar machen zu können.

Für den Modellregen mit der Häufigkeit $n = 0,3 \text{ a}^{-1}$ erfolgte eine Variation der einzelnen Intensitäten in Fünf-Prozent-Schritten um bis zu 45 Prozent, für die Starkregenserie eine Variation um +10 Prozent sowie +30 Prozent, um die Reaktionen der Kanalnetzmodelle im Untersuchungsgebiet auf mögliche zukünftige Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass ein Modellregen mit der Häufigkeit $n = 0,3 \text{ a}^{-1}$ bei einer Variation von +40 Prozent in der Belastung nur geringfügig schwächer einzustufen ist als ein Modellregen der Häufigkeit $n = 0,05 \text{ a}^{-1}$.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 5.18 zeigen, dass schon bei einer geringen Erhöhung des Bemessungsniederschlags (+5 %) das ausgetretene Volumen deutlich zunimmt (+45 %). Mit weiterer Zunahme des Bemessungsniederschlags wird das ausgetretene Volumen erwartungsgemäß langsamer zunehmen. Das Netz reagiert in diesem Fall sehr sensitiv auf Veränderungen des Niederschlags. Dies ist bei der Sanierung zukünftig zu beachten.

5.2.2.2.3 Überflutungsbetrachtung, Gefährdungs- und Risikoabschätzung

Für das betrachtete Untersuchungsgebiet in Porz wurden ausgehend von den Überstauberechnungen für überflutungsgefährdete Bereiche Gefahrenpotentialanalysen und eine Risikobewertung durchgeführt.

Auf Grundlage der durch 1D (bzw. 1D/2D)-Kanalnetz-berechnungen gewonnenen Erkenntnisse zum Überstauverhalten für verschiedene Wiederkehrzeiten, der Geländetopographie (ermittelte Oberflächenfließwege und lokale Senken) sowie weiterer Informationen zum Betriebsverhalten des vorhandenen Entwässerungssystems (Feuerwehr, Kanalbetrieb etc.) wurden gefährdete Bereiche identifiziert.

Die ermittelten Überflutungsbereiche wurden anschließend mit Angaben zur Flächennutzung verschnitten (diverse Bebauungspläne, aktueller Flächennutzungsplan etc.) und in einem Plan dargestellt.

Für das Beispielgebiet wurden kritische Infrastrukturen durch Auswertung vorhandener Unterlagen, Daten und Ortsbegehungen ermittelt beziehungsweise verifiziert und mit den vorher ermittelten überflutungskritischen Bereichen abgeglichen. Zu den untersuchten Schwerpunkten zählen zum Beispiel Unterführungen, öffentli-

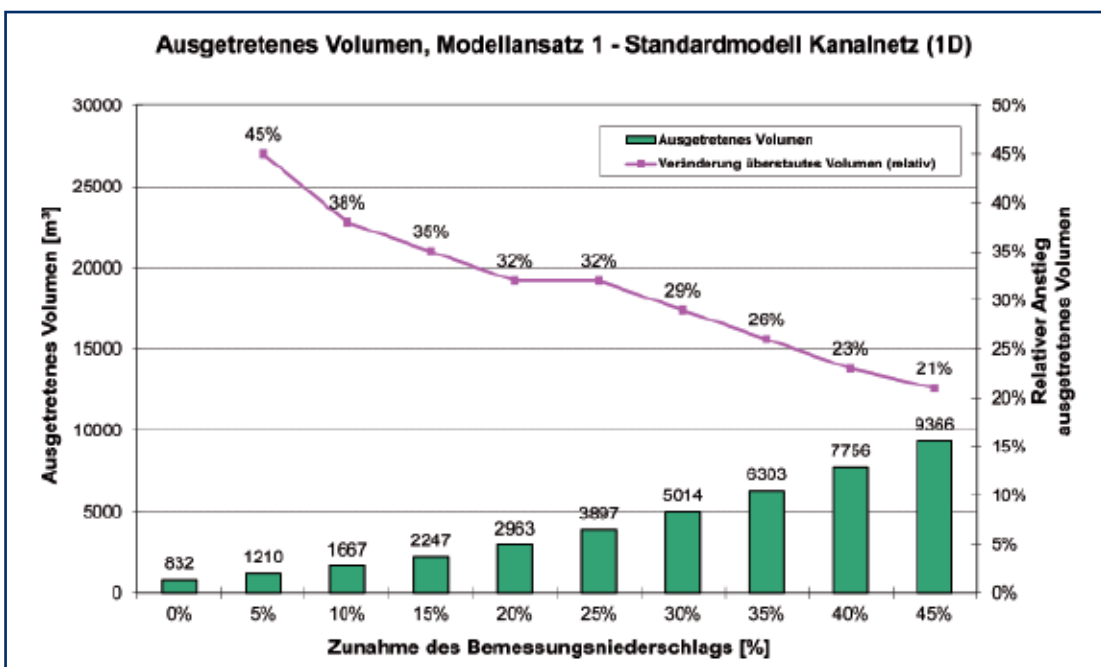


Abb. 5.18: Beispiel der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Niederschlagsbelastung – Zunahme des Überstauvolumens in Abhängigkeit des Bemessungsniederschlags.

che Gebäude, tiefliegende Gebäudezugänge beziehungsweise -zufahrten (Abb. 5.19).

Zu beachten ist, dass Sonderbauwerke im Kanalnetz, wie beispielsweise Pumpwerke, im Versagensfall, zum Beispiel bei Stromausfall, während eines Starkregenereignisses zusätzliche Gefährdungen verursachen können.

5.2.2.2.4 Wassersensible Sanierungsvarianten im Kanalnetz und auf der Geländeoberfläche zur Überflutungsvorsorge

Im Rahmen der exemplarisch erarbeiteten Sanierungskonzeptionen wurde bei den Simulationen in einem weiteren Schritt die Struktur der Einzugsgebietsoberfläche gezielt angepasst, um überstautes Regenwasser besser ableiten beziehungsweise auf der Oberfläche zurückhalten zu können. Auf diese Weise können Schäden durch Überflutungen durch extreme Starkregenereignisse, für die die Kanalisation nicht ausgelegt werden kann, minimiert werden.

Für die überflutungsgefährdeten Bereiche innerhalb des Untersuchungsgebiets wurden zwei Sanierungsvarianten für einen Modellregen $T = 20$ a untersucht. Zuerst wurde eine „klassische“ hydraulische Kanalnetzsanierung modelliert. Dafür wurden im Kanalnetz diverse Anpassungen an Sonderbauwerken (hauptsächlich Anpassungen der Schwellenhöhe/-länge, Drossel-

abflüsse) vorgenommen. Im Vergleich zum unsanierten Zustand weist der sanierte Zustand wesentlich weniger überstautes Regenwasser auf. Allerdings sind in drei Bereichen im Untersuchungsgebiet weiterhin problematische rechnerische Wasserstände von mehr als 30 Zentimeter identifiziert worden. Durch lokale Maßnahmen, die das Zuströmen von Oberflächenwasser zu den betroffenen Gebäuden verhindern, lassen sich mögliche Schadensfälle gegebenenfalls verhindern.

Aufbauend auf der „klassischen“ Sanierungsvariante wurden zusätzlich gezielte dezentrale Maßnahmen an der Oberfläche, wie das Errichten von Mauern, Verwallungen/Schwellen/Rampen, sonstigen Fließhindernissen oder Mulden vorgenommen und die Auswirkungen dieser Maßnahmen modelltechnisch überprüft (Abb. 5.20).

Folgende Maßnahmen wurden für das betrachtete Untersuchungsgebiet in Porz modelltechnisch umgesetzt (Abb. 5.20):

Maßnahme 1: Anpassung von Bordsteinen und Gehwegen (-20 cm/+5 cm) zur Ableitung von Oberflächenwasser in einen unbebauten Bereich inkl. Schaffung von ausreichendem Muldenvolumen durch Absenkung der Geländeoberfläche.

Maßnahme 2: Verwallungen/Schwellen in einem Kreuzungsbereich (+15 cm Höhe).

Maßnahme 3: „Mauern“ als Fließhindernis vor Gebäuden (+100 cm Höhe).

Maßnahme 4: Abmauerung in einem Schacht zur Entlastung eines überlasteten Kanalabschnitts.

Maßnahme 5: Verwallung vor einer Einfahrt (Bereich Gehweg) zum tieferliegenden Garagenhof (+15 cm Höhe).

Durch die beschriebenen Maßnahmen konnten die errechneten Wasserstände auf der Oberfläche auf ein Höhenniveau von weniger als 30 cm für einen Modellregen $T = 20$ a gesenkt werden. Die beispielhaften Sanierungsmaßnahmen zeigen damit, dass es möglich ist, das Überflutungsrisiko deutlich zu senken. Ergänzend sind jedoch zur Vorsorge gegen extreme Niederschläge zusätzliche Objektschutzmaßnahmen zu empfehlen.



Abb. 5.19: Beispiel eines tiefliegenden, überfluteten Gebäudezugangs.



Abb. 5.20: Überstau (rote Punkte) und Oberflächenwasserstände für eine „wassersensible“ Sanierungsvariante mit lokalen Maßnahmen auf der Geländeoberfläche und Anpassungen des Kanalnetzes; Berechnungen 1D-2D-DYNA®/GeoCPM®, T=20 a.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie „Klimawandel und Überflutungsbetrachtungen mit Einsatz neuer Niederschlag-Abfluss-Modelle“ wurden Vorgehensweisen und Möglichkeiten zur stadtgebietsweiten Ermittlung und Eingrenzung überflutungsgefährdeter Bereiche erarbeitet und modelltechnisch umgesetzt. Zusätzlich wurden die möglichen Auswirkungen des Klimawandels (Zunahme von Starkregenereignissen) auf das Entwässerungssystem und die Überflutungssituation mittels Sensitivitätsuntersuchungen analysiert.

Als wesentliche Ergebnisse können festgehalten werden:

- Es liegen bereits zahlreiche Datenquellen in höchster Auflösung zu Topographie und Flächennutzungen vor, die eine Grundlage zur Erstellung urbaner Starkregen-/Risikokarten bilden.
- Informationen zu kritischen Infrastrukturen (Kindertagesstätten, Krankenhäuser, Industrie, Versorgung etc.) liegen für das Stadtgebiet nach Nutzungsarten differenziert digital vor.

- Für das Kölner Stadtgebiet liegen aktuelle hydrodynamische und kalibrierte Kanalnetzmodelle vor beziehungsweise werden permanent aktualisiert.
- Kanalbetrieb und Feuerwehr verfügen über umfangreiche Daten zum Betriebszustand, beobachteten Überflutungen und Schadensfällen.
- Die Modellierung von Überflutungsvorgängen auf der Oberfläche ermöglicht bereits heute tendenzielle Aussagen über mögliche Wasserstände zu treffen, die als Grundlage für weitere Untersuchungen und lokale Maßnahmen zur Schadensverminderung durch Überflutung dienen können.

Auf Basis der vorhandenen Grundlagendaten ist die Erstellung einer urbanen Starkregenrisikokarte für überflutungsgefährdete Bereiche grundsätzlich möglich. Die Detailschärfe der Aussagen einer solchen Karte ist dabei abhängig von den verfügbaren Informationen (z. B. Fließwege, Oberflächenabflusssimulation, Berechnungsergebnisse der Kanalnetzmodelle) und dem Aufwand für vertiefte Untersuchungen in Gebieten, die als gefährdet eingestuft werden (z. B. gekoppelte 1D-2D-Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation).

Eine urbane Starkregenrisikokarte ist ein wichtiges Instrument zur Vernetzung von Stadtentwässerung und Stadtplanung beziehungsweise -entwicklung und ist ein idealer Ausgangspunkt für weitergehende detaillierte Untersuchungen. Überflutungsvorsorge soll zukünftig stärker als bisher als kommunale Gemeinschaftsaufgabe betrachtet werden (Abb. 5.21).

Um eine Umsetzung der Maßnahmen sicherzustellen, wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der Überflutungsanalysen zukünftig in stadtplanerische Prozesse einzubinden. Hier bieten der Flächennutzungsplan und die Bebauungspläne als entscheidende Instrumente der Bauleitplanung die Möglichkeit, Informationen zu Risikobereichen ressortübergreifend verfügbar zu machen.

Zudem können die Überflutungsbereiche bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Bisher fehlende Vernetzungen, unter anderem zu Architekten, Bauherrn und Eigentümern, werden durch diese Instrumente hergestellt.

Abschließend bleibt festzuhalten: Auch die Bearbeitung des Teilprojektes „Starkregen“ hat gezeigt, dass für eine Überflutungsvorsorge die Kombination von Maßnahmen im Kanalnetz und auf der Oberfläche notwendig ist. Nur wenn Maßnahmen der Stadtentwässerung mit Maßnahmen der Stadtplanung und -entwicklung verbunden und die betroffenen Bürger durch Objektschutzmaßnahmen vorsorgt werden, können die Auswirkungen von Extremereignissen effizient gemildert werden.

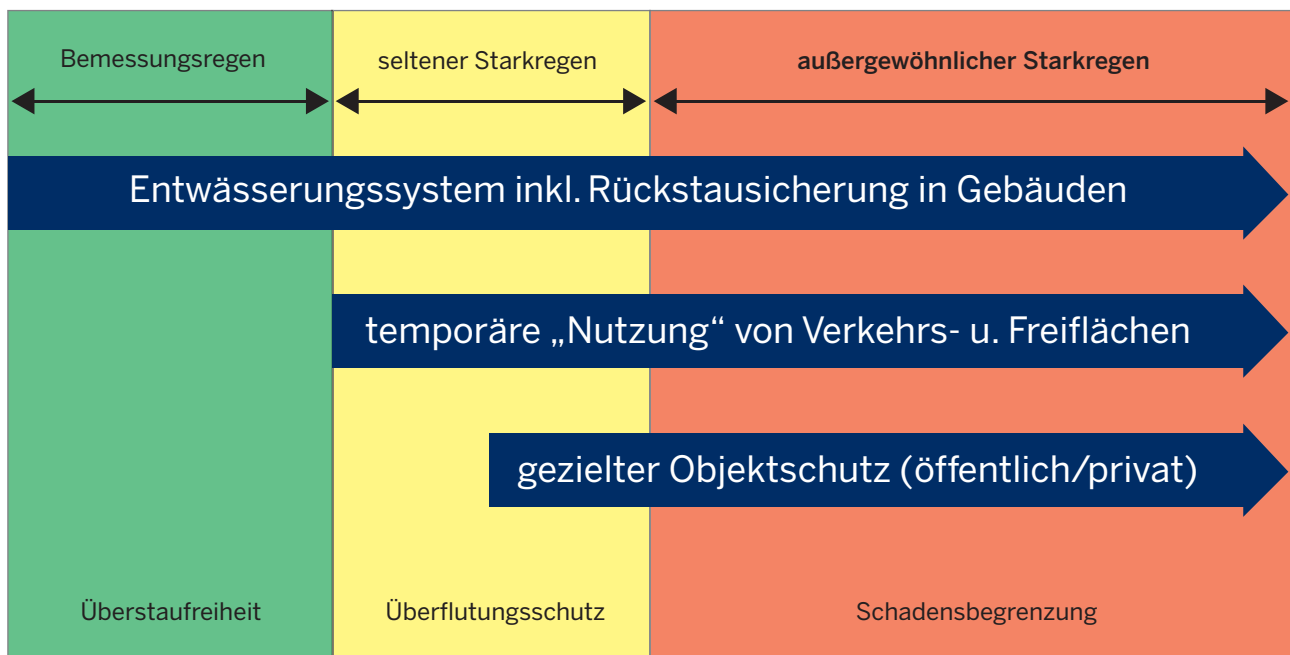


Abb. 5.21: Schutz vor Starkregenfolgen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe: Maßnahmenkategorien (in Anlehnung an das Arbeitsblatt der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.5).

5.2.3 Empfehlungen zum zukünftigen Vorgehen und Ausblick

5.2.3.1 Vorgehen zur stadtgebietsweiten Analyse überflutungsgefährdeter Bereiche

Zur Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bestehender Entwässerungssysteme ist eine hydraulische Nachweisrechnung angeraten. Dies gilt insbesondere, wenn Systemüberlastungen beobachtet wurden oder abflussbeeinflussende Veränderungen im Einzugsgebiet der Kanalisation geplant sind. Nach DWA-A 118 (2006)

wird hierzu der Einsatz hydrodynamischer Kanalnetzmodelle empfohlen. Die hydraulische Nachrechnung sollte durch Auswertungen des Systemverhaltens bei aufgetretenen Starkregenereignissen und eventuell vorliegenden Messungen ergänzt und damit verifiziert werden. Ein hydrodynamisches Kanalnetzmodell wird zur Nachweisrechnung im Rahmen des Überstaunachweises eingesetzt. Gleichzeitig sind bei detaillierten Überflutungsbetrachtungen für identifizierte Bereiche mit hervorgehobener Überflutungsgefährdung auch die Wasserstände und Abflussvorgänge auf der Oberfläche

abzubilden und zu bewerten (DWA AG ES-2.6 2013). Die Berechnungen des Oberflächen- und des Kanalabflusses kann modelltechnisch vorgenommen werden. Die Nachweisführung erfolgt als gekoppelte 1D-2D-Berechnung. Aufgrund des mit der Berechnung verbundenen Datenvolumens kann derzeit nur eine Fläche von etwa vier km² gekoppelt berechnet werden, Tendenz steigend in Abhängigkeit der EDV-Leistungsfähigkeit. Es sind geeignete einfache Analysemethoden anzuwenden, um besonders gefährdete Bereiche zu lokalisieren. Dies wird in der Grobanalyse betrachtet.

Im Vorfeld zu Detailbetrachtungen mit gekoppelten 1D-2D-Modellen können für größere Einzugsgebiete im Rahmen einer Grobanalyse Überflutungsgefährdungen aufgrund von Fließwegen auf der Grundlage digitaler Geländemodelle (DGM) nur abgeschätzt werden. Deshalb sollten ergänzende Informationen aus der Kanalnetzrechnung und 2D-Oberflächenberechnungen berücksichtigt werden. Diese lassen sich ebenfalls stadtgebietsweit umsetzen. Je nach gewünschter Modellaussage und Einzugsgebietscharakteristik ist eine Kombination aus Grob- und Detailanalyse festzulegen.

Sowohl im Rahmen der Überstaunachweise als auch der Überflutungsbetrachtungen sind aufgrund der unsicheren Grundlagendaten, zu den auch der Einfluss der nur schwer prognostizierbaren Entwicklung des Klimas gehört, zukünftig Sensitivitäts- und Gefährdungsanalysen durchzuführen. Im Rahmen eines Stufenkonzeptes sollten die durch Überstau- und Überflutungsbetrachtung ermittelten kritischen Entwässerungsgebiete, beziehungsweise die von Überflutungen betroffenen Gebiete hinsichtlich des Schadens- und Gefährdungspotenzials bewertet werden. Hierzu wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

Stufe 1: Grundlagenermittlung und -bewertung

- Ermittlung der Niederschlagsbelastung gemäß Regelwerk und der maßgebenden Grundlagendaten sowie deren Unsicherheitsbereiche (u. a. Klimawandel).
- Aussagen zu erforderlichen Sensitivitätsanalysen.
- Analyse des Betriebsverhaltens und Erstellung eines kalibrierten Kanalnetzmodells.

Stufe 2: Überstaunachweis (kalibriertes hydrodynamisches Kanalnetzmodell)

- Überstaunachweis nach DWA-A 118/DIN EN 752.
- Ermittlung und Darstellung der Bereiche mit Überstau für die Belastungsvarianten.

Stufe 3: Überflutungsbetrachtungen mittels Grob- und Detailuntersuchungen

- Überflutungsbetrachtung DWA-A 118/DIN EN 752:2008 inkl. Sensitivitätsanalysen.
- Stadtgebietsweite Grobanalyse (DGM-Auswertungen, 2D-Oberflächenberechnungen mit direkter oder indirekter Berücksichtigung des Kanalnetzes) zur Identifikation gefährdeter Einzugsgebiete im gesamten Stadt- beziehungsweise Bearbeitungsgebiet.
- Anschließende Erstellung von Detailanalysen kritischer Bereiche durch:
 - Ortsbegehungen,
 - detaillierte gekoppelte 1D-2D-Kanalnetz-Oberflächenmodelle,
 - messtechnische Bewertungen.
- Ermittlung der Bereiche mit Überflutungsgefahr für unterschiedliche Belastungsvarianten.

Stufe 4: Gefährdungs- und Risikoanalyse/Erstellung einer urbane Starkregenisikokarte

- Zusammenstellung und Analyse der Nutzungen und Infrastruktureinrichtungen.
- Ermittlung des Schadens- und Gefährdungspotenzials in den identifizierten entwässerungstechnisch kritischen Gebieten mit Überstau und Überflutungsgefahr.

5.2.3.2 Weitere Empfehlungen/Ausblick

Die DWA hat in dem Themenband „Klimawandel“ (2010) explizit die vernetzte Betrachtung von Kanalnetz-, Gewässer- und Oberflächenabfluss empfohlen sowie Maßnahmen im Kanalnetz und auf der Oberfläche angesprochen. In diesen Kontext gehört auch die Betrachtung der Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen. Darüber hinaus fordern das Klimaschutzgesetz NRW und die aktuelle Novelle des BauGB ausdrücklich, die Anpassung an den Klimawandel in den Planungen zu berücksichtigen (BauBG 2011).

Voraussetzung dafür sind die erforderlichen Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels bzw. den Gefährdungen durch extreme Niederschlagsereignisse sowie ein schlüssiges Konzept zum Umgang mit diesen Informationen. In diesem Zusammenhang beabsichtigen die Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR (StEB) für die kommenden Jahre die folgenden Arbeitsschritte:

- Erarbeitung eines Strategiekonzeptes zum Umgang mit dem Klimawandel in Bezug auf ein verändertes Niederschlagsgeschehen als Entscheidungsvorlage

für den Verwaltungsrat und die Stadt. Darin soll auch der Informationsfluss innerhalb der Stadt und den beteiligten Ämtern sowie nach außen angesprochen werden.

- Aufstellung einer urbanen Starkregenrisikokarte für das gesamte Stadtgebiet von Köln auf Grundlage der bereits vorliegenden Informationen beziehungsweise einer vertieften Detailbetrachtung für besonders durch Überflutung gefährdete Bereiche. Die urbane
- Risikokarte stellt dabei im Bereich Stadtentwässerung und Stadtentwicklung die entscheidende Datengrundlage zur fachübergreifenden Bearbeitung von Maßnahmen zur Überflutungsvorsorge und damit auch zur Anpassung an den Klimawandel bereit.
- Aufzeigen von Lösungsmöglichkeiten für exemplarisch ausgewählte Teilbereiche als Diskussionsgrundlage für zukünftige Handlungsoptionen.

Literatur

- Arbeitsblatt der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.5: Bewertung der Überflutungssicherheit von Entwässerungssystemen, KA 2008, 55 (9), 972-976 Bewertung der Überflutungssicherheit von Entwässerungssystemen, KA 2008, 55 (9), S. 972-976
- BauGB, 2011: Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004, BGBl. I S. 2414, zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Juli 2011, BGBl. I, S. 1509.
- DIN EN 752:2008: DIN EN 752:2008-04. Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2008. Beuth Verlag. Berlin.
- DWA-A 118, 2006: DWA-A 118. Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Hennef. ISBN 978-3-939057-15-4.
- DWA, 2010: Klimawandel – Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. Erarbeitet durch die Koordinierungsgruppe Klimawandel der DWA. Schriftreihe DWA-Themen, Hennef. ISBN 978-3-941897-19-9.
- DWA, 2013: Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge – Starkregen und urbane Sturzfluten. DWA, Hennef. Der genannte Leitfaden ist im August 2013 erschienen.
- DWA AG ES-2.6, 2013: Methoden der Überflutungsberechnung – Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 „Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation“. KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall 2013 (60), Nr. 6, S. 506-511.
- LANUV, 2011: Klimawandel und Überflutungsrisikobetrachtungen mit Einsatz neuer N-A-Modelle im Rahmen des Projektes Köln_21. Unver. Gutachten von Dr. Pecher AG im Auftrag des LANUV NRW, 87 S.
- LANUV, 2012: „Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung“ (KISS). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/abwasser/klimawandel.htm> (03.07.2013).





6 Planungsempfehlungen

Die Stadt Köln hat sich schon 1993 mit ihrem Beitritt zum Klima-Bündnis der europäischen Städte anspruchsvolle Klimaschutzziele gesetzt und sich 2008 mit dem Beitritt zum sogenannten „Konvent der Bürgermeister“ zusätzlich verpflichtet, die 2007 von der EU beschlossenen Klimaschutz- und Energieeffizienzziele für 2020 noch zu übertreffen.

Aufgrund dieser Verpflichtungen hat die Stadt Köln in den letzten 20 Jahren in ihrer unmittelbaren Zuständigkeit eine Reihe von Einzelmaßnahmen mit Klimaschutzeffekten durchgeführt. Zur Bilanzierung des bisher Erreichten und als Basis für die Entwicklung einer langfristig angelegten Klimaschutzinitiative der gesamten Stadtgesellschaft wurden 2010 im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums integrierte Klimaschutzkonzepte für die Teilbereiche Energie und Verkehr in Auftrag gegeben.

Diese haben gezeigt, dass in Köln vor allem die Energieeffizienz verbessert (z. B. durch Ausbau der Fern- und Nahwärme), die Energieeinsparpotenziale zum Beispiel bei der energetischen Gebäudesanierung und dem Stromverbrauch erschlossen sowie umweltfreundliche Verkehrsträger ausgebaut werden müssen. Seit Anfang 2012 erarbeitet die Umweltverwaltung auf Basis der oben genannten Klimaschutzkonzepte ein umfassendes Maßnahmenprogramm.

Trotz aller Klimaschutzbemühungen wird auch die Stadt Köln durch die – nach derzeitigem Wissensstand – nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels betroffen sein: Im Rahmen dieses Projekts konnte gezeigt werden, dass bis Mitte des Jahrhunderts die Hitzebelastung – speziell in der Innenstadt – und Starkniederschlagsereignisse in Köln deutlich zunehmen werden. Dies führt zu erhöhten Belastungen und Risiken für die Bewohner, die Umweltmedien, die Infrastruktur und das Stadtgrün.

Ziel einer verantwortlichen Stadtentwicklung muss es deshalb sein, dezernatsübergreifend diese Belastungen beziehungsweise Risiken näher zu bestimmen, einen Gegensteuerungsprozess herzuleiten und die nicht abwendbaren Folgen des Klimawandels bei allen Investitionen zu berücksichtigen.

Dieser Prozess der Anpassung an den Klimawandel tritt somit an die Seite des Klimaschutzes. Und – wie die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS 2008) ausführt – Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel bilden die zwei tragenden Säulen der deutschen Klimapolitik. Ziel der Anpassung ist es, die Anfälligkeit der Menschen und der Umwelt zu verringern (MUNLV 2009).

Von großer Bedeutung für das künftige Stadtklima sind dabei Maßnahmen zum Umgang mit Starkniederschlägen sowie die Flächen im Stadtgebiet mit hoher Kalt- und Frischluftproduktion.

6.1 Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte (Abb. 6.1) ist eine synthetische Klimaanalysekarte, welche die zukünftig zu erwartenden stadtklimatischen Gegebenheiten in Köln als flächenhafte Übersicht darstellt.

Die Ausweisung der klimatisch aktiven Flächen ist nicht parzellenscharf und es bedarf bei großmaßstäbigen Planungen (z. B. Bebauungsplänen) einer zusätzlichen Auswertung der Grundlagendaten auf Detailebene.

Grundlage für die Karte sind die Berechnungen der Anzahl der heißen Tage für die Periode 2021 bis 2050 (Kap. 4.4), die der Deutsche Wetterdienst mit dem

Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Projektes sowie weiterer Studien, wie dem Handbuch Stadtklima (MKULNV 2011a), werden im Folgenden die Planungshinweiskarte (Kap. 6.1), die Betroffenheitsgebiete in Köln am Beispiel der Betroffenheit durch Wärmebelastung (Kap. 6.2) und Anpassungsmaßnahmen an die zu erwartenden Belastungssituationen sowie Verbesserungsbeziehungsweise Schutzmaßnahmen entwickelt (Kap. 6.3). Im nach Projektabschluss folgenden dezernatsübergreifenden Dialog der Ämter der Stadt Köln werden die Maßnahmen weiter konkretisiert und räumlich differenziert.

Für die Bereiche

- Stadtentwicklung und -planung,
- Landschaftspflege und Grünflächen,
- Mobilität und Verkehr,
- Wasser,
- Boden,
- Biotop- und Artenschutz,
- Gesundheit

werden wichtige Grundlagen und Maßnahmenfelder für die zukünftige Ausrichtung des Anpassungsprozesses in Köln aufgezeigt.

Zu jedem dieser Bereiche werden entsprechende Maßnahmen aufgeführt, gegliedert nach den Themenfeldern Hitzebelastung und Starkniederschlag. Zudem werden erste Beispiele für Köln dargestellt.

Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (Kap. 4.4) vorgenommen hat. Aus dem Ensemble der MUKLIMO_3-Ergebnisse (basierend auf CLM, REMO, WETTREG, STAR; jeweils Emissionsszenario A1B) wurde der für jeden Gitterpunkt höchste Wert im Sinne einer worst-case-Betrachtung ausgewählt. Anschließend erfolgte eine Normierung auf fünf Klassen (sehr hohe bis geringe Belastung).

In der Karte sind zudem die Grünzüge und die lokalen Kaltluftabflüsse dargestellt. Die Windrose zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und -stärke an der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn für die Referenzperiode 1981 bis 2010.

Für den Zeitraum 2021 bis 2050 zeigt sich auf Basis der MUKLIMO_3-Ergebnisse eine Zunahme der Hitzebelastung. Für die Stadt Köln bedeutet dies, dass längere Hitzeperioden mit Temperaturen über 25 °C (Sommertage) und über 30 °C (heiße Tage) vermehrt auftreten. Es sind

bei diesen Hitzeereignissen Temperaturen von 40 °C und mehr möglich. Im Vergleich mit dem Referenzzeitraum (1971 bis 2000) zeigt sich für das gesamte Stadtgebiet mindestens eine Zunahme von 50 Prozent an Sommertagen beziehungsweise heißen Tagen.

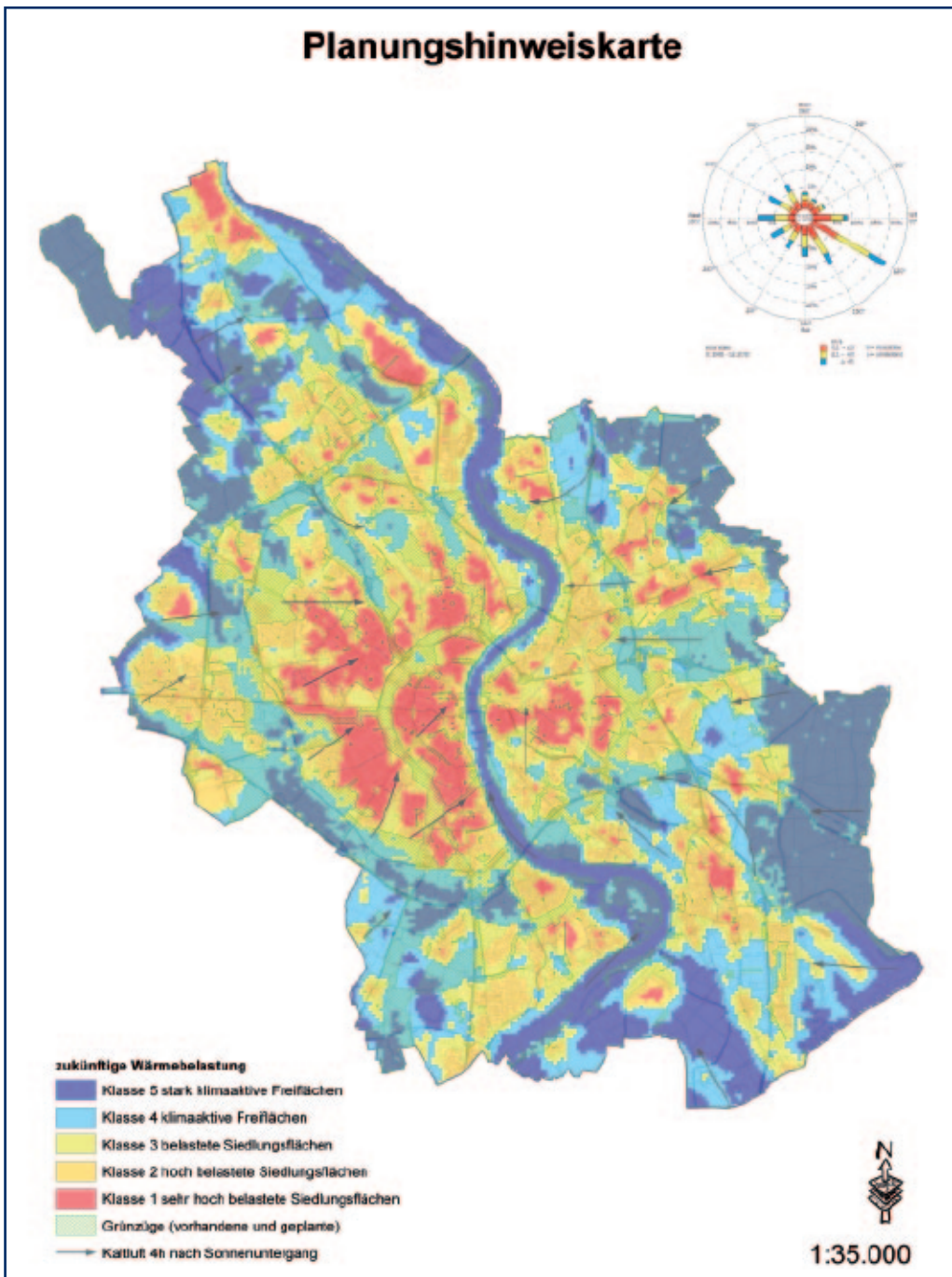


Abb. 6.1: Planungshinweiskarte für das Stadtgebiet Köln; die zukünftige Wärmebelastung (Periode 2021 bis 2050) wird durch die Anzahl heißer Tage des MUKLIMO-Ensembles beschrieben (Klassen 1 bis 5); die eingezeichneten Pfeile beschreiben wichtige Kaltluftabflüsse (Grundlage: KLAM-Modell des DWD); vorhandene und geplante Grünzüge sind eingezeichnet; Windrichtungsverteilung (Windrose) der DWD-Station Flughafen Köln-Bonn (1981 bis 2010).

6.1.1 Klasseneinteilung

Die Planungshinweiskarte ist in fünf Klassen unterteilt, die im Folgenden detailliert beschrieben werden:

Klasse 1 (rot)

Sehr hoch belastete Siedlungsflächen

Die Flächen der Klasse 1 stellen ein **stadtklimatisches Belastungsgebiet höchster Ausprägung** dar, das gekennzeichnet ist durch einen maximal ausgeprägten Wärmeinseleffekt, tagsüber eine hohe Aufheizung, einen verminderten Luftaustausch und eine hohe Luftschadstoffbelastung aufweist.

Diese Klasse ist durch einen hohen Versiegelungsgrad und eine dichte Bebauung charakterisiert. Die Grünanteile sind sehr gering, daher erfolgt kaum Abkühlung durch Verdunstung. Tagsüber findet eine starke Aufheizung statt, die nächtliche Abkühlung ist stark vermindert:

- In den frühen Morgenstunden ist es in der Klasse 1 während Hitzeperioden bereits heute bis rund 10 K wärmer als in den Klassen 4 und 5 (maximaler Wärmeinseleffekt).
- Klasse 1 weist in heißen Sommermonaten – gegenüber den Klassen 4 und 5 – eine um 40 bis 80 Prozent höhere Anzahl von Tagen mit starker Wärmebelastung (Gefühlte Temperatur ≥ 32 °C) auf.
- Die Zahl der Hitzewarntage ist hier in heißen Sommermonaten zwei bis fünfmal höher als in den Klassen 4 und 5.
- Die Zahl der Tropennächte (Lufttemperatur nachts nicht unter 20 °C) ist in dieser Klasse am höchsten, während diese in den Klassen 4 und 5 kaum auftreten.

Die dichte Bebauung führt zu einer Beeinträchtigung lokaler Windsysteme und zur Minderung der Frischluftzirkulation. In den Straßenschluchten können hohe Luftschadstoffkonzentrationen auftreten.

Die rote Klasse weist die höchste Wärmemehrbelastung im Vergleich zum Umland auf.

Klasse 2 (orange)

Hoch belastete Siedlungsflächen

Die Flächen der Klasse 2 stellen ein **stadtklimatisches Belastungsgebiet** dar, das gekennzeichnet ist durch eine starke Veränderung aller Klimaelemente gegenüber dem Freiland, einer potenziell hohen Luftschadstoffbelastung und dem Wärmeinseleffekt.

Die Flächen sind durch eine dichte Bebauung mit mehrgeschossigen Gebäuden und Mehrfamilien- und Einfa-

milienhäusern geprägt. Durch die geringen Grünanteile in Verbindung mit der Bebauung und dem hohen Anteil versiegelter Flächen ist ein Wärmeinseleffekt gegeben, der jedoch gegenüber der Klasse 1 aufgrund des geringeren Versiegelungsgrades und der in Teilen vorhandenen Grünbereiche etwas niedriger ausfällt. Die Grünflächen tragen lokal zur Abkühlung bei. Durch die immer noch relativ dichte Bebauung ist der Luftaustausch beeinträchtigt und die Luft kann daher mit Schadstoffen belastet sein.

- Klasse 2 weist in heißen Sommermonaten – gegenüber der Klasse 1 – eine etwas geringere Anzahl von Tagen mit starker Wärmebelastung auf. Gegenüber dem Umland zeigt sich eine deutlich erhöhte Wärmebelastung.
- Die Zahl der Hitzewarntage ist hier in heißen Sommermonaten weiterhin deutlich gegenüber dem Umland erhöht (Klassen 4 und 5).

Flächen dieser Klasse sind durch eine hohe Wärmemehrbelastung gegenüber dem Umland gekennzeichnet.

Klasse 3 (gelb)

Belastete Siedlungsflächen

Flächen der Klasse 3 stellen eine **stadtklimatische Übergangszone** dar.

Die hierzu gehörigen Flächen liegen am Rand der Klassen 1 und 2 und sind heterogen gestaltet. Sowohl dichte Bebauung, als auch weniger dichte Bebauung und angrenzende Freiflächen sind hier zu finden. Diese Randlagen können auch aus Grün- und Verkehrsflächen bestehen. Je nach Vegetationsbestand kann lokal eine hohe Abkühlung stattfinden (z. B. Friedhofsflächen). Die nächtliche Abkühlung ist etwas höher als in den Klassen 1 und 2, jedoch immer noch eingeschränkt. Lokale Winde werden behindert oder abgebremst. Die Luftschadstoffbelastung ist abhängig von der Ausprägung von Straßenschluchten und des Verkehrsaufkommens. Durch zusätzliche Versiegelung kann es hier schnell zu einer Verstärkung der klimatischen Belastung kommen.

Klasse 4 (hellblau)

Klimaaktive Freiflächen

Flächen der Klasse 4 stellen stadtklimatisch **wichtige Freiflächen** mit ausgeprägtem Tagesgang von Temperatur und Feuchte dar. Sie sind windoffen, weisen eine starke Frisch- und Kaltluftproduktion auf und sind von hoher Sensibilität gegenüber Nutzungsänderungen zum Beispiel Bebauung.



Das Gebiet weist große Freiflächenanteile auf. Durch seinen windoffenen Charakter und die nächtliche Kaltluftproduktion wirkt es als klimatische Ausgleichsfläche für angrenzende Bereiche der Klasse 3. Die Luftschadstoffbelastung ist abseits der Verkehrsflächen im Bereich der Hintergrundbelastung.

**Klasse 5 (dunkelblau)
Sehr klimaaktive Freiflächen**

Flächen der Klasse 5 stellen im Lichte des Klimawandels die stadtklimatisch am **stärksten ausgleichenden Bereiche** dar.

Dicht bewaldete Bereiche sind charakterisiert durch einen nahezu ungestörten, stark ausgeprägten Tagesgang von Temperatur und Feuchte. Zusätzlich sind sie sehr windoffen, haben eine sehr ausgeprägte Frisch- und Kaltluftproduktion und sind sehr sensibel gegenüber Nutzungsänderung zum Beispiel Bebauung.

Durch den im Wesentlichen unversiegelten Boden (Acker- und Grünlandflächen) kann im Bereich des Offenlandes eine hohe nächtliche Kaltluftproduktion stattfinden. Die Kaltluft fließt aufgrund der Topographie in der ersten Nachthälfte in die umliegenden Gebiete. Durch die windoffene Landschaft ist ein ständiger Frischluftstrom vorhanden.

In den von Gehölz dominierten Bereichen findet tagsüber durch die Verschattung eine geringe Aufheizung statt und die Verdunstung über die Blätter trägt zu einer Kühlwirkung bei.

Auch der Rhein fällt in diese Klasse. Allerdings ist der Rhein nachts – durch die Wärmespeicherefähigkeit des Wassers – zum Teil wärmer als die umliegenden Stadtgebiete.

Die Luftschadstoffkonzentration liegt abseits der Verkehrsflächen in der Größenordnung der Hintergrundbelastung.

Auf den Flächen der Kassen 4 und 5 sollte wegen ihrer oben beschriebenen Ausprägungen auf eine Bebauung und sonstige Nutzungsänderungen verzichtet werden.

6.1.2 Erläuterungen

In der Planungshinweiskarte werden mit:

- der Anzahl der heißen Tage für die Periode 2021 bis 2050 (als Maß für die zu erwartende Wärmebelastung),
- der Verteilung der Grünzüge in der Stadt (als potenzielle Frisch- und Kaltluftproduktionsflächen),
- den Kaltluftflüssen (als Maß für die Möglichkeit der Verminderung der innerstädtischen Wärmebelastung),
- der Windrose (woher weht der Wind wie häufig und stark?)

Größen zusammengeführt, welche die siedlungsklimatische Situation für die Einwohner in der Stadt beschreiben. Dadurch hilft diese Karte, die Empfindlichkeit der Flächen bei Nutzungsänderungen zu erkennen und den daraus resultierenden klimatischen Folgen zu bewerten.

Grünzüge (grüne Schraffur)

Dargestellt sind in der Karte die bestehenden und die in der Planung befindlichen Grünzüge.

Dazu gehören in Köln die vorhandenen gesamtstädtischen Grünsysteme, wie zum Beispiel der Äußere Grüngürtel, der Innere Grüngürtel sowie größere städtische Parks. Zusätzlich sind Landschaftskorridore aufgezeigt, die als radiale Korridore zur Vernetzung der städtischen Grünzüge mit dem Umland dienen.

Kaltluftabfluss (graue Pfeile)

Kaltluftabflüsse und lokale Kaltluft(-produktion) spielen vor allem bei windschwachen Wetterlagen mit geringer Wolkenbedeckung eine bedeutende Rolle für die thermischen und lufthygienischen Gegebenheiten eines Gebietes. So können Kaltluftflüsse, die in eine Siedlung eindringen, an Tagen mit Wärmebelastung in der Nacht zu einer deutlichen Abkühlung führen. Sofern die Kalt-

luftströme Frischluft mit sich führen, können sie bei ansonsten für die Durchlüftung ungünstigen Wetterlagen für eine deutliche Verbesserung der Luftqualität sorgen.

In einer austauscharmen Strahlungsnacht fließt die nächtlich entstehende Kaltluft in der ersten Nachthälfte dem Relief der Kölner Bucht folgend hangabwärts. In der zweiten Hälfte der Nacht wird dieser Kaltluftabfluss vom Rheintalwind überlagert. In Köln sind dabei neben der Geländeneigung der Stadt, die von Süden nach Norden etwa sechs Meter beträgt, die Hanggefälle zur Ville im Westen und zum bergischen Höhenrücken im Osten bedeutsam.

Mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 wurden die Kaltluftflüsse flächendeckend und im zeitlichen Verlauf einer windschwachen Strahlungsnacht berechnet. Zusammenfassend sind diese als graue Pfeile in der Karte dargestellt. Hier wurde der Kaltluftabfluss vier Stunden nach Sonnenuntergang dargestellt.

Windrose (Bezugszeitraum 1981 bis 2010 der Station Flughafen Köln-Bonn)

Die Stärkewindrose zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung auf Basis von Stundenwerten. Der Wind weht mit 22 Prozent der Jahresstunden am häufigsten aus dem Richtungssektor 120° (Ostsüdost). Damit wird die Prägung durch das Rheintal und seine flankierenden Höhen an der Station Flughafen Köln-Bonn offensichtlich. In der Stadt Köln ist die Hauptwindrichtung gegenüber der Station am Flughafen leicht nach Südsüdost verschoben.

Aus den drei westlichen Richtungssektoren Westsüdwest, West und Westnordwest weht der Wind am Flughafen Köln-Bonn insgesamt nur in 25 Prozent der Fälle. Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit am Flughafen Köln-Bonn liegt im Zeitraum 1981 bis 2010 bei 3,2 m/s, ein typischer Wert für freie Lagen der Niederrheinischen Bucht.

6.1.3 Beschreibung Planungshinweiskarte

In der Regel haben bauliche Nutzungsänderungen Auswirkungen auf das Stadtklima. Eine geänderte Vegetationszusammensetzung auf einer Fläche wirkt sich kaum aus, während eine großflächige Bebauung einer bislang unversiegelten Freifläche einen gravierenden negativen Einfluss auf das Klima hat. Die Freiflächen wirken mit ihren klimatischen Eigenschaften grundsätzlich positiv

auf das Stadtklima. Flächen mit vielen Bäumen weisen zusätzlich eine thermische Ausgleichsfunktion und Feuchteregulation auf.

Aus klimatischer Sicht sinnvoll sind die Umrandung von Siedlungen mit möglichst weiträumigen Freiflächen und die Durchdringung von Ortschaften mit Grünzügen, die als Luftleitbahnen und Belüftungsschneisen dienen können. Zusammenhängende Grünzüge befinden sich in der Planungshinweiskarte hauptsächlich in den Flächen der Klasse 4 und 5. Teilweise sind zusammenhängende Grünzüge in der Klasse 3 vorhanden, die eine Vernetzung mit den Klassen 4 und 5 bilden, so dass Kaltluft transportiert werden kann. Solche klimatisch wichtigen Vernetzungen bestehen besonders linksrheinisch im Äußeren Grüngürtel und rechtsrheinisch in Mülheim, Buchheim, Höhenberg, Ostheim und Vingst.

Weitere wichtige Grünvernetzungen bestehen auch zwischen den beiden Grüngürteln und in Rodenkirchen vom Rhein in Richtung des Äußeren Grüngürtels. Diese Vernetzungen haben nicht nur eine klimatische Ausgleichsfunktion, sondern stellen zudem sicher, dass die umliegenden Anwohner Zugang zu Grünflächen haben.

Freiflächen

Die Flächen der Klassen 4 und 5 weisen eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen, Versiegelung und Bebauungsverdichtungen auf. Flächen dieser Klassen sollten entsprechend ihrer klimatischen Funktion erhalten bleiben und nicht einer Bebauung zugeführt werden. Das bedeutet, dass die Landnutzung weiterhin eine hohe Kaltluftproduktion zulassen sollte, um gleichzeitig Flächen der Klassen 1 bis 3 mit Kalt- und Frischluft versorgen zu können. Diese Vorgänge sind insbesondere bei austauscharmen Wetterlagen von Bedeutung. Durch lokale oder regionale Windsysteme oder die Geländeneigung fließt kühlere Luft von den Freiflächen in die Stadt und führt dort zu einer Abkühlung und – solange sie nicht über belastete Gebiete fließt – zu einer Verbesserung der Luftqualität.

Siedlungsflächen

Die Flächen der Klassen 1 und 2 können als stadtklimatische Belastungsgebiete eingestuft werden, in denen Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas mit erster Priorität durchgeführt werden müssten. Eine Nutzungsintensivierung durch weitere großflächige Bebauung ist problematisch. Vielmehr sollten hier durch Begrünungsmaßnahmen Minderungseffekte erzielt

werden. Schon heute sind etwa 7,5 Prozent des gesamten Stadtgebietes der roten Klasse zuzuordnen. Auf dem Gebiet der Klasse 1 sind nur sehr kleine Grünflächen vorhanden, die beim Maßstab der Karte kaum sichtbar sind. Die Abkühlfunktion der zusammenhängenden Grünzüge reicht nicht bis in die hoch belasteten Flächen hinein.

Hier sollte dem Wärmeinseleffekt entgegen gewirkt werden, indem viele kleine, vernetzte Grünflächen geschaffen werden, die durch ihre Summenwirkung zu einer Verminderung der thermischen Belastung beitragen.

Insbesondere die dicht bebauten Stadtteile in der Innenstadt und die sie radial umgebenden Stadtteile weisen einen hohen Anteil an sehr hoch belasteten Siedlungsflächen auf. Hierzu zählen der Stadtbezirk Innenstadt mit den Stadtteilen Altstadt-Süd und Altstadt-Nord und Deutz. Auch die Neustadt-Süd und Neustadt-Nord sind in ihren bebauten Bereichen hauptsächlich der roten Klasse 1 zuzuordnen. Hier endet die rote Belastungszone am Inneren Grüngürtel, der eine klimatische Ausgleichsfunktion besitzt.

Die an den Bezirk Innenstadt linksrheinisch anschließenden Stadtbezirke Nippes, Ehrenfeld, Lindenthal und Rodenkirchen weisen ebenfalls eine sehr hohe Belastung auf. So sind die Stadtteile Neuehrenfeld, Ehrenfeld und Bickendorf zu nennen, aber auch Nippes und Braunsfeld. Die Stadtteile Lindenthal, Sülz und Klettenberg weisen dagegen nur teilweise hohe Belastungsbereiche der roten Klasse auf.

Rechtsrheinisch sind die Stadtteile Deutz, Kalk, Gremberg, Vingst und Höhenberg klimatisch besonders belastet, was sich durch die dichte Bebauung und die hohe thermische Belastung begründet. Weiter außerhalb der Innenstadt zeigen sich hohe klimatische Belastungen vor allem in Gewerbe- und Industriegebieten (z. B. das GE Langel, Flittard, Marsdorf, Rath Heumar, etc). Darüber hinaus sind auch die dicht besiedelten Zentren von Porz und Rodenkirchen klimatisch beeinträchtigt.

Der Innere Grüngürtel selbst weist eine orange beziehungsweise gelbe Klasse auf und durchbricht damit als eine Grünschneise die umliegenden roten Flächen.

Außerhalb liegen die dichter bebauten Subzentren „inselartig“ in den klimaaktiven Freiflächen. Diese Siedlungsflächen sind im Kern hoch belastet, da sie nach außen von klimatisch belasteten Siedlungsflächen umrahmt werden. Hier ist wichtig, dass die umgeben-

den klimaaktiven Freiflächen erhalten bleiben, damit sich die klimatische Belastung nicht erweitert und bei austauscharmen Wetterlagen Frisch- und Kaltluft in die Siedlungsgebiete gelangen kann.

In Nippes ragen drei klimaaktive Freiflächen (hellblaue Klasse) in Richtung Innenstadt. Das sind die Flächen entlang der Grenze zwischen Ehrenfeld und Nippes (an der A 57), das Ginsterpfadgelände und die Rennbahn. Dieser Bereich dient als Belüftungsschneise und wirkt als Kaltluftentstehungsgebiet. Auch das Esso-Gelände und die Kaserne in Longerich stellen sich als klimaaktive Fläche dar. Für das Esso-Gelände ist eine Bebauung geplant. Hier wären weitere Maßnahmen nötig, um die günstigen Klimateigenschaften des Geländes zumindest teilweise zu erhalten.

Flächen mit dieser klimatischen Ausprägung sollten im Falle der Überplanung – wie oben am Beispiel des Esso-geländes erwähnt – stadtklimatisch optimiert werden. Gerade für größere Baugebiete ist die klimatische Funktionseinschränkung zu bewerten und ein entsprechender Ausgleich vor Ort wichtig. Jede größere zusätzliche Bebauung erzeugt neue inselartige thermische Lastflächen, die sich nachteilig auf das Kölner Stadtklima auswirken können.

Flächen der gelben Klasse 3, die oft im Stadtgebiet einen klimatischen Puffer zwischen den Randbereichen der Freiflächen der Klassen 4 und 5 beziehungsweise den Siedlungsflächen der Klassen 1 und 2 bilden, sind bei Nutzungsintensivierungen im Einzelfall zu prüfen. Die weniger dicht bebauten Gebiete, mit lockerer Bebauung und durchgrüntem Siedlungen sind klimarelevant, weil sie noch relativ windoffen sind und nachts eine Abkühlung aufweisen. Es sollte darauf geachtet werden, dass eine zusätzliche Bebauung kein größeres Nutzungsmaß wie im Bestand aufweist, und dass weiterhin Windoffenheit bestehen bleibt. Dabei sind vor allem die Hauptwindrichtung Südsüdost und Winde aus westlichen Richtungen von Bedeutung. Eine zusätzliche Bebauung sollte diese beiden Windkorridore durchlässig gestalten. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass Frischluft von den Freiflächen in die Bebauung einsickern kann.

Bei Berücksichtigung dieser Verhältnisse können bei einer moderaten Nachverdichtung die Beeinträchtigungen des Klimas minimiert werden. Besonders wichtig ist es dabei, Leitbahnen für den Luftaustausch hin zu den verdichteten Siedlungsflächen zu erhalten.

6.2 Betroffenheitsgebiete in Köln

Die Betroffenheit oder Anfälligkeit eines Stadtgebietes/ Stadtteils ergibt sich zum einen aus der klimatischen Belastung (z. B. durch Hitze) und zum anderen aus der Sensitivität der dortigen Stadtbewohner bezüglich dieser Belastung (z. B. MUNLV 2010). So führt zum Beispiel eine hohe Wärmebelastung bezüglich der anfälligen Personengruppe über 65 Jahre (Sensitivität) zu einer hohen Betroffenheit eines Stadtteils, wenn der Anteil dieser Personengruppe dort besonders relevant ist.

Eine hohe Betroffenheit wiederum ergibt einen direkten Handlungsbedarf, durch entsprechende Anpassungsmaßnahmen (auch Kap. 6.3) die Betroffenheit zu vermindern oder zumindest nicht zu erhöhen. Zugleich ist durch entsprechende Maßnahmen anzustreben, die Situation in bisher nur mäßig oder wenig belasteten Stadtteilen nicht zu verschlechtern. Im Folgenden wird beispielhaft eine Karte für die Betroffenheit „Wärmebelastung“ gezeigt.

Betroffenheit „Wärmebelastung“

Der Stadtbewohner befindet sich in permanentem Austausch mit seinem urbanen Umfeld. Bewegt er sich im Freien, zum Beispiel in der Innenstadt zum Einkaufen, zum Spaziergehen im Park oder ist er mit dem Rad unterwegs zum Arbeitsplatz, so wirken auf ihn die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftströmung und die Sonnenstrahlung ein. Ein (thermisches) Wohlbefinden stellt sich vereinfacht dann ein, wenn die Energiebilanz des Menschen im Gleichgewicht ist, das heißt wenn Wärmeproduktion und Wärmeabgabe dazu führen, dass sich die Kerntemperatur des Menschen (mit ca. 37 °C) nicht wesentlich erhöht beziehungsweise erniedrigt (Kap. 3.3).

Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freien ergeben sich beim Aufenthalt in Gebäuden andere Situationen. Hier werden Wohlbefinden sowie Wärmestress wesentlich durch die Innenraumtemperatur und die Luftfeuchte in den Räumen bestimmt. Einerseits lassen sich durch technische Einrichtungen wie Klimaanlage oder Außensonnenschutz (z. B. Schattenbäume) optimale Innenraumtemperaturen erreichen. Andererseits können durch das hohe Wärmespeichervermögen der Gebäudehülle insbesondere nachts hohe Wärmebelastungen auftreten.

In Abbildung 6.2 ist die Betroffenheit älterer Menschen in Köln gegenüber Wärmebelastung flächenmäßig dargestellt. Dazu wurde die Anzahl der heißen Tage (Periode 2021–2050, maximale Werte des MUKLIMO-Ensembles,



Kap. 4.4) als Maß für die Wärmebelastung zunächst auf den Wert Eins normiert, so dass alle Werte im Intervall zwischen Null (minimale Zahl heißer Tage) und Eins (maximale Zahl heißer Tage) liegen. In gleicher Weise wurde die Anzahl der Personen, die mindestens 65 Jahre alt sind (Angaben pro Stadtteil), auf das Intervall von Null bis Eins normiert. Anschließend erhält man durch arithmetische Mittelung dieser beiden normierten Werte (für jeden Gitterpunkt) die normierte, synthetische Größe „Betroffenheit älterer Personengruppen gegenüber Wärmebelastung“. Die Werte sind in fünf Klassen unterteilt: sehr hohe Betroffenheit (hohe Wärmebelastung, viele ältere Personen) bis sehr niedrige Betroffenheit (geringe Wärmebelastung, wenig ältere Personen).

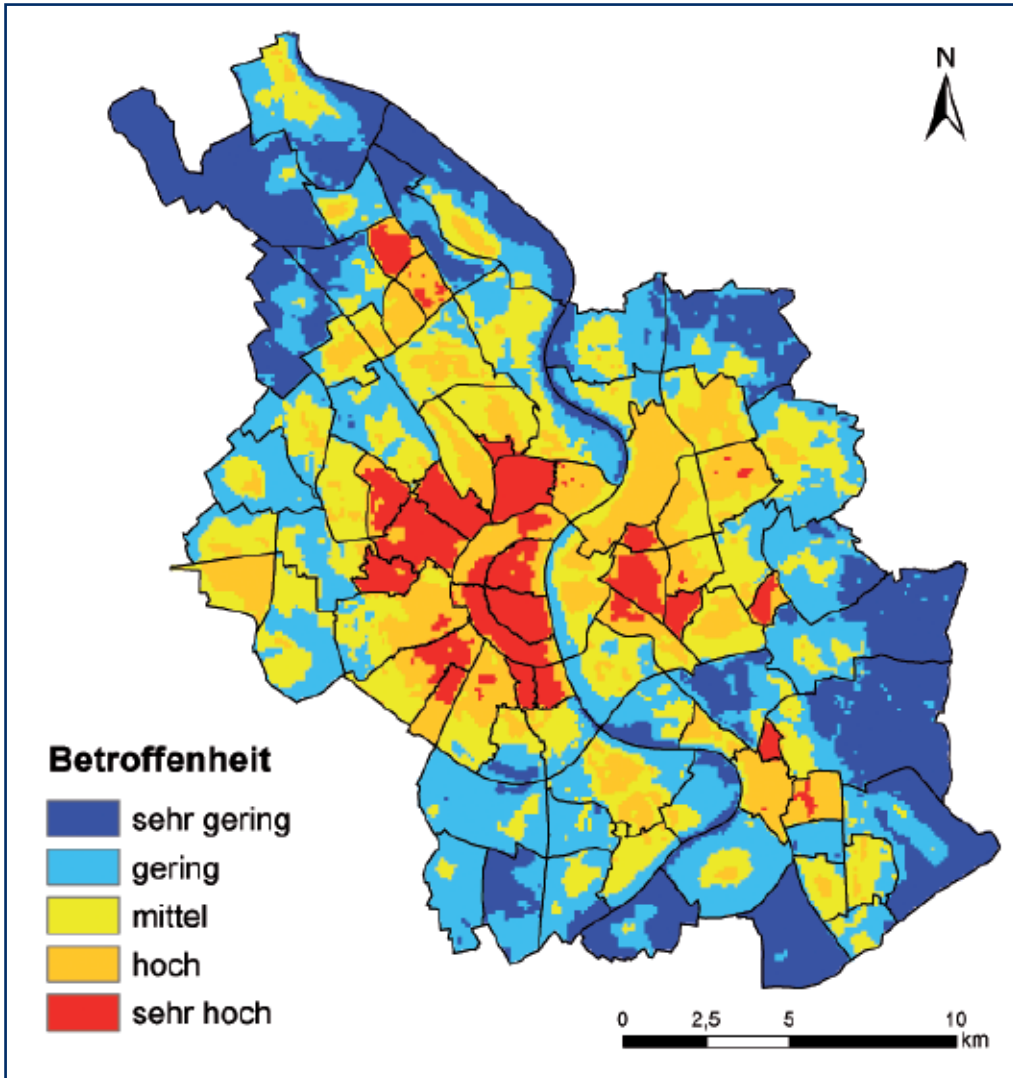


Abb. 6.2: Synthetische Karte der Betroffenheit „Wärmebelastung und ältere Personen“: Verschneidung der normierten Information „heiße Tage“ (Maß für die Wärmebelastung) und „Anzahl Personen mindestens 65 Jahre alt“ (pro Stadtteil); Betroffenheitsskala von sehr hoch (hohe Wärmebelastung, hoher Anteil der älteren Personen) bis sehr gering (niedrige Wärmebelastung, geringe Zahl älterer Personen); Zeitraum: 2021–2050; heiße Tage: maximale Werte des MUKLIMO-Ensembles.

Die Karte kann dazu genutzt werden, bei Neuplanungen von zum Beispiel Seniorenstiften Gebiete mit hoher Betroffenheit zu meiden, genauer zu analysieren oder den Mehraufwand zur Gestaltung komfortabler Wohnungssituationen (Vermeidung von erhöhter Wärmebelastung) und Umfeldsituationen (fußläufige Grünflächen und Schattenbereiche) im Vorfeld abzuschätzen. Auch kann abgelesen werden, in welchen Stadtteilen zukünftig (Zeitraum 2021–2050) aufgrund der hohen Betroffenheit verstärkte Anstrengungen zur Anpassung an den Klimawandel erforderlich sein werden.

Diese Karte ersetzt keine Detailinformationen oder Standortgutachten bei der konkreten Planung eines Vorhabens (z. B. Bau eines Krankenhauses), kann aber bereits in der Konzeptphase wichtige Hinweise geben. In der Praxis wird sich zeigen, um welche Kriterien eine solche Betroffenheitskarte ergänzt werden und wie sie an die Fragestellungen der zukünftigen Stadtentwicklung angepasst werden muss.

6.3 Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel in Köln

6.3.1 Stadtentwicklung und Stadtplanung

Nicht zuletzt durch die Renaissance des städtischen Wohnens wird der Wohnflächenbedarf in Köln in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Eine zentrale Herausforderung der Stadtentwicklung wird es deshalb sein, die Potenziale im Bestand stadtklimatisch unbedenklich zu entwickeln (Flächenkonversion, Nachverdichtung), um die Ausweitung der Siedlungsflächen in Grün- und Freiräume möglichst zu vermeiden. Bei der Siedlungsflächenentwicklung sind auch die Möglichkeiten einer verstärkten regionalen Kooperation zu prüfen.

Auch auf der Objektebene werden künftig die architektonischen, baulichen, technischen und biologischen Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel an Bedeutung gewinnen (z. B. Sonnenschutz und sommerliche Verschattung zur Vermeidung von Hitzebelastung und erhöhtem Energieverbrauch für Klimatisierung). Dies gilt für Neubau und Bestand sowohl bei Wohngebäuden als auch bei Büro- und Gewerbenutzungen.

Bei der Stadtplanung und -entwicklung werden die Berücksichtigung wichtiger Kalt- und/oder Frischluftleitbahnen sowie deren Entstehungsgebiete in ihrer Bedeutung zunehmen: Sie können dazu beitragen, dass kühlere Luft in die Stadt gelangt, das Temperaturniveau in der Stadt abgesenkt und dadurch der zu erwartende verstärkte Energieverbrauch (für Kühlung und Klimatisierung) vermindert wird. Wenn die Energiekosten weiter steigen, wird die Bedeutung von Wärmeschutzmaßnahmen zusätzlich zunehmen.

Ziel ist eine gleichbleibende oder verbesserte Aufenthaltsqualität und Behaglichkeit in Gebäuden (Neubau) und im Stadtraum bei gleichzeitiger Vermeidung erhöhter Energieverbräuche zu Heiz- und Kühlzwecken. Ziel der Stadtentwicklung und Stadtplanung muss es außerdem sein, den Lebensraum Stadt attraktiv und lebenswert zu erhalten.

Maßnahmen aus dem Bereich der Stadtentwicklung

Aufgrund der Ergebnisse dieses Projektes zeichnen sich für die Kölner Siedlungsflächen in Folge des Klimawandels gravierende Änderungen ab, die eine langfristige Anpassungsstrategie erforderlich machen.

Aus Sicht der Stadtentwicklung sind die städtischen Strukturen gezielt so weiter zu entwickeln, dass die Lebensqualität im städtischen Raum in klimatischer

Hinsicht gewahrt wird und insbesondere gesundheitsgefährdende Auswirkungen der zunehmenden sommerlichen Hitzewellen möglichst verhindert oder zumindest minimiert werden. Hierzu wurden in einem ersten Schritt eine Planungshinweiskarte (Kap. 6.1) und eine Karte zur Betroffenheit durch Wärmebelastung (Kap. 6.2) erstellt. Sie sollen Hilfestellung geben, um Siedlungsbereiche mit prioritärem Handlungsbedarf zu identifizieren und mit einer auf die jeweilige Bebauungsstruktur abgestimmten Planungsstrategie zu versehen, die anschließend unter Beachtung ortstypischer Besonderheiten und aktueller Veränderungschancen in ein ämterübergreifendes Maßnahmenpaket münden.

Die Planungshinweiskarte zeigt deutlich ausgeprägte Wärmeinseln, die sich linksrheinisch innerhalb des Militärrings nahezu flächendeckend zu einem Wärmearchipel zusammenfügen. Dämpfend wirken sich innerhalb dieses Bereichs lediglich der Rheinstrom, der Innere Grüngürtel und die großen radialen Grünzüge aus. Der Äußere Grüngürtel zeigt eine deutlich geringere Aufheizung als die benachbarten Siedlungsbereiche. Im Rechtsrheinischen ist die höchste Aufheizung der Sommertage in den Siedlungsbereichen in Deutz, Kalk, Humboldt-Gremberg und Höhenberg sowie Vingst zu konstatieren.

Auffällig sind neben den hochverdichteten innerstädtischen Bereichen insbesondere Gewerbegebiete mit großflächigen Produktions-, Lager- und Messebauten (Feldkassel, Marsdorf, Großmarktgelände in Bayenthal, ChemPark in Flittard, Messe Deutz).

Außerhalb der bereits genannten, großflächigen Bereiche lassen sich einzelne größere Wärmeinseln zum Beispiel in Worringen, Rodenkirchen und Porz konstatieren, jedoch unterliegen kleinräumig in allen Ortsteilen die zentralen Geschäftslagen mit ihrer hohen baulichen Verdichtung und Überbauung der Gefahr sommerlicher Überhitzung.

Zur Reduzierung der bioklimatischen Belastung muss erreicht werden, dass die Wärmebelastung im Freien sowie in den Gebäuden möglichst gering gehalten wird. Dies geschieht wesentlich durch Verminderung der Absorption und Speicherung von Strahlungsenergie durch die Bausubstanz, durch die Grün- und Freiflächen in den hochverdichteten Siedlungsbereichen sowie durch die Erhaltung und Förderung groß- und kleinräumiger Luftaustauschprozesse.

Verringerung der Überhitzung in den hochverdichteten Siedlungsbereichen

In den hochbelasteten Siedlungsbereichen können mit Hilfe entsprechender baurechtlicher Vorschriften bei Neubauten und Altbausanierungen:

- die Rückstrahlwirkung (Albedo) von Dächern, Fassaden und Flächen durch die Wahl reflektierender Materialien und heller Farben erhöht,
- die Aufheizung von Dächern durch Dachbegrünungen und von Fassaden durch Verschattung (u. a. Balkone, Dach- und Mauervorsprünge) und Begrünung verringert,
- die Aufheizung von Hof- und Platzflächen durch Entsiegelung, Baumpflanzungen, Verschattungselemente (Überdachungen, Pergolen, Zeltplanen) und helle Pflasterung sowie von Straßenräumen und Fassaden durch Baumpflanzungen, beziehungsweise Fassadenbegrünungen, reduziert werden.

Entsprechende Vorschriften müssten in Bebauungsplänen und in Baugenehmigungen für Bauvorhaben in den oben genannten hochverdichteten Siedlungsbereichen verbindlich vorgeschrieben werden.

Insbesondere bei der weiteren Bebauung von Blockinnenbereichen in der Innenstadt sind Ausgleichsmaßnahmen vor Ort zwingend mit der Baugenehmigung vorzuschreiben. Die aktuelle Diskussion zur Nachverdichtung des Innenbereichs als Folge des Bevölkerungswachstums und der damit verbundenen Flächenknappheit ist diesbezüglich kritisch zu hinterfragen.

Ebenso müssen Maßnahmen ergriffen werden gegen die übermäßige Aufheizung von großen Gewerbegebieten, zum Beispiel durch Vorgaben über die maximale Flächenversiegelung, begrünte Dächer oder Solaranlagen als Verschattungselemente auf den Hallendächern und zur Ableitung von Wärme, Baumpflanzungen und Begrünungen entlang der Straßen entsprechend dem Gestaltungsprinzip von „Gewerbeparks“ etc.

Im öffentlichen Raum könnte zum Beispiel für Platzgestaltungen per Ratsbeschluss verbindlich vorgeschrieben werden, dass ein bestimmter Prozentanteil der Platzfläche durch Baumpflanzungen oder Verschattungselemente vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen ist. Ebenso sollten besonders die Geschäftsstraßen in den Zentren der Vororte im Rahmen von Umgestaltungsmaßnahmen verstärkt als baumbestandene Boulevards ausgeführt werden. Schatten als Schutz für die Fußgänger und zur Vermeidung der Überhitzung

der Verkaufsräume. Hierfür müssen Flächen – auch in Konkurrenz zu Verkehrsflächen – zur Verfügung gestellt werden.

Förderung der Stadtdurchlüftung

Die Stadt wird durch das großräumige Windsystem durchlüftet, das durch das Rheintal und seine Randhöhen modifiziert wird. Speziell bei windschwachen Wettersituationen können nächtliche Hangabwinde von der Ville und aus dem Bergischen Land sowie Luftströmungen entlang des Rheins (Rheintalwind) eine wichtige Rolle spielen (siehe Planungshinweiskarte).

Der Luftaustausch zwischen Kaltluft produzierenden Flächen (z. B. begrünte Freiflächen) und den Siedlungsbereichen kann allgemein gefördert werden durch:

- Freihaltung der Frischluftbahnen aus den Kaltluftentstehungsgebieten,
- eine möglichst winddurchlässige Bepflanzung im Randbereich der Grünflächen,
- aufgelockerte Baustrukturen (offene Bauweise) an den Siedlungsrändern,
- Unterbrechungen von geschlossenen Blockrandstrukturen in innerstädtischen Wohngebieten (ist jedoch abzuwägen gegen die dadurch verstärkten Probleme mit dem Lärmschutz und den städtebaulichen Gestaltungsqualitäten).

In Köln ist darauf zu achten, dass insbesondere die Kaltluft-Austauschgebiete (Frischluftschneisen) weitestgehend von Bebauung freigehalten werden. Dies betrifft die Freiflächen um die Kölner Vororte im Osten (Höhenhaus, Dellbrück, Brück, Rath/Heumar) ebenso wie die Freiflächen zwischen den Vororten im Südwesten (Rondorf, Hürth-Hermülheim, Frechen; hier ist allerdings eine regionale Zusammenarbeit erforderlich).

Es wäre zu untersuchen, ob sich die Luftaustauschprozesse vom Äußeren Grüngürtel in die südwestlichen Wohngebiete Sülz, Klettenberg und Raderthal durch eine partielle Öffnung des Waldstreifens an der Militärringstraße (Auslichten des Baumbestandes) gezielt verbessern ließen.

Weiterhin sind Möglichkeiten und Chancen zum Ausbau von Durchlüftungsräumen mit Priorität und ohne qualitative Abstriche zu nutzen, zum Beispiel mittels Verlängerung des Inneren Grüngürtels in Raderthal/Bayenthal bis zum Rhein. Es ist insbesondere darauf zu achten, dass bei der Umnutzung solcher Bereiche nicht wieder Hitzeinseln entstehen, sondern im Gegenteil

Luftaustauschprozesse mit den angrenzenden Wohngebieten mittels durchlässiger Baustrukturen im Randbereich von Durchlüftungsräumen gefördert werden.

Anpassungsmaßnahmen im Verkehrsbereich

Hier sind folgende Anpassungsmaßnahmen denkbar und auf ihre Umsetzungsmöglichkeit hin zu überprüfen:

- Entsiegelung überdimensionierter Straßen- und Kreuzungsflächen,
- Verwendung von hellem Asphaltbeton für die Fahrbahnen,
- Begrünung von Straßenräumen (s.o.),
- schattenspendende Überdachungen an möglichst vielen oberirdischen Haltestellen von Stadtbahn und Bussen,
- Ausrüstung beziehungsweise Nachrüstung aller Busse und Stadtbahnen mit Klimaanlage.

Bei der Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wohn- und Lebensqualität in Köln ist im Übrigen neben dem prognostizierten Temperaturanstieg und den möglichen Folgen von Starkregenereignissen auch die bestehende Schadstoffbelastung der Luft als weiterer Stressfaktor zu berücksichtigen. Insofern sollte eine integrative Betrachtung unter Einbeziehung der Empfehlungen aus dem Klimaschutzkonzept Mobilität erfolgen.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass ein Klimaanpassungskonzept nur dann Aussicht auf Umsetzung hat, wenn sich alle Fachämter die Inhalte des Konzepts zu eigen machen. Es wird empfohlen, eine ämterübergreifende Arbeitsgruppe einzurichten, in der alle betroffenen Ämter angemessen eingebunden sind. Diese Arbeitsgruppe sollte das zu entwickelnde Maßnahmenpaket im Vorfeld der politischen Diskussion ausarbeiten.

Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Stadtentwicklung und Stadtplanung“ sind der Tabelle 6.1 zu entnehmen.

6.3.2 Landschaftspflege und Grünflächen

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Klimaprojektionsrechnungen zur künftigen Zunahme der Wärmebelastung und Veränderung der Niederschlagsverteilung¹ sind für die Arbeit des Amtes für Landschaftspflege und Grünflächen von großer Bedeutung. Zum einen untermauern sie die Notwendigkeit, vorhandene Grün- und Freiflächen zu erhalten und zu sichern und liefern Argumente für die Entwicklung neuer Grünflächen zum Beispiel in Konversionsgebieten. Darüber hinaus unterstützen sie die bisher verfolgte Anpassungsstrategie der Weiterentwicklung des Kölner Straßenbaumbestandes und der Umwandlung der Forstflächen.

Sicherung und Entwicklung des Grünsystems

Die Stadt Köln verfügt über ein besonderes gesamtstädtisches Grünsystem. Das in den 1920er Jahren konzipierte und in den folgenden Jahrzehnten ausgebaute Grünsystem erfüllt neben der Erholungsnutzung auch wichtige klimatische (Durchlüftung, Mikroklima) und ökologische Funktionen. Aus diesem Grunde ist es oberstes Ziel der Stadt- und Grünplanung, dieses System zu erhalten und dort, wo sich die Chance ergibt, auch weiter auszubauen. Eine solche Gelegenheit ergibt sich aktuell in der südlichen Innenstadt mit der Verlagerung des Großmarktes. Aufbauend auf dem Städtebaulichen Masterplan Innenstadt und dem Entwicklungskonzept südliche Innenstadt-Erweiterung soll der Innere Grüngürtel von der Luxemburger Straße bis an das Rheinufer verlängert werden. Hierzu wurden im Projekt detaillierte Untersuchungen mit dem Stadtklimamodell ENVI-met durchgeführt und spezifische Empfehlungen entwickelt.

¹ Zunahme der Sommer- und heißen Tage/Hitzebelastung/Zunahme von Starkniederschlagsereignissen.



Auch das Impulsprojekt Äußerer Grüngürtel, das mit einer regen Beteiligung der Bürger durchgeführt wurde, hat nicht nur die Bedeutung dieses Wald- und Wiesen-gürtels deutlich gemacht, sondern auch Möglichkeiten zur Erweiterung, vor allem im rechtsrheinischen Stadtgebiet aufgezeigt.

Insbesondere die Entwicklung eines feingliedrigen durchgängigen Grünnetzes in der Gesamtstadt wirkt den Folgen des Klimawandels entgegen. Im Rahmen des Projektes RegioGrün (www.regio-gruen.de) konnte auf dem Kölner Grünsystem aufgebaut werden. In enger Zusammenarbeit mit den Umlandgemeinden wurden mehrere Landschaftskorridore ausgewiesen, die geeignet sind, die Verbindung vom Äußeren Grüngürtel bis in die Waldzonen der Ville und des Bergischen Landes herzustellen. Diese radialen Korridore erfüllen neben dem Schutz der Landschaft auch wesentliche stadtgliedernde Funktion in diesem durch Wachstum geprägten suburbanen Raum. Darüber hinaus fördern sie die Frischluftbildung und -zirkulation sowie das Mikroklima.

Entwicklung des Straßenbaumbestandes

Die Prognosen zeigen sehr eindrucksvoll, wie sich das Klima in Köln in den nächsten Jahrzehnten verändern und die Anzahl der Sommertage zunehmen wird. Dies hat zur Folge, dass sich auch die Standortbedingungen für Straßenbäume in den verdichteten Stadtquartieren weiter verschlechtern werden. In der Konsequenz verstärkt diese Tendenz die verfolgte Anpassungsstrategie der Stadt Köln zur Erhöhung der Artenvielfalt des Straßenbaumbestandes. Um dieses Ziel voranzubringen nimmt das Amt für Landschaftspflege und Grünflächen an einem bundesweiten Straßenbaumtest teil und erprobt „neue Baumarten“ für den Standort Straße. Im Rahmen von Neubaumaßnahmen werden gezielt „neue Baumarten“ gepflanzt. Neu- oder Ersatzpflanzungen von Bäumen werden in Hinblick auf die Verbesserung des Standortes gepflanzt (Substrat, Belüftung etc.).

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass Bäume für Neu- und Ersatzbepflanzungen so zu wählen sind, dass sie den zukünftigen Umweltbedingungen standhalten: geringe Anfälligkeit sowohl bei sommerlichen Trockenperioden als auch bei Frostperioden sind dabei wesentliche Aspekte.

Die Prognosen legen den Schluss nahe, dass die jetzt schon vorhandenen neuen Schadorganismen (z. B. Kastanienminiermotte, Asiatischer Laubholzbockkäfer, Massaria) infolge der günstigeren Umweltbedingungen

(höhere Temperaturen) weiter zunehmen und gegebenenfalls bisher noch nicht heimische Schadorganismen auftreten werden. Hierdurch könnten sich der Aufwand und somit auch die Kosten zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit weiter erhöhen.

Vor dem Hintergrund reduzierter Haushaltsmittel stellt sich die Erhaltung des Straßenbaumbestandes als Herausforderung dar. Aus Verkehrssicherungsgründen müssen derzeit in Köln jährlich etwa 300 bis 400 Bäume gefällt werden. Da die Finanzierung von Ersatzpflanzungen jedoch nur in geringem Maße gewährleistet ist, müssen langfristig entsprechende Haushaltsmittel bereitgestellt werden und alternative Finanzierungskonzepte erarbeitet werden.

Entwicklung des Waldbestandes

Die klimatischen Veränderungen werden auch Einfluss auf die Waldbestände haben. Die Forstverwaltung betreut 4.000 Hektar Wald im Stadtgebiet. Extremwetterereignisse wie „Kyrill“ haben gezeigt, dass standortgerechte Waldbestände widerstandsfähiger gegenüber solchen Ereignissen sind. Aus diesem Grunde hat sich die Forstverwaltung schon seit Jahren das Ziel gesetzt, nicht standortgerechte Waldbestände umzubauen.

Mit der Anlage des sogenannten „Waldlabors“ sind darüber hinaus weitergehende Maßnahmen eingeleitet worden. Zum einen wurde ein „Energiewald“ angelegt, in dem Baumarten gepflanzt wurden, die sich durch schnelles Wachstum und eine hohe Holzproduktion auszeichnen. Hierzu gehören zum Beispiel Pappel- und Weidenarten. Im Umtriebsverfahren sollen diese Bestände alle fünf Jahre „auf den Stock“ gesetzt werden. Dabei kann das Schnittgut für die Energieproduktion verwendet werden. Neben diesen wurden auch heimische Baumarten angepflanzt, die heute noch keine große forstliche Bedeutung haben, diese jedoch vor dem Hintergrund des Klimawandels noch erlangen können. Die Auswahl dieser Baumarten erfolgte nach wissenschaftlichen Erkenntnissen. In einem weiteren Teil des Waldlabors hat die Forstverwaltung ein neues Konzept zur Waldvermehrung erarbeitet. Unter dem Motto „Ein Wald für Köln“ konnten Bürger für die Pflanzung von Bäumen spenden und auch selbst pflanzen, um so den neuen Wald zu realisieren. Das Projekt konnte innerhalb von drei Jahren umgesetzt werden und findet nun im rechtsrheinischen Stadtgebiet seine Fortsetzung. Es wird mit einer weiteren Zunahme des Trockenstresses für Straßenbäume, Parkanlagen, grundwasserferne Waldbestände und landwirtschaftliche Flächen gerechnet. Die Bedeutung von begrünten Dächern und Ver-

kehrflächen und die Notwendigkeit zur Reduzierung der Wärmeabstrahlung von Fassaden nehmen zu. Extremwetterergebnisse werden häufiger auftreten und können den Baumbestand dezimieren. Die Qualität der Grünausstattung muss so gestaltet werden, dass sie dauerhaft erhalten werden kann.

Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Landschaftspflege und Grünflächen“ sind der Tabelle 6.2 zu entnehmen.

6.3.3 Mobilität und Verkehr

Extremwetterereignisse mit Schnee, Eis, Nebel, Hagel, Hitzewellen, Stürmen, Starkregen, Hoch- und Niedrigwasser in Flüssen beeinträchtigen den Verkehr auf Straße, Schiene, in der Luft und im Wasser. Bei Starkregen verschlechtert sich die Sicht im Straßenverkehr, die Fahrsicherheit nimmt ab und es kommt zu mehr Unfällen. Starkregen kann aber auch Straßen und Bahntrassen unterspülen oder Hangrutsche verursachen. Häufigere Niederschläge im Winter beeinträchtigen den Fußgänger- und Radverkehr.

Hitze wirkt sich nachteilig sowohl auf die Verkehrsteilnehmer als auch die Infrastruktur aus. Die Konzentrationsfähigkeit der Fahrer nimmt ab, der Asphalt weicht auf und es entstehen Spurrillen. Befestigte Verkehrsflächen verstärken die Aufheizung in sommerlichen Hitzeperioden.

Bei hohen Temperaturen heizen sich Verkehrsmittel und -anlagen stark auf, so dass das Wohlbefinden der Verkehrsteilnehmer beziehungsweise die Benutzbarkeit beeinträchtigt wird. Bauart und Baustoffe müssen in der Zukunft verändert, das heißt angepasst, werden. Hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit erfordern zur Abführung größere Entwässerungssysteme. Milde Winter könnten aber auch Vorteile für Verkehrsteilnehmer und Infrastruktur haben: Schäden an Brücken und Straßen durch Frost werden verringert. Durch Schnee und Eis verursachte Unfallzahlen könnten abnehmen.

Auch im Schienenverkehr sind Menschen und Verkehrsinfrastruktur voraussichtlich von den Folgen des Klimawandels betroffen. In den letzten Jahren waren zum Beispiel defekte Klimaanlagen von ICE-Zügen immer wieder ein Thema. Neben Auswirkungen auf manche gesundheitlich betroffenen Menschen sind auch die Folgen für die Infrastruktur bedeutsam. Orkanartige Winde können Signale zerstören und die Stromversorgung lahmlegen, umgefallene Bäume unterbrechen Gleisabschnitte. Die Rheinschifffahrt wird durch Niedrig- und Hochwasser eingeschränkt.



Die Mobilitätsbedürfnisse der Menschen werden durch die Förderung des Fuß- und Radverkehrs sowie durch den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) umweltverträglich realisiert.

Die Klimaveränderungen führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erhöhten Instandhaltungskosten und einer verkürzten Lebensdauer der Infrastruktur.

Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Mobilität und Verkehr“ sind der Tabelle 6.3 zu entnehmen.

6.3.4 Wasser

Der Klimawandel wirkt sich auf die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung aus. Es ergibt sich eine jahreszeitliche Verschiebung der Niederschläge sowohl in Intensität, als auch Verteilung. Im Winter wird der Niederschlag seltener als Schnee fallen, was zu einer Verschiebung der winterlichen Abflüsse in den Flüssen führt: Der Niederschlag wird als Regen direkt über die Flüsse geleitet und nicht zeitlich versetzt zur Schneeschmelze im Frühjahr. Dies kann zu einer zeitlichen Verschiebung von Hochwasserereignissen, besonders an kleineren Flüssen, führen. Am Rhein sind größere Hochwasserereignisse (Ende des Winters) daher weniger wahrscheinlich.

Der Rat der Stadt Köln hat 1996 ein Hochwasserschutzkonzept beschlossen. Dies sieht im ganzen Stadtgebiet bauliche Hochwasserschutzmaßnahmen vor, die insgesamt umgesetzt werden konnten. So ist der Kölner Norden vor einem Hochwasser geschützt das alle 200 Jahre auftritt, während der Süden einen 100-jährlichen Schutz aufweist. Zur Senkung der Hochwasserspitze



werden zwei Retentionsräume (in Köln-Worringen und in Porz-Langel) auf Kölner Stadtgebiet gebaut.

Im Sommer kommt es im Mittel zu einer Verminderung der Niederschlagsmengen. Die Folgen können häufigere Niedrigwasserstände in den Flüssen und Bächen – speziell während anhaltender Trockenperioden – sein. Auf dem Rhein wird die Schifffahrt durch häufigeres Niedrigwasser beeinträchtigt und die Kühlwasserversorgung der Kraftwerke kann gefährdet sein.

Sommerliches Niedrigwasser oder sogar Trockenfallen in Kölner Bächen und Feuchtgebieten wird die Gewässerfauna und -flora belasten und die Wasserqualität verschlechtern. Wärmere Flüsse und Seen enthalten weniger Sauerstoff, darin lebende Tiere und Pflanzen werden beeinträchtigt.

Bei stehenden Gewässern wie Weihern und Teichen (Parkgewässer) kann die besonders im Sommer zunehmende Erwärmung zur Verschlechterung der Wassergüte und der Lebensbedingungen für Tiere und Pflanzen führen. Die Parkgewässer sind gekennzeichnet durch eine geringe Wassertiefe und somit durch eine fehlende Zonierung des Wasserkörpers. Dies führt dazu, dass sich das Wasser schnell erwärmen und der Sauerstoffgehalt erheblich sinken kann. Der hohe Nährstoffeintrag, zum Beispiel durch Füttern von Wasservögeln, führt zudem zu einem vermehrten Algen- und Unterwasserpflanzenwachstum. Die Zersetzungsprozesse der abgestorbenen Pflanzen zehren zusätzlich den im Wasser gelösten Sauerstoff. Dies kann in Extremsituationen zu einem Fischsterben führen.

Aufgrund der hohen Belastung der Parkgewässer durch Erholungssuchende, der beschriebenen Struktur der

künstlichen Parkgewässer und der Verschlechterung der Wasserqualität, ist zu erwarten, dass der Pflege- und Unterhaltungsaufwand zunehmen wird.

Wenn sich die Hauptniederschläge in die Wintermonate verschieben und es im Sommer längere Trockenperioden gibt, wird auch das Grundwasser beeinflusst, das weiterhin für die anteilige Eigengewinnung des Trinkwassers in Köln benötigt wird. Bei den Grundwasserständen wird mit größeren Schwankungen im Jahresgang gerechnet (Höke et al. 2011). Die Grundwasserstände werden durch häufigere bau- und landwirtschaftsbedingte Wasserentnahmen beeinflusst. Dies kann in den durch den Klimawandel vermehrt auftretenden Hitzesommern zu einer Absenkung der Grundwasserstände führen.

Zwischen der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung und dem Bedarf für Beregnungswasser in der Landwirtschaft und für Grünanlagen kann häufiger eine Konkurrenzsituation entstehen. Regional kann dies während lang andauernder Trockenperioden zu Engpässen in der Wasserversorgung führen.

Auch Veränderungen der Trinkwasserqualität sind nicht auszuschließen. Der Aufwand, sauberes Trinkwasser zur Verfügung zu stellen, steigt, wenn Schadstoffe und Krankheitserreger im Trinkwasser zunehmen.

Zudem wird es, wie in diesem Projekt gezeigt wurde, vermehrt Extremwetterereignisse mit Starkregen geben. Diese treten lokal auf und lassen sich räumlich nicht exakt vorhersagen. Durch die hohen Niederschlagsmengen, die in einem kurzen Zeitraum fallen, können in betroffenen Gebieten Überschwemmungen auftreten. Keller und tiefliegende Gebiete können direkt oder

durch den Überstau des Kanalnetzes und den Rückstau geflutet werden. Mit den prognostizierten häufiger auftretenden Überflutungen der Straßen bei Starkregen sind vermehrt Schadenersatzforderungen zu erwarten. Auch ist im Sommer aufgrund zunehmender Starkregeneignisse mit Kanalnetzüberlastungen zu rechnen. Somit nimmt der Entwässerungskomfort durch häufiger auftretenden Rückstau und Überstau in den Straßen ab. Im Sommer wird mit den erwarteten Trockenperioden gegebenenfalls ein höherer Betriebsaufwand für die Kanalreinigung anfallen. Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Wasser“ sind der Tabelle 6.4 zu entnehmen.

6.3.5 Boden

Der Boden ist ein zentrales Hauptmerkmal des Landschaftshaushaltes und ein wichtiges Bindeglied zu anderen Schutzgütern. Die Begehrlichkeiten, den Boden zu nutzen, sind vielfältig. Alle anthropogenen Nutzungen führen zu belastenden Beanspruchungen des Bodens. Dabei werden die natürlichen Bodeneigenschaften beeinträchtigt und die positiven Effekte des Bodens auf Klimaschutz und Klimawandel gemindert (MKULNV 2011b).

Wesentliches Charakteristikum des Bodens in Bezug zum Klimaschutz ist seine Fähigkeit Kohlenstoffdioxid zu speichern. Ferner ist der Boden hinsichtlich des Klimawandels aufgrund seines Wasserhaushaltes bedeutsam. Der intakte Boden trägt mit seiner Kühlleistung wesentlich zur Minderung der Erwärmung durch den Klimawandel bei.

Böden selber werden aber auch durch die veränderte Klimasituation beeinflusst.

- Die Bodeneigenschaften verändern sich. Das Risiko der Degradation steigt und führt zu Einschränkungen beziehungsweise dem Verlust der natürlichen und nutzungsbezogenen (Landwirtschaft, Forstwirtschaft) Bodenfunktionen.
- Eine Verschiebung der Gleichgewichtszustände der natürlichen Kreisläufe (z. B. Wasserkreislauf, Kohlenstoffkreislauf etc.) führt zu einer Veränderung der Wechselwirkungen mit entsprechenden Rückkopplungseffekten zwischen Boden und Klima/ klimatischen Faktoren, welche Auswirkungen auf das (lokale) Klima haben (können). Zwischen Böden und Atmosphäre findet neben der Freisetzung von Kohlenstoffdioxid auch ein Austausch klimarelevanter Gase wie Methan und Stickoxiden (NO_x) statt.

Es ist daher erforderlich, Maßnahmen zu ergreifen, die natürlichen Funktionen des Bodens vor den nutzungsbedingten Auswirkungen des Klimawandels zu schützen beziehungsweise die klimatischen Ausgleichsfunktionen (z. B. lokaler klimatischer Ausgleich durch Evaporation und Transpiration) von Böden zu erhalten, zu verbessern oder wiederherzustellen und klimatische Verstärkungs-/ Rückkopplungswirkungen zu verhindern.

Die Nutzung/Bewirtschaftung und Überplanung von Böden sollte folgenden Risiken entgegenwirken (Gaßner et al. 2012):

- Verlust/Veränderung und Beeinträchtigung organischer Bodensubstanz (Kohlenstoffvorrat (Humusvorrat)),
- Verlust/Veränderung und Beeinträchtigung des Bodenwasserhaushalts – insbesondere bezogen auf den Standort,
- Bodenverdichtung,
- Wasser- und Winderosion,
- Mobilisierung von Schadstoffen.

Ziel ist es, dass die positiven klimatischen Auswirkungen der Bodeneigenschaften erhalten bleiben und die Klimaveränderungen sich möglichst geringfügig auf die Multifunktionalität (insbesondere die natürlichen Funktionen) der Böden auswirken können.

Im Bereich der Stadt Köln sind die Bodentypen vielfältig. Eine städtische Bodenfunktionskarte, welche auch Aussagen über Kohlenstoffvorrat und Bodenwasserhaushalt ermöglicht, ist in Vorbereitung.

Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Boden“ sind der Tabelle 6.5 zu entnehmen.

6.3.6 Biotop- und Artenschutz

Infolge des zu erwartenden Klimawandels ist aufgrund der zum Teil begrenzten Anpassungsmöglichkeiten gerade der spezialisierten Arten zu erwarten, dass sich auch Veränderungen bei der Verbreitung der heimischen Tier- und Pflanzenwelt einstellen. Da über die Ökologie vieler Spezies nur ein sehr lückenhaftes Wissen besteht und zudem die ökosystemaren Verknüpfungen sehr komplex und darüber hinaus kaum erforscht sind, ist dabei nicht absehbar, welche Folgen sich dadurch für die einzelnen Ökosysteme und deren Biodiversität und damit letztendlich auch für den Menschen ergeben.

Ein Effekt des Klimawandels kann die Verbreitung sogenannter invasiver Arten sein. Dies sind gebietsfrem-



de Arten, die unerwünschte Auswirkungen auf andere Arten, Lebensgemeinschaften oder Biotope haben. Hierzu zählen neben dem japanischen Knöterich, der ganze Gebiete überwächst, auch der aus dem Kaukasus stammende Riesenbärenklau, der infolge phototoxischer Reaktionen Verbrennungen verursachen kann, oder das ursprünglich aus Nordamerika stammende Beifußblättrige Traubenkraut (Ambrosia), dessen hochallergenen Pollen zu allergischen Reaktionen und saisonalem Asthma führen können (BFN: Neoflora. Invasive, gebietsfremde Pflanzen in Deutschland, www.floraweb.de/neoflora/).

Da die Artenzusammensetzung vielen dynamischen Prozessen unterworfen ist, lässt sich bei den invasiven Arten nur schwer einschätzen, ob die Ausbreitung dieser Spezies in erster Linie klimabedingt erfolgt, oder welche anderen Faktoren (z. B. Störungsgrad, Vorbelastung der Flächen durch Schadstoffe, Nährstoffhaushalt, Einfuhrmöglichkeiten) hier zusätzlich eine Rolle spielen. Daher ist eine Vorhersage über die Entwicklung und Auswirkung einzelner eingewanderter Arten meist nicht möglich. Insgesamt stellen invasive Arten durch Verdrängungseffekte jedoch weltweit eine der größten Gefährdungsursachen für die biologische Vielfalt dar. Daher ist es erforderlich, eine Ausbreitung soweit wie möglich einzudämmen, zum Beispiel durch ein Verbot zumindest der bewussten Einfuhr fremdländischer Arten. Es erweist sich als äußerst schwierig, geeignete Maßnahmen zu finden und diese zu ergreifen, da auch infolge der Eingriffe weitere Schädigungen verursacht werden können.

Veränderungen der heimischen Tier- und Pflanzenwelt sind aber nicht nur in Bezug auf die invasiven Arten zu verzeichnen, sondern auch im Bereich der heimischen Flora und Fauna zu beobachten. Dabei ist erkennbar, dass sich vor allem Wärme liebende Arten weiter nach Norden ausbreiten. Ein Beispiel hierfür stellt die Blauflügelige Sandschrecke (*Sphingonotus caeruleus*) dar. Galt sie in NRW in den 80er Jahren noch als ausgestorben, so wurde sie 1994 in Köln wiederentdeckt (Küchenhoff 1996). Inzwischen hat diese Art bereits das Ruhrgebiet erreicht und eine weitere Ausbreitung nach Norden ist zu erwarten. Auch der Bienenfresser, eine eher südlich verbreitete Art, brütet inzwischen relativ beständig in NRW. Ähnliches gilt auch für die Zauneidechse, die zurzeit einen messbaren Populationszuwachs in Köln aufweist (Nekum 2012).

Insgesamt werden die Wärme liebenden Arten von der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung profitieren. Arten der feuchten und kühleren Gebiete dagegen sind zunehmend im Rückzug begriffen. So ist zum Beispiel damit zu rechnen, dass der Bergpieper, der zurzeit noch im Schwarzwald und dem Harz verbreitet ist, bei weiter ansteigenden Temperaturen in seiner Population deutlich zurückgehen wird.

Infolge des zurzeit prognostizierten Klimawandels ist eine wesentliche Verstärkung dieser Tendenz zu erwarten. Überlagert wird dieser Effekt noch durch ebenfalls klimatisch hervorgerufene veränderte Konkurrenzbedingungen, die zum Beispiel durch Veränderungen im Zugverhalten (u. a. kürzere Zugrouten, frühere Heimkehr von Zugvögeln) verstärkt werden (Baierlein 2006). Infolge der unterschiedlichen Anpassungsfähigkeit der einzelnen Tier- und Pflanzenarten ist dabei zu erwarten, dass es zu einer nicht absehbaren Umgestaltung der heute existierenden Lebensgemeinschaften kommt. Die anpassungsfähigen haben gegenüber den spezialisierten Arten dabei einen starken Vorteil, und es ist damit zu rechnen, dass besonders stenöke Arten langfristig aussterben werden (MKULNV 2010).

Um die prognostizierten Folgen zu mildern ist es daher wichtig, Konzepte zu entwickeln, die einige dieser Effekte auffangen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, neben dem Erhalt und der Erweiterung von naturnahen Bereichen, dass die Durchgängigkeit der Landschaft sichergestellt wird. So wird eine weitgehend ungestörte Wanderung einzelner Arten zu Bereichen ermöglicht, die den ökologischen Ansprüchen nach der Erwärmung noch gerecht werden. Während hier für flugfähige Arten Trittstein-

biotope meist ausreichend sind, ist es für die schwach mobilen Arten von besonderer Bedeutung, gute Vernetzungsstrukturen zu schaffen. Dies gestaltet sich jedoch angesichts der schon vorhandenen starken Zerschneidung der Landschaft, vor allem durch Verkehrswege, besonders schwierig.

Ein wichtiger Ansatz ist dabei das über die europäische FFH- und Vogelschutzrichtlinie ins Leben gerufene Schutzgebietssystem Natura 2000. In Köln zählen hierzu neben der Wahner Heide, dem Chorbusch und dem Worringer Bruch inzwischen auch der Königsforst, der Thielenbruch, sowie die Fischruhezone des Rheines zwischen Emmerich und Bad Honnef.

Verbundmaßnahmen können zwar dazu beitragen, dass eine Wanderung einzelner Arten in klimatisch günstigere Bereiche möglich wird. Andere Effekte, wie zum Beispiel die aufgrund der Erwärmung bereits in Ansätzen zu beobachtende Verschiebung der Vermehrungsphase zwischen Beute und Räuber, sind auf diese Weise nicht in den Griff zu bekommen. Auswirkungen auf die Artenvielfalt sind daher schwer prognostizierbar.

Auch die zu befürchtenden negativen Auswirkungen auf den Menschen selber (Massenverbreitung von Schadinsekten oder Parasiten, zum Beispiel durch fehlende Feinde oder Verbesserung der Lebensbedingungen für die Schädlinge, Zunahme von allergenen Substanzen) sind kaum einzudämmen.

Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Biotop- und Artenschutz“ sind der Tabelle 6.6 zu entnehmen.

6.3.7 Gesundheit

Als wesentliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit kommen die folgenden Punkte in Betracht:

- Überflutungen durch Starkregenereignisse und dadurch ausgelöste Gesundheitsrisiken,
- Hitzestress und hitzebedingte Erkrankungen,
- Infektionserkrankungen – indirekt über Insekten übertragen oder direkt über Lebensmittel,
- Zunahme von Allergien (z. B. durch Ambrosia-Pollen) oder irritative Reaktionen auf Umweltreize (z. B. Eichenprozessionsspinner).

Erhöhte Belastungen für Allergiekranke werden nicht nur durch eine zukünftig längere und früher einsetzende Pollensaison, sondern auch durch das vermehrte Auftreten – bisher nicht heimischer – Pflanzenarten mit Allergiepotezial erwartet. So verlängert derzeit



insbesondere die *Ambrosia artemisiifolia* die Pollensaison, da deren Blühphase von Juli bis zum ersten Frost dauert. Von einer durch den Klimawandel bedingten Verlängerung der Vegetationszeit in den Herbst hinein wird die Ambrosia voraussichtlich profitieren, da die Art dann vermehrt Samen ausbilden und sich damit besser ausbreiten kann.

Auch die weitere Verbreitung des Eichenprozessionsspinners wird im Zusammenhang mit dem Klimawandel gesehen. Der wärmeliebende Falter hat sich in den letzten Jahren in vielen Städten weiter verbreitet. Seit 2007 werden vielfach intensive vorbeugende Bekämpfungsmaßnahmen durchgeführt und Eichen in Grünanlagen von Schulhöfen, Kindereinrichtungen, Sportstätten einzeln mit einem die Raupen schädigenden aber für den Menschen unschädlichen Bakterium (*Bacillus thuringiensis*) präventiv besprüht. Waldgebiete werden vom Hubschrauber aus besprüht. Dennoch hat sich die Raupe weiter ausgebreitet, so dass die Nester der Eichenprozessionsspinner von den befallenen Bäumen abgesaugt werden mussten.

Im Hitzesommer 2003 starben allein in Deutschland rund 7.000 Menschen an Herzinfarkt, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Nierenversagen, Atemwegsproblemen und Stoffwechselstörungen als Folge hitzebedingter Belastungen (Ingendahl und Thieme 2009). Besonders in urbanen Gebieten ist mit einer dramatischen Zunahme hitzestressbedingter Mortalität zu rechnen, von der vor allem ältere Menschen und Patienten mit bestimmten Erkrankungen (z. B. Herzkreislauf- und Atemwegser-

krankungen) betroffen sein werden (Hübler et al. 2007). Auch psychische Folgen von Extremwetterereignissen, Allergien (z. B. Allergische Rhinitis = Heuschnupfen), vektorübertragene Erkrankungen (z. B. Frühsommer-Meningoenzephalitis, Dengue-Fieber) oder auch UV-strahlungsbedingte Erkrankungen (Hauttumore, Katarakt) müssen als mögliche indirekte Auswirkungen des Klimawandels betrachtet werden (Sperk und Mücke 2009, Eis et al. 2010). Sowohl die Ausbreitung von heimischen (wie Hantaviren, Borrelien, FSME) als auch von neuen Krankheitserregern (z. B. über Asiatische Tigermücke, Dengueviren, Chikungunya-Viren) sowie das mögliche Auftreten neuer Infektionskrankheiten wird in den Gesundheitsämtern beobachtet. Bislang gibt es keine Hinweise, dass diese Erkrankungen vermehrt auftreten. Das regionale Geschehen und die internationale Literatur müssen weiter beobachtet werden, um frühzeitig auf neu auftretende Entwicklungen vorbereitet zu sein.

Gesundheit braucht eine gute Umgebung – Planungsempfehlungen

Der Klimawandel trifft primär vulnerable Bevölkerungsgruppen, also Menschen, die aufgrund ihres Alters (Senioren, Kleinkinder), eingeschränkter Mobilität oder einer Erkrankung dem Hitze- oder Kältestress beziehungsweise starken Temperaturschwankungen nicht ausweichen können. Diese Menschen zu schützen, muss als besondere Fürsorgepflicht der Stadt Köln betrachtet werden.

Anhand der Karte zur Betroffenheit „Wärmebelastung“ (Kap. 6.2) lassen sich die Gebiete identifizieren, in denen ältere Personen von Hitzestress besonders betroffen sein können. Neben der Bevölkerungsstruktur sind die Bebauungsart, die Frei- und Grünflächenanteile, das Vorhandensein von Frischluftschneisen und die Erreichbarkeit von Erholungsräumen als Präventionsmaßnahmen ausschlaggebend (Wittig und Schuchardt 2013, Blättner et al. 2009). In diesem Sinne ist auch die Planungshinweiskarte (Kap. 6.1) ein gutes Werkzeug zur Berücksichtigung des Aspekts Gesundheit bei zukünftigen Planungen.

Die Architektur und Positionierung der Gebäude sowie Stadt- und Landschaftsplanung haben einen großen Einfluss darauf, ob sich die Wärme – vor allem in bebauten Gebieten – staut. Um Hitzestress zu verhindern, sollten insbesondere in Ballungszentren offene, unverbaute Frischluftkorridore existieren. Auch Grünanlagen (sogenanntes „Stadtgrün“) und Gewässer (sogenanntes „Stadtblau“) wirken wie „Kälteinseln“ (Ingendahl und Thieme 2009).

Risiken für die Bewohner, die kommunale Infrastruktur oder das Stadtgrün werden durch hochsommerliche Extremtemperaturen, starke Niederschläge, Dürreperioden und Stürme weiter steigen. Dies erfordert zusätzliche Anpassungen beim Betrieb und beim Ausbau der Infrastruktur. Von großer Bedeutung für das Stadtklima sind neben den städtebaulichen Rahmenbedingungen auch die Kalt- und Frischluftproduktionsflächen und -austauschbahnen innerhalb des Stadtgebietes. Auf der Grundlage von Szenarien beziehungsweise Prognosen sollten daher stadtteilbezogene Betrachtungen für Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich des Stadtklimas angestrebt werden. Ziel der Bemühungen, die möglichst dezernatsübergreifend und mit den dafür notwendigen personellen Ressourcen in Köln bearbeitet werden sollten, muss es sein, die Folgen der Klimaänderungen in der Stadt und für die Stadt zu minimieren. Bei allen Investitionen sollten die zu erwartenden Klimaänderungen berücksichtigt werden (Dt. Städtetag 2012).

Grünanlagen und Gewässer dienen beispielsweise als klimaökologische Ausgleichsräume, Schadstoffsenken und Erlebnis-, Begegnungs-, Bewegungs- und Regenerationsräume. Insofern sind der Erhalt, die Schaffung und die Erweiterung von Grünräumen und Gewässern im Rahmen einer nachhaltigen, gesundheitsförderlichen, integrierten Stadtentwicklungsplanung zu fordern (Junior Forschungsgruppe 2012). In vielen Städten bilden Gewässerachsen wichtige radiale Frischluftschneisen, welche die städtische Überwärmung abmildern können. Große Wasserflächen (Seen) haben eine eigenständig kühlende Wirkung (Kistemann et al 2012).

Deshalb sollte auch in Köln möglichst darauf verzichtet werden, Freiflächen durch neue Straßen, Parkplätze und Häuser zu versiegeln. Im Gegenteil sollten, wenn die Prognosen ernst genommen werden, mehr Planungen erfolgen, die die Ausweisung von Grünflächen (Stadtgrün) und Gewässern (Stadtblau) vor allem in den von den Klimaveränderungen betroffenen Gebieten erleichtern. Ein erster Schritt könnte zum Beispiel die Reaktivierung von Brunnen und Wasserinstallationen sein. Auch können Gewässer zu Marketingzwecken und zur Imagebildung genutzt werden. So beschreibt sich die Stadt Köln beispielsweise als „Stadt des Wassers“ (KölnTourismus 2013).

Darüber hinaus muss zukünftig vermehrt darauf geachtet werden, dass insbesondere Krankenhäuser sowie Pflege- und Seniorenheime so ausgestattet sind, dass die Bewohner keiner gesundheitsgefährdenden Hitze-

belastung ausgesetzt sind. Die Hitzewarnsysteme (z. B. www.dwd.de/hitzewarnungen) müssen den Pflegekräften so zur Verfügung stehen, dass sie die alleinstehenden älteren Menschen, aber auch die Personen in den Pflegeeinrichtungen, frühzeitig über Verhaltensregeln bei Hitzewellen informieren, Hilfeleistungen anbieten und so die Gesundheit dieser Personen schützen können. Die Maßnahmen zum Handlungsfeld „Gesundheit“ sind der Tabelle 6.7 zu entnehmen.

6.3.8 Tabelle mit Maßnahmenfeldern

In der nachfolgenden Tabelle werden konkrete Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel – sortiert nach den obigen Themenfeldern aufgeführt. Sie sollen den

Verantwortlichen aus Politik und Stadtverwaltung, aber auch dem Bürger Ideen und Anregungen vermitteln, wie dem Klimawandel in einer Stadt wie Köln begegnet werden kann.

Die Maßnahmenvorschläge wurden aus der Sicht der Klimaanpassung aufgrund der Ergebnisse dieses Projektes speziell für die Stadt Köln entwickelt und erarbeitet. Viele dieser Maßnahmen und Ideen lassen sich aber auch für andere Städte anwenden. Ein Gespräch mit den Fachexperten zeigt auf, welche Ideen direkt übertragbar sind, welche modifiziert werden müssen oder welche weiteren Maßnahmen die jeweilige Kommune auf den richtigen Weg zur Klimaanpassung führen können.

Tabelle 6.1: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Stadtentwicklung und Stadtplanung“ in Köln.

Maßnahmen Stadtentwicklung und Stadtplanung	
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ■ Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, sollen bei allen städtebaulichen Planungen festgesetzt werden. Planungen sollten stadtklimatisch optimiert werden. Hilfsmittel: Planungshinweiskarte, meteorologische Messungen, Simulationen mit Stadtklimamodellen (z. B. ENVI-met, MUKLIMO_3). ■ Bauleitpläne sind stadtklimatisch zu optimieren. Die im Zuge der BauGB-Klimanovelle zur Verfügung gestellten städtebaulichen Instrumente, die in der Tendenz dem Klimawandel entgegenwirken und einer Anpassung an den Klimawandel dienen, sollten von den Planungsträgern verstärkt genutzt werden (Schmidt 2013). ■ Im Flächennutzungsplan können und sollten Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken und der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden (Schmidt 2013, siehe auch §5 BauBG). ■ In Bebauungsplänen sind klimatische Ausgleichsmaßnahmen festzusetzen. Zudem sind in Bauvorhaben nach §34 BauGB Nebenbestimmungen zu klimatischen Ausgleichsmaßnahmen vorzugeben. ■ Überprüfung der städtischen Standards im Hinblick auf die Vorbildrolle der Stadt. ■ Neubauten, die bei der Wärmeversorgung nur noch einen vergleichsweise geringen Beitrag zum Klimawandel leisten, sind nur noch als Niedrigstenergiegebäude im Sinne der EU-Richtlinie 2010/31/EU (Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden) zu realisieren. ■ Förderanreize für Investoren sind zu schaffen, klima-(wandel)gerechte Neubaumaßnahmen durchzuführen. ■ Prüfung der Ausweisung neuer Gewerbegebiete, beziehungsweise Konzeption klimawandelgerechter Gewerbegebiete. ■ Rückbau versiegelter Flächen. ■ Identifikation von eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten und Flächen, die später geflutet werden können. ■ Klimatische Ausgleichsmaßnahmen sind in belasteten Gebieten vor Ort durchzuführen.

Tabelle 6.1: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Stadtentwicklung und Stadtplanung“ in Köln. (Forts.)

	Maßnahmen Stadtentwicklung und Stadtplanung
Hitzebelastung	■ Kaltluft- und Frischluftschneisen sollen bei der zukünftigen baulichen Entwicklung erhalten und in ihrer Funktionsfähigkeit verbessert werden.
	■ Bei künftigen rheinufern nahen Bebauungen oder Umbauten sind die Gebäude so zu platzieren, dass die Kaltluftbahnen in die Innenstadt hineinwirken können.
	■ Bei der Beachtung der lokalen Kalt- und Frischluftsysteme sind insbesondere der Rheintalwind sowie die lokalen Kaltluftabflüsse von der Ville und dem Bergischen Höhenrand zu berücksichtigen.
	■ Berücksichtigung stadtklimatischer Gesichtspunkte bei der Gestaltung von Gebäuden und Freiflächen (z. B. Freihalten von Kaltluftschneisen, Oberflächenentsiegelung, höhere Reflektionsgrade).
	■ Freihalten von Frischluftbahnen aus den Kaltluftentstehungsgebieten.
	■ Besserer Schutz der Gebäude vor Aufheizung (Passivhausstandard bei Neubauten, aber auch Sanierung von Altbauten). Verminderung der Aufheizung außerhalb des Gebäudes (helle Fassaden, schattenspendende Bäume, Dachbegrünung) ist stets den Maßnahmen im Haus (Klimatisierung) vorzuziehen.
	■ Unterbrechung von geschlossenen Blockrandstrukturen in innerstädtischen Wohngebieten, um die Durchlüftung und den Kaltluftfluss zu verbessern.
	■ Durch hellere Oberflächen (z. B. durch entsprechende Zuschläge in bituminösen Fahrbahndecken) kann die Rückstrahlung erhöht und damit die Aufheizung vermindert werden.
	■ Reduktion der bioklimatischen Belastung durch Einflussnahme auf das Wärmespeichervermögen der Bausubstanz.
	■ Verstärkte wärmetechnische Sanierungsrate bestehender Gebäude.
	■ Im Zuge des Projektes wurde der städtebauliche Entwurf für die neue Nutzung des ehemaligen Großmarktgeländes in Bayenthal mit dem Modell „ENVI-met“ analysiert und hinsichtlich der Durchlüftung und Temperaturentwicklung optimiert. Nachweislich wirksame klimatische Optimierungsmaßnahmen sollen, soweit mit den anderen abwägungsrelevanten Belangen harmonisierbar, bei allen städtebaulichen Planungen festgesetzt werden.
	■ Städtische Wärmeinseln sind planerisch zu begrenzen (intensive Begrünung, Bewässerung von Grünanlagen, Neuanlage von Brunnen und Reaktivierung alter Brunnen).
	■ Das Aufheizen von Dächern und der darunter liegenden Wohnräume kann durch begrünte Dächer vermindert werden (möglichst große Mächtigkeit des Substratuntergrundes, Möglichkeiten der Bewässerung nutzen).
	■ Intensive Dachbegrünung ermöglicht einen hohen Anteil von Regenwasserrückhalt und sollte vermehrt in belasteten Gebieten umgesetzt werden. Für eine klimaverbessernde Wirkung auf Quartiersebene sollen möglichst viele Häuser begrünte Dächer erhalten (Kuttler 2011).
	■ Entsiegelungsprogramm in klimatisch hoch belasteten Stadtteilen, zum Beispiel Innenhofentsiegelungen.
■ Die Aufheizung von Hof- und Platzflächen kann durch Entsiegelung, Rasenflächen, Baumbepflanzung, Verschattungselemente (Überdachungen, Pagoden, Zeltplanen) und helle Pflasterung verringert werden.	
■ Eine Verschattung von Fassaden durch technische Maßnahmen und durch Begrünung mit Pflanzen.	

Tabelle 6.1: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Stadtentwicklung und Stadtplanung“ in Köln. (Forts.)

	Maßnahmen Stadtentwicklung und Stadtplanung
Hitzebelastung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verschattungspotenziale auf Plätzen und im Straßenraum sind zu erhöhen (keine steinernen Plätze). Bäume so platzieren, dass der Schattenwurf – und somit der Schutz vor Wärmebelastung – in den Laufwegen der Passanten maximal ist.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes (Optimierung des Fensterflächenanteils, hochwertiger Sonnenschutz, aktivierbare Speichermassen: Nachtlüftungskonzept).
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Objektbezogene Prüfung sämtlicher Neubaugebiete hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel (z. B. Berücksichtigung sommerlicher Verschattung und winterlicher Verschattungsfreiheit solare Optimierung) sowie Optimierung des Klimaschutzes (maximaler Wärmeschutz, Kraft-Wärme-Kopplung).
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Unterstützung und Förderung der Entsiegelung.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Die klimaverträgliche Nachverdichtung im Bestand hat Priorität vor der weiteren Außenentwicklung. Grenzen sind dort erreicht, wo die Nachverdichtung der Überhitzung von Stadtgebieten Vorschub leistet.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbindliche Festsetzung von Verschattungsarealen (Bäume, Verschattungselemente) auf öffentlichen Plätzen durch Ratsbeschluss.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bei Bauvorhaben, Bebauungsplänen sind klimatische Ausgleichsmaßnahmen in belasteten Gebieten zwingend vor Ort durchzuführen.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Neue Konzeption für Gewerbegebiete bezüglich der Vermeidung übermäßiger Aufheizung der Gebäude und der Umgebung.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Stadtklimatische Lastgebiete werden gezielt ermittelt und umgestaltet. Hilfsmittel können sein Planungshinweiskarten oder Belastungskarten (Karten zur Vulnerabilität).
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bei der (Neu)Gestaltung von städtischen Parks sollte ein Optimum an Schatten spendenden Bäumen (Verminderung der Wärmebelastung), großen Rasenflächen (Kaltluftentstehung) und geringem Heckenanteil, bzw. kleinen Baumgruppen (geringe Beeinträchtigung der Luftströmung) angestrebt werden.
Starkniederschlag	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung der natürlichen Standorteigenschaften in Neubaugebieten und auch im Bestand bei der Planung von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Türen und Fenster sollen über der Rückstauenebene liegen und vor Überflutungen geschützt werden.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Intensive Dachbegrünung verstärkt zum zeitlichen Rückhalt von Starkniederschlägen nutzen, um das Überflutungsrisiko zu verringern.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Stärkere Berücksichtigung der Überschwemmungsgefährdung bei Stadt- und Straßenplanung (z. B. durch entsprechende Straßen- und Geländegestaltung).
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grundsätzlich sollen die Regenwasserbewirtschaftung und der Überflutungsschutz stärker in der Stadtplanung, der Straßen-, Brücken- und Hochbauplanung berücksichtigt und die natürlichen abiotischen Standorteigenschaften nicht beeinträchtigt werden.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schaffung eines Informationspools aus Vertretern der Stadt Köln, der Polizei, der Feuerwehr und anderer Organisationen des Katastrophenschutzes zur Identifikation der Bereiche von Köln mit besonders anfälliger Infrastruktur.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Information der Bürger zum Schutz vor den Folgen von Starkregenereignissen ist eine Gemeinschaftsaufgabe. Erstellung einer Infobroschüre zur Thematik „Privater Objektschutz“.
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Information der Bürger, das Rückstauschutz vorhanden sein sollte und regelmäßig gewartet werden muss.

Tabelle 6.2: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Landschaftspflege und Grünflächen“ in Köln.

	Maßnahmen Landschaftspflege und Grünflächen
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ■ Der innerstädtische Baumbestand wird erhalten, beziehungsweise ausgeweitet. ■ Die Grünflächen sollen erhalten und erweitert werden, um die Kaltluftzufuhr in die Stadt zu sichern und weiter zu steigern. ■ Wegfallende Bäume bei Baumaßnahmen/Bauleitplanung werden vor Ort ausgeglichen. ■ Neue, auch nicht heimische Straßenbäume, die den Folgen des Klimawandels gewachsen (hitzeresistent und frostresistent) sind, werden gepflanzt. Baumlisten zum Beispiel GALK-Straßenbaumliste (www.galk.de), Kuttler (2011). Die Arten- und Sortenanzahl wird erhöht, um Gefährdungen durch Pflanzenschädlinge vorzubeugen. ■ In der Stadt sind zur Vernetzung der innerstädtischen Grünräume und als Kaltluftproduzenten neue Grünzüge mit Schatten spendenden Bäumen zu schaffen. ■ Konversionsflächen in der Innenstadt werden in Grünanlagen umgestaltet. ■ Zentrale innerstädtische Parkanlagen werden über Verträge erweitert oder erhalten Restflächen aus aufgelassenen Nutzungen (z. B. Verkehrsflächen). ■ Straßenbahnanlagen werden als Rasengleise angelegt.
Hitzebelastung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Niederschlagswasser für die Bewässerung von Grünanlagen nutzen (optimale Transpiration und Kühlleistung der Pflanzen auch bei sommerlichen Trockenperioden). ■ Im Stadtwald werden einheimische und mediterrane Baumarten hinsichtlich ihrer Eignung erprobt. ■ Die Fläche des Kölner Stadtwaldes vergrößert sich durch den gezielten Ankauf und die Aufforstungsmaßnahmen der nachhaltigen Forstwirtschaft. ■ Bestehende und geplante Stellplätze für Kraftfahrzeuge und Parkpatzflächen (Gewerbegebiete) – soweit möglich – mit Rasen ausstatten (Rasenpflastersteine) und mit großkronigen Bäumen verschatten. ■ Erstellung von Bewässerungskonzepten unter Berücksichtigung der natürlichen Standorteigenschaften.
Starkniederschlag	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bau von Wasserspeichern/Zisternen im Bereich von innerstädtischen Grünflächen, zur Nutzung des Regenwassers bei Hitzeperioden (Bewässerung) beziehungsweise zur Entlastung der bestehenden Wasserableitungssysteme bei Starkregen (Zwischenspeicher). ■ Verstärkte Nutzung von Grünflächen als Überflutungsraum. Eingriff in die Topografie der Grünflächen mit dem Ziel der Wasserspeicherung.

Tabelle 6.3: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Mobilität und Verkehr“ in Köln.

	Maßnahmen Mobilität und Verkehr
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ■ Förderung der Mobilität durch leistungsfähige und optimal vernetzte Verkehrswege (Kombination von ÖPNV, CarSharing, Fahrradmietsysteme usw.). ■ Verminderung der verkehrsbedingten Luftschadstoffbelastung (Stickoxide, Feinstaub) in den hitzebelasteten Bereichen mittels Beschränkung der Durchfahrt für starke Emittenten.
Hitzebelastung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verwendung von hellem Asphaltbeton für die Fahrbahnen. ■ Entsiegelung überdimensionierter Straßen- und Kreuzungsflächen. ■ Um die Aufheizung von Straßenräumen zu begrenzen, kann die Beschattung durch Bäume und/oder baulichen Sonnenschutz verstärkt werden. Insbesondere für wartende Passanten (an Lichtsignalanlagen oder Haltestellen) ist Sonnenschutz wichtig. ■ Die Klimatisierung öffentlicher Verkehrsmittel wird fortgesetzt, um die Benutzbarkeit bei Hitzewellen sicherzustellen. Fahrzeugseitige Sonnenschutzmaßnahmen (Wärmeschutz) und die Beschattung von Wartepositionen (Betriebshöfe, Endstationen) sind vorzusehen.
Starkniederschlag	<ul style="list-style-type: none"> ■ Durch Überdachung von Wartebereichen und Fahrradabstellmöglichkeiten können die Auswirkungen von Niederschlagsereignissen auf die Verkehrsmittelwahl minimiert werden. ■ Die Flutung der U-Bahn durch eindringendes Wasser infolge von Starkregenereignissen erfolgt in einem kurzen Zeitraum. Entsprechende Notfall- und Evakuierungspläne sind zu erstellen. ■ Bei Verkehrsanlagen, deren Standfestigkeit oder Funktionsfähigkeit durch Starkregenereignisse bzw. daraus resultierende Überschwemmungen gefährdet sein können, muss die Bauweise, insbesondere die Entwässerung darauf angepasst werden. ■ Die heutige Entwässerungsqualität muss für die Verkehrsanlagen des schienengebundenen ÖPNV und einen strategischen Teil des Straßennetzes (z. B. Hauptverkehrswege) aufrechterhalten werden. Besonderes Augenmerk muss dabei auf den unterirdischen beziehungsweise tief liegenden Verkehrsanlagen liegen. Beispielsweise sind die Pumpen in Unterführungen zu überprüfen und gegebenenfalls nachzurüsten. ■ Im nachgeordneten Straßen- und Wegenetz sind temporäre Sperrungen bei Starkregenereignissen und Sturmereignissen möglicherweise unvermeidbar. Für kritische Netzabschnitte können neben Einsatzplänen auch begleitende Verkehrsmanagementstrategien vorbereitet werden. ■ Bei Straßenplanungen ist zu beachten, dass Straßen grundsätzlich als Rückhalteraum bei Starkregenereignissen dienen können. Dies ist mit dem Ziel der Barrierefreiheit abzustimmen. So ist zu prüfen, ob wichtige Querungsstellen über dem Rückstauniveau liegen. ■ Unterirdische Verkehrsanlagen (U-Bahn, Tunnel) sind vor eindringendem Niederschlagswasser zu schützen. Zudem können bei langanhaltendem Hochwasser hohe Grundwasserstände auftreten. Entsprechende Schutzkonzepte sind zu erstellen und umzusetzen.

Tabelle 6.4: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Wasser“ in Köln.

	Maßnahmen Wasser
Allgemein	■ Etablierung einer hochwassergerechten Stadt- und Hochbauplanung.
	■ Überschwemmungsgebiete sollten von Bebauung freigehalten werden.
	■ Verbesserung der privaten Hochwasservorsorge.
	■ Wegen möglicher Grundwasserschwankungen bzw. hochwasserbeeinflussten Höchstständen ist im Hinblick auf die Auftriebsgefahr für Bauwerke und Vernässungsschäden an Gebäuden das Augenmerk auf grundwasserangepasste Bauweisen zu legen.
	■ Hochwassergefahrenkarten für Bäche.
	■ Hochwassermanagement für Bäche.
	■ Der Hochwasser- und Grundwasserschutz muss berücksichtigt werden, damit die weitere Entwicklung der Stadt nicht durch zunehmenden Funktionsverlust der städtischen Infrastrukturen behindert wird (z. B. in Folge von Hochwasser-Grundwasserschäden).
	■ Wasserflächen und Springbrunnen werden reaktiviert oder neu errichtet.
Hitzebelastung	■ Verbesserung der Wasserqualität durch Erhalt der sommerlichen Abflüsse/ausreichende Wasserzufuhr.
	■ Konsequente Maßnahmen zur Vermeidung von Nährstoffeinträgen in Gewässer.
	■ Reduzierung des internen Nährstoffstatus/Verbesserung der Wasserqualität im Sinne der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).
Starkniederschlag	■ Verbesserung der Frühwarnung vor Starkniederschlagsereignissen.
	■ Niederschläge sind nicht in den Kanal einzuleiten, sondern, soweit möglich, ohne Beeinträchtigung der natürlichen Standortfaktoren auf dem Grundstück zu versickern.
	■ Verbesserung der Niederschlagsversickerung vor Ort.
	■ Entwicklung eines kommunalen Grundwassermanagements.
	■ Verbesserung der Erhebung von Grundwasser-Daten/Grundwasser-Monitoring und Ableitung von Grundwasser-Szenarien.
	■ Verbesserung der Vorsorge vor Überschwemmungen.
	■ Bessere Information der Öffentlichkeit in tiefer liegenden Gebieten.
	■ Schaffung und Einplanung von Notwasserwegen.
	■ Weitgehende Untersuchungen zur Überflutungsgefährdung.
	■ Förderung von Objektschutzmaßnahmen, sowohl bei privaten als auch öffentlichen Gebäuden.
	■ Renaturierung von Bächen und Flüssen. Schaffung von Mäandern und von Überflutungsflächen.

Tabelle 6.5: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Boden“ in Köln.

	Maßnahmen Boden
Allgemein	■ Freihaltung der klimatisch aktiven Freiflächen von Bebauung, Versiegelung und sonstigen Beeinträchtigungen.
	■ In Planungs- und Genehmigungsverfahren konsequente Umsetzung von Vermeidungsmaßnahmen und vollständiger Ausgleich der Verluste der natürlichen Bodenfunktionen.
	■ Erhalt, bzw. Erhöhung von standorttypischen Humusgehalten.
	■ Entsiegelung, Bodenneuaufbau und -verbesserung überprägter Böden im urbanen Raum.
	■ Humusmehrende Bewirtschaftung kommunaler Grün-, Park- und Forstflächen (z. B. durch Verbleib von Schnittgut und Laub vor Ort, etc.).
	■ Nutzungsumstellungen (z. B. von Ackerland in Grünlandflächen) und konservative Bodenbearbeitung.
	■ Erfassung und Bewertung verdichtungsgefährdeter Flächen sowie eine Vermeidung von Bodenverdichtungen.
	■ Bestandssicherung von Niedermooren im Rahmen der Flächennutzungsplanung.
	■ Regenerieren von entwässerten Mooren.
	■ Erfassung und Bewertung erosionsgefährdeter Flächen sowie kartographische Darstellung als Planungs- und Handlungsgrundlage.
Hitzebelastung	■ Gezielte Sicherung von Flächen in Hanglagen, in Kaltluftbahnen und in Windschneisen zur Sicherung der natürlichen Bodenfunktionen.
	■ Für die landwirtschaftlichen Flächen sollen Möglichkeiten zur Anpassung ermittelt und kommuniziert werden (Anbaumethoden und -produkte, Anbauzyklen, Beeinträchtigungen durch neue Schädlingsformen).
	■ Ausweisung von Bodeneinheiten und Flächen im Hinblick auf ihren Wert für das Stadtklima.
	■ Erhöhung der Bodenkühlleistung bei sommerlichen Hitzeperioden durch Bewässerung.
	■ Sämtliche Baumbete erhalten zur Erhöhung ihrer Wasserspeicherkapazität Substrate und unterirdische Wurzelräume.
Starkniederschlag	■ Wiederherstellung von natürlichen Bodenfunktionen, um die Versickerungsfähigkeit/ Infiltrationskapazität zu regenerieren.
	■ Eine Vegetationsdecke an exponierten Böschungs- und Hanglagen schaffen.
	■ Vermeidung von Verdichtung und Verschlammung, um Bodenerosion bei Starkregenereignissen (Humusverlust) zu verhindern.

Tabelle 6.6: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Biotop- und Artenschutz“ in Köln.

	Maßnahmen Biotop- und Artenschutz
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ■ Feuchtgebiete sollen durch Entsiegelung und bauliche Einschränkungen erhalten und geschützt werden. ■ Erhalt und Vergrößerung von Schutzgebieten, um die negativen Folgen der durch den Klimawandel zu erwartenden Verstärkung der negativen Randeffekte zu verringern. ■ Regelmäßige Erhebung der Flora und Fauna, um Veränderungen in den Biozönosen zu erkennen und gegebenenfalls rechtzeitig regulierend eingreifen zu können. ■ Vernetzung naturnaher Biotope durch geeignete Strukturen. ■ Schaffung eines auch überregionalen Biotopverbundes zur Ermöglichung der Wanderung von klimasensitiven Arten in klimatisch tolerierbare Bereiche. ■ Keine künstliche Ausbringung fremdländischer an wärmere Klimate angepasster Arten in naturnahen Biotopen, da die ökologischen Folgen nicht abschätzbar sind (Neobiotaprobematik, nicht absehbare Störung des ökologischen Gleichgewichtes). ■ Entwicklung von Konzepten zur Abmilderung der prognostizierten Folgen des Klimawandels auf die Ökosysteme.

Tabelle 6.7: Maßnahmenvorschläge für das Handlungsfeld „Gesundheit“ in Köln.

	Maßnahmen Gesundheit
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bei extremer Hitzebelastung bzw. Überflutungsgefahr durch Starkregenereignisse sollten geeignete Notfall- und Rettungskonzepte für kritische und sensible Infrastrukturen vorhanden sein oder erarbeitet werden. ■ Die Gesundheitsämter sollten ihre Informationskampagne zur Warnung vor hitzebedingten Gesundheitsrisiken über Presse, Medien, Flyer, Internet etc. verbreiten. ■ Bei der Planung von Einrichtungen für gefährdete Personengruppen (z. B. Krankenhäuser, Pflegeheime, Seniorenstift) sollten Karten (z. B. Planungshinweiskarte) herangezogen werden, um das Gefährdungspotenzial durch starke Wärmebelastung einschätzen zu können und einen klimawandelgerecht optimierten Standort (möglichst geringe Wärmebelastung) zu finden.
Hitzebelastung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Es gilt Gebiete zu identifizieren, die von Hitze- oder Kältestress beziehungsweise starken Temperaturschwankungen besonders betroffen sein können. Hilfsmittel: Planungshinweiskarte, Modellrechnungen mit Stadtklimamodellen (z. B. MUKLIMO_3, ENVI_met). ■ Höhere Anforderungen an den Katastrophenschutz durch älter werdende und isolierter lebende Bevölkerung (demographischer Wandel). ■ Bei der Identifizierung von Gebieten mit thermischer Belastung sind bei vorhandenen und geplanten Infrastruktureinrichtungen für besondere Risikogruppen (z. B. Ältere, Kranke usw.) die Möglichkeiten von Schutzmaßnahmen (z. B. Klimatisierung, Pflanzung von Schattenbäumen) zu prüfen. ■ Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes gibt die Frühwarnvorhersagen täglich um 10.00 Uhr für den Tag und für den Folgetag heraus. Der DWD stellt diese Informationen sowohl Einrichtungen des Gesundheits- und Sozialsystems als auch der Öffentlichkeit zur Verfügung und verbreitet die Frühwarnung über Radio und Fernsehen. Die Pflegeeinrichtungen können sich im Internet unter www.dwd.de/gesundheit für den kostenlosen Hitzewarnnewsletter anmelden. Durch gezielte Maßnahmen sollten diese Informationen inklusive Handlungsanweisungen allen Pflegekräften zur Verfügung gestellt werden.

	Maßnahmen Gesundheit
Hitzebelastung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Da die Hitzewarnung nicht immer alle gefährdeten Bevölkerungsgruppen rechtzeitig erreichen kann, ist eine verbindliche Festlegung der Zuständigkeiten im Fall der Hitzeperiode notwendig (z. B. ehrenamtliches Hitzetelefon). ■ Zusätzliche Trinkwasseraufbereitung durch mit der Temperaturerhöhung einhergehende erhöhte Verkeimungsrate. ■ Aufstellen von Trinkwasserbrunnen/Trinkwasserspendern. ■ Überprüfung potenzieller neuer Infektionswege bzw. Ausbreitung von Krankheitserregern. ■ Hinreichend schnelle Erreichbarkeit von Erholungsräumen (Frei- und Grünflächen, Frischluftschneisen) für sensible Bevölkerungsgruppen sicherstellen.
Starkniederschlag	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bei extremen Wetterereignissen kann eine Erreichbarkeit vorübergehend eingeschränkt sein, Beispielweise können ältere Menschen und chronisch Kranke vorübergehend ihren Arzt nicht mehr aufsuchen. Ein Konzept mit alternativen Verkehrswegen und ein entsprechendes Management vorhandener Ressourcen ist zu erarbeiten und umzusetzen.

Tabelle 6.8: Maßnahmen – Beispiele in Köln

	Maßnahmen Beispiele in Köln
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bestandssicherung von Niedermooren im Rahmen der Flächennutzungsplanung beispielsweise Merheimer Bruch, Worringer Bruch, Thielenbruch, Linder Bruch. ■ Förderung zur Pflanzung von Straßenbäumen, 600 € für einen Baum (www.1000baeumefuerkoeln.de). ■ Erstellung von Überflutungssimulationen bei Starkregen für das gesamte Stadtgebiet durch die StEB. ■ Empfehlungen zur Verhaltensvorsorge bei Starkregenereignissen auf der Internetseite der StEB. ■ Bauvorsorge bei Starkregenereignissen auf der Internetseite der StEB. ■ Internetseite der Hochwasserschutzzentrale Köln/StEB mit der aktuellen Hochwasserprognose für Köln. ■ Erhalt einer Baumallee und Umgestaltung (Fahrradweg statt Parkplätze) in Nippes, Kemperner Strasse. ■ Klimawald, Erprobung der Anpassungsfähigkeit von verschiedenen Baumarten. ■ „Grünes C“: Vernetzung von Grünflächen über das Kölner Stadtgebiet hinaus. ■ Komplettierung des Kölner Grüngürtels im Rechtsrheinischen. ■ Naturforscherkiste für Kölner Kindertagesstätten, Steigerung der Biodiversität und Erhöhung der Sensibilität der Kinder. ■ Warnung der Bevölkerung vor Hitze, Hitzewarndienst des Gesundheitsamtes Köln (Internet). ■ Verstärktes Gärtnern in Köln zur Sensibilisierung der Bevölkerung . ■ Vernetzung von Akteuren, z. B. „Smart City“, „Hochwasserkompetenzzentrum; HKC“. ■ Projekt „Weinanbau zur Verbesserung des Stadtklimas“, Begrünung von Südfassaden und Zäunen. ■ Planung einer grünen Fahrradverbindung in Ehrenfeld „Low Line Linear Park“ und eines Fahrradschnellweges von Frechen nach Köln.

Literatur

- DAS, 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- Baierlein, F., 2006: Klimawandel und Vögel.
- Blättner, B., Heckenhan, M., Georgy, S., Grewe, H A., Kupski, S., Wohngebiete mit hitzeabhängigen Gesundheitsrisiken ermitteln. Bundesgesundheitsblatt 2010 – 53:75-81, Online publiziert 27. Nov. 2009 Springer Verlag.
- Deutscher Städtetag, Positionspapier Anpassung an den Klimawandel – Empfehlungen und Maßnahmen der Städte. 2012.
- Eis, D. Helm, D., Laußmann, D., Stark, K., In: Klimawandel und Gesundheit, Ein Sachstandsbericht, Hrsg. Robert Koch Institut, Berlin 2010, 85.
- Gaßner, Groth, Siederer & Coll., 2012: Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes.
- Höke, S., Denneborg, M., Kaufmann-Boll, C., 2011: Klimabedingte Veränderung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes und der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Emscher. dynaklim-Publikation Nr. 11/September 2011.
- Hübler, M., Klepper, G., Peterson, S., Cost of climate change: The effects of rising temperatures on health and productivity. Kieler Arbeitspapier, No. 1321, 2007.
- Küchenhoff, B., 1996: Die blauflüglige Sandschrecke in Köln – erster Wiederfund für NRW.
- Ingendahl, B., Thieme, I., UMID – 2009, 3, 5-7 Gesundheitliche Effekte des Klimawandels. Junior Forschungsgruppe 2012, Lebenswerte urbane Räume in Deutschland – Studien zur gesundheitlichen Bedeutung urbaner Grünräume (Stadtgrün) und Gewässer (Stadtblau).
- Kistemann, T., Völker, S., Lengen, C., Stadtblau – Die gesundheitliche Bedeutung von Gewässern im urbanen Raum. In: Bedeutung von Stadtgrün für Gesundheit und Wohlbefinden. NUA Hefte 2010;26:61-75.
- KölnTourismus, Köln – Stadt des Wassers (online). Köln 2013 (Zitierdatum: 28.03.2013), abrufbar unter <http://www.koelntourismus.de/stadterlebnis/stadt-des-wassers.html>.
- KUTTLER, W., 2011: Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen; Climate change in urban areas, Part 2, Measures. In: Environmental Sciences Europe (ESEU), Springer open, Doi: 10.1186/2190-4715-23-21, S. 1–15.
- MUNLV, 2009: Anpassung an den Klimawandel. Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen.
- MKULNV, 2010: Natur im Wandel: Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Nordrhein-Westfalen.
- MKULNV, 2011a: Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- MKULNV, 2011b: Klimawandel und Böden. Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort.
- Nekum, S., 2012: Verbreitung und Bestandsanalyse der Zauneidechse in der Stadt Köln.
- Schmidt, R., 2013: Öffentliches Baurecht mit verwaltungsprozessualen Bezügen. 14. Auflage. Grasberg.
- Sperk, C., Mücke, H.-G., Klimawandel und Gesundheit: Informations- und Überwachungssysteme in Deutschland. Umweltbundesamt Umwelt & Gesundheit 03/2009.
- Wittig, S., Schuchardt, B., 2013 UMID, 2013, 1, 42-46 Hitze in der Stadt – Herausforderungen und Best-practice Beispiele.



Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

